

Transporte

Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión:

Situación y perspectivas para automoción



Transporte

Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión:

Situación y perspectivas para automoción



FITSA

Fundación Instituto Tecnológico
para la Seguridad del Automóvil



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

Nuevos Combustibles y Tecnologías de Propulsión: Situación y Perspectivas para Automoción

Copyright ©: Fundación Instituto Tecnológico
Para la Seguridad del Automóvil –FITSA
Avda. de Bruselas, 38 portal B, 2º
28108 Alcobendas (Madrid)
www.fundacionfitsa.org

Esta publicación es el resultado de un estudio realizado por la consultora BESEL,S.A. para la Fundación FITSA y de las aportaciones de los departamentos de transporte y biocarburantes de IDAE. En ella han intervenido los expertos y empresas identificados en los agradecimientos, el grupo de trabajo de FITSA coordinado por Almudena Muñoz Babiano y el grupo de trabajo de IDAE coordinado por Ángel Cediél Galán:

Grupo de trabajo de FITSA:

Agustín Aragón Mesa
Óscar Ciordia Escribano
Jesús Monclús González
Almudena Muñoz Babiano

Grupo de trabajo de IDAE:

Ángel Cediél Galán
Carlos Alberto Fernández López
Juan Francisco Larrazábal Roche
Juan Luis Plá de la Rosa
Luis Alberto Vivaracho Ruiz

Esta publicación ha sido editada por el IDAE y está incluida en su fondo editorial.

Diseño y Maquetación: Sedán Oficina de Imaginación, S.L.

ISBN: 978-84-612-2622-1

Depósito legal: M-00000-2008

© FITSA 2008. La obra se encuentra protegida por la ley española de propiedad intelectual y/o cualesquiera otras normas que resulten de aplicación. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, su tratamiento informático, su transmisión, de ninguna forma y por ningún medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia o informático o por combinación de ellos, su préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión del uso o su incorporación total o parcial en otras obras, sin el consentimiento previo, expreso y escrito, de FITSA e IDAE.

FITSA/IDAE no se hacen responsables, en ningún caso, de la efectividad de los sistemas, medios o datos descritos en el documento en el caso de efectuarse una aplicación industrial de los mismos, si ello fuese posible, advirtiendo que la descripción de los sistemas, datos y medios que se realizan en el presente documento no suponen bajo ningún concepto una homologación ni una convalidación oficial de los mismos.

Madrid, noviembre 2008

Presentación Institucional

La industria de automoción ha sido desde siempre un elemento dinamizador del avance económico y social, por su capacidad de facilitar la movilidad de personas y productos. Sin embargo, es también, hoy, uno de los principales responsables de la contaminación ambiental –particularmente en el ámbito urbano– con la peculiaridad, además, de su enorme dependencia del petróleo –el 98% del consumo de energía del transporte en España lo es de productos petrolíferos.

El sector del transporte es el principal sector consumidor de energía de España (38,2% del consumo final de energía en España del año 2006). Esto equivale al 30% del total de las emisiones antropogénicas de CO₂ en España, aumentando estas cifras a un ritmo muy superior al resto de sectores (más del 188% de incremento de emisiones de CO₂ desde 1990). La carretera y, por lo tanto, el sector de automoción tienen además un papel protagonista en lo que al consumo de energía se refiere con un 80% del total del consumo atribuido al sector. Un caso reseñable es la situación del automóvil turismo, que supone casi un 50% del consumo del transporte y un 15% del consumo nacional de energía.

Por otra parte, aunque España es una de las grandes productoras europeas de vehículos turismo e industriales, no tiene capacidad de decisión, ya que las principales marcas no son de capital nacional. Sin embargo, en la industria de componentes es diferente, ya que existe una fuerte presencia de empresas netamente nacionales en este sector. Sector de componentes que es el tercero de Europa, con una tasa de crecimiento anual del 6% desde 1993; y que marcó un record de producción en el 2007 con 32.873 millones de euros, dio empleo a más de 245.000 personas, y exportó más del 50% de esta producción; con una importante presencia industrial a nivel internacional derivada del hecho de que 19 empresas españolas tienen plantas de producción en 16 países.

Hoy es ya una prioridad a nivel mundial, y particularmente en los países de la UE, mejorar la eficiencia energética del transporte, y fomentar el uso de energías alternativas al petróleo. Para ello es imprescindible invertir en investigación y desarrollo tanto para los nuevos carburantes, como para las mejoras de los actuales sistemas de propulsión y las propulsiones alternativas. Por tanto, es en este sector industrial de componentes de automoción donde estimamos debe hacerse el esfuerzo a nivel nacional, poniendo de manifiesto las oportunidades que para él ofrecen las nuevas tecnologías de propulsión y los combustibles alternativos.

Es objetivo de esta publicación de IDAE-FITSA contribuir a suministrar información básica y sintética sobre el estado de arte y prospectiva de las tecnologías de propulsión. Para ello, ha contado con la colaboración de expertos en diferentes áreas del sector con el fin de que los datos aquí recogidos sean lo más representativos y fiables posible. En esta publicación, dirigida al sector de componentes, centros tecnológicos, universitarios y sociedad, en general, se han tratado de identificar las diferentes opciones tecnológicas y fuentes energéticas que están surgiendo ante las nuevas exigencias medioambientales y retos que se le están planteando, así como informar sobre las nuevas posibilidades y oportunidades de mercado que se están presentando en el sector.

FITSA
Fundación Instituto Tecnológico
para la Seguridad del Automóvil

IDAE
Instituto para la Diversificación
y Ahorro de la Energía

Agradecimientos

Forma parte de la cultura corporativa de FITSA el contar con la participación de expertos en las materias y temáticas objeto de análisis o estudios: es lo que denominamos “GRUPOS DE INTERÉS”.

Siendo esto habitual, era especialmente necesario en este caso en el que confluyen una gran complejidad y variedad de elementos tecnológicos, prospectivas, y políticas de promoción, tanto de innovación como de eficiencia energética y medioambiental. Variedad que se refleja, como era de esperar, en las propias organizaciones a las que pertenecen estos expertos citados más abajo.

Por otra parte, era necesario también contar con la opinión de instituciones que posibilitase una razonable identificación de la hoja de ruta de estas nuevas tecnologías a través del clásico cuestionario Delphi.

Fitsa quiere hacer público su agradecimiento, y reconocimiento, tanto a las personas como a las instituciones que han colaborado con nosotros en este trabajo y que citamos a continuación. Agradecimiento y reconocimiento que declaramos no cabe en estas breves líneas.

Pero sí queremos hacer público la ilusión y empeño que han puesto en ellos estas personas, y cuya colaboración ha ido más allá de la petición de Fitsa, porque gracias a sus trabajos, redacciones e informaciones y juicios y comentarios, han mejorado la visión y la concreción de este estudio. En consecuencia es justo reconocerles que sin ellos este trabajo –y su publicación– no tendría ni la calidad ni la utilidad que de él se espera.

Muchas gracias a todos y cada uno.

Grupo de Interés de expertos

- Fraile Gallo, Miguel (IRISBUS/IVECO)
- Luna Fernández, Manuel (Ford España)
- Mataix Kubusch, Carlos y Acebrón Rodicio, Fernando (Anfac)
- Mestre, Jordi (Lear Corporation)
- Olcoz Yanguas, Serafín (Tecnoebro)
- Payri González, Francisco y Salavert Fernández, J. Miguel (Centro de Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Valencia)
- Soria García-Ramos, M^a Luisa (Exide Technologies)

Entidades Colaboradoras en Cuestionario Delphi

- Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA)
- Hynergreen Technologies, S.A.
- Instituto de Carboquímica (ICB)
- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
- Laboratorio de Investigación en Tecnologías de la Combustión (LITEC)
- Universidad Politécnica de Jaén

Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil

Índice

Justificación	12
Parte I: El motor de combustión interna convencional y sus modificaciones y desarrollos	15
1 Motores de Combustión Interna	16
1.1 Definición y características básicas.....	16
1.2 Ciclo Otto.....	16
1.3 Ciclo Diesel	17
1.4 Ciclo Atkinson.....	18
1.5 Ciclo Miller.....	19
1.6 Ciclo Carnot.....	19
1.7 Análisis DAFO	19
1.8 Balance de emisiones	20
1.9 Carburantes reformulados	21
2 Modificaciones en vehículos convencionales	23
2.1 Disminución y reducción del peso de los vehículos.....	23
2.2 Incremento de la eficiencia del motor	24
2.3 Catalizadores	25
2.4 Recirculación de gases de escape (EGR).....	27
2.5 Reducción catalítica selectiva (SCR)	28
2.6 Filtros de partículas diésel (DPF)	30
2.7 Sistema eléctrico de 42 V	30
2.8 Combustión de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI)	31
2.9 Combustión de autoencendido controlado (CAI)	34
2.10 Sistema de parada y arranque o “Stop and Start”	35
2.11 Sistemas de control de la presión de los neumáticos	36
2.12 Otras posibles modificaciones para reducir las emisiones de CO ₂	37
Parte II: Descripción de los combustibles y los sistemas de propulsión alternativas	41
3 Biodiésel	42
3.1 Definición y características básicas.....	42
3.2 Obtención y materias primas	43
3.3 Almacenamiento. Manipulación	46
3.4 Comercialización	47
3.5 Modificaciones en los motores.....	47
3.6 Funcionamiento y mantenimiento	47
3.7 Ventajas.....	48
3.8 Desventajas	49
3.9 Análisis DAFO	49
3.10 Balance de emisiones	49

3.11	Balance energético.....	50
3.12	Potencial tecnológico.....	51
3.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación.....	51
3.14	Mercado mundial	52
3.15	Mercado español	54
3.16	Factores clave	56
3.17	Experiencias y vehículos ya en el mercado.....	57
4	Bioetanol	58
4.1	Definición y características básicas.....	58
4.2	Obtención y materias primas	59
4.3	Almacenamiento. Manipulación	60
4.4	Comercialización	60
4.5	Modificaciones	60
4.6	Funcionamiento y mantenimiento	61
4.7	Ventajas.....	62
4.8	Desventajas.....	62
4.9	Análisis DAFO	63
4.10	Balance de emisiones	63
4.11	Balance energético.....	64
4.12	Potencial tecnológico.....	64
4.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación.....	64
4.14	Mercado mundial	65
4.15	Mercado español	67
4.16	Experiencias y vehículos ya en el mercado.....	71
5	Combustibles sintéticos	72
5.1	Definición y características básicas.....	72
5.2	Obtención y materias primas	72
5.3	Almacenamiento. Manipulación	74
5.4	Comercialización	74
5.5	Modificaciones	74
5.6	Funcionamiento y mantenimiento	74
5.7	Ventajas.....	74
5.8	Desventajas.....	75
5.9	Análisis DAFO	75
5.10	Balance de emisiones	75
5.11	Balance energético.....	76
5.12	Potencial tecnológico.....	77
5.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación.....	77
5.14	Mercado mundial	78
5.15	Mercado español	79
5.16	Experiencias y vehículos ya en el mercado.....	80

6	Biocarburantes de segunda generación	81
6.1	Definición y características básicas	81
6.2	Obtención y materias primas	81
6.3	Almacenamiento. Manipulación	82
6.4	Comercialización	82
6.5	Modificaciones	82
6.6	Funcionamiento y mantenimiento	82
6.7	Ventajas	82
6.8	Desventajas	83
6.9	Análisis DAFO	83
6.10	Balance de emisiones	83
6.11	Potencial tecnológico	83
6.12	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación	84
6.13	Mercado mundial	84
6.14	Mercado español	84
6.15	Experiencias y vehículos ya en el mercado	85
7	Gas natural	86
7.1	Definición y características básicas	86
7.2	Obtención y materias primas	86
7.3	Almacenamiento. Manipulación	87
7.4	Comercialización	89
7.5	Modificaciones en los motores	89
7.6	Funcionamiento y mantenimiento	90
7.7	Ventajas del gas natural comprimido	91
7.8	Desventajas	91
7.9	Análisis DAFO	91
7.10	Balance de emisiones	92
7.11	Balance energético	92
7.12	Potencial tecnológico	93
7.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación	93
7.14	Mercado mundial	93
7.15	Mercado español	95
7.16	Experiencias y vehículos ya en el mercado	96
8	Biogás	98
8.1	Definición y características básicas	98
8.2	Obtención y materias primas	98
8.3	Almacenamiento. Manipulación	99
8.4	Comercialización	99
8.5	Modificaciones en los motores	99
8.6	Funcionamiento y mantenimiento	99
8.7	Ventajas	99



8.8	Desventajas.....	99
8.9	Análisis DAFO	100
8.10	Balance de emisiones	100
8.11	Balance energético.....	101
8.12	Potencial tecnológico.....	101
8.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación.....	101
8.14	Mercado mundial	101
8.15	Mercado español	101
8.16	Experiencias y vehículos ya en el mercado.....	101
9	Gas licuado del petróleo.....	102
9.1	Definición y características básicas.....	102
9.2	Obtención y materias primas	102
9.3	Almacenamiento. Manipulación	102
9.4	Comercialización	103
9.5	Modificaciones	103
9.6	Funcionamiento y mantenimiento	104
9.7	Ventajas.....	104
9.8	Desventajas.....	104
9.9	Análisis DAFO	105
9.10	Balance de emisiones	105
9.11	Balance energético.....	106
9.12	Potencial tecnológico.....	107
9.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación.....	107
9.14	Mercado mundial	108
9.15	Mercado español	110
9.16	Experiencias y vehículos ya en el mercado.....	112
10	Vehículos eléctricos	113
10.1	Definición y características básicas.....	113
10.2	Obtención y materias primas	113
10.3	Almacenamiento. Manipulación	113
10.4	Comercialización	114
10.5	Modificaciones	114
10.6	Funcionamiento y mantenimiento	115
10.7	Ventajas	115
10.8	Desventajas	115
10.9	Análisis DAFO	116
10.10	Balance de emisiones	116
10.11	Balance energético.....	117
10.12	Potencial tecnológico.....	117
10.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación.....	117
10.14	Mercado mundial	117

10.15 Mercado español	118
10.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado	118
11 Vehículos eléctricos híbridos.	120
11.1 Definición y características básicas	120
11.2 Obtención y materias primas	121
11.3 Almacenamiento. Manipulación	122
11.4 Comercialización	122
11.5 Modificaciones	122
11.6 Funcionamiento y mantenimiento	122
11.7 Ventajas	122
11.8 Desventajas	123
11.9 Análisis DAFO	123
11.10 Balance de emisiones	124
11.11 Balance energético	124
11.12 Potencial tecnológico	124
11.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación	125
11.14 Mercado mundial	125
11.15 Mercado español	126
11.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado	127
12 Hidrógeno en vehículos con pila de combustible	129
12.1 Definición y características básicas	129
12.2 Obtención y materias primas	129
12.3 Almacenamiento. Manipulación	130
12.4 Comercialización	131
12.5 Modificaciones	131
12.6 Funcionamiento y mantenimiento	131
12.7 Ventajas	131
12.8 Desventajas	131
12.9 Análisis DAFO	132
12.10 Balance de emisiones	132
12.11 Balance energético	133
12.12 Potencial tecnológico	133
12.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación	134
12.14 Mercado mundial	134
12.15 Mercado español	137
12.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado	138
13 Hidrógeno en vehículos con motor de combustión interna	139
13.1 Definición y características básicas	139
13.2 Obtención y materias primas	139
13.3 Almacenamiento. Manipulación	139
13.4 Comercialización	139



13.5	Modificaciones	139
13.6	Funcionamiento y mantenimiento	139
13.7	Ventajas.....	140
13.8	Desventajas.....	140
13.9	Análisis DAFO	140
13.10	Balance de emisiones	141
13.11	Balance energético.....	141
13.12	Potencial tecnológico.....	142
13.13	Viabilidad económica, disponibilidad y legislación.....	142
13.14	Mercado mundial	142
13.15	Mercado español	143
13.16	Experiencias y vehículos ya en el mercado.....	143
Parte III: Resumen comparado de los diferentes combustibles y tecnologías de propulsión.....		145
14	Comparación de tecnologías	146
14.1	Introducción	146
14.2	Ventajas e inconvenientes.....	147
14.3	Balance de emisiones	151
14.4	Balance energético.....	154
14.5	Balance del grado de desarrollo tecnológico y de las infraestructuras	156
15	Legislación vigente. Políticas actuales y emergentes	158
15.1	Legislación y políticas europeas	158
15.2	Legislación y políticas españolas.....	159
16	Análisis económico y social	162
17	Estudio de mercado y disponibilidad de los sistemas	164
17.1	Modificaciones de los sistemas convencionales de propulsión.....	164
17.2	Biodiésel	164
17.3	Bioetanol.....	164
17.4	Combustibles sintéticos	164
17.5	Biocarburantes de segunda generación	164
17.6	Gas natural	165
17.7	Gas licuado del petróleo (GLP)	165
17.8	Vehículos eléctricos.....	166
17.9	Vehículos eléctricos híbridos	166
17.10	Vehículos de pila de combustible.....	167
17.11	Vehículos con motores de combustión interna (MCI) impulsados por hidrógeno	167

Parte IV: Análisis prospectivo a 2020 de las nuevas tecnologías de propulsión y los combustibles alternativos (Método Delphi)	169
18 Definición de indicadores	170
18.1 Recursos energéticos y materias primas.....	173
18.2 Recursos tecnológicos y empresariales	174
18.3 Mercado.....	175
18.4 Beneficios medioambientales.....	179
18.5 Beneficios energéticos.....	181
18.6 Aspectos sociopolíticos.....	182
19 Indicador global de viabilidad futura para cada tecnología y combustible	185
19.1 Encendido por compresión de carga homogénea (HCCI).....	185
19.2 Auto-encendido controlado (CAI)	185
19.3 Biodiésel	186
19.4 Bioetanol.....	187
19.5 Combustible sintético “gas a líquido” (GTL)	187
19.6 Combustible sintético “biomasa a líquido” (BTL)	188
19.7 Etanol lignocelulósico	189
19.8 Gas natural	189
19.9 Gas licuado del petróleo (GLP)	190
19.10 Vehículos eléctricos.....	191
19.11 Vehículos híbridos	191
19.12 Vehículos impulsados por pila de combustible	192
19.13 Hidrógeno en motores de combustión interna (MCI).....	193
20 Análisis de escenarios	194
20.1 Diferentes escenarios	194
20.2 Valoración de los escenarios. Puntos en común y diferencias	199
21 Resumen y conclusiones	201
21.1 Resumen del análisis de los indicadores de viabilidad futura.....	201
21.2 Resumen de la valoración de los escenarios	204
21.3 Síntesis de la hoja de ruta.....	204
21.4 Resumen y conclusiones	209
Parte V: Anexos	213



Justificación

Se estima que en la Unión Europea (UE), el transporte genera el 25,6% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero responsables, a su vez, del calentamiento global [1,2]. Así, entre 1990 y 2003, mientras las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por el hombre se redujeron en su conjunto, la componente correspondiente al transporte creció alrededor de un 24% [3]. En este contexto, resulta evidente que la reducción de las emisiones de los gases producidos por el transporte podría contribuir significativamente a que la UE cumpliera los objetivos de Kioto. Además, en general, la principal fuente de energía para el sector del transporte es el carburante de origen fósil que supone el 98% del combustible total utilizado [4]. Por otro lado, en 2002 los combustibles alternativos (fósiles y renovables) representaron el 2% del combustible total utilizado por el sector transporte, mientras que los biocarburantes (combustibles renovables) únicamente alcanzaron el 0,4% del total. Actualmente, el 80% del consumo de biocarburantes en el sector del transporte es biodiésel y el 20% bioetanol. Sin embargo, durante los últimos años la contribución de los biocombustibles se ha incrementado notablemente debido a la implementación de la directiva europea de biocombustibles en varios Estados miembros.

En el año 2003 el Parlamento y el Consejo Europeo adoptaron la Directiva 2003/30/EC con el objetivo de promover el uso de los biocarburantes y otros combustibles renovables en el sector del transporte. Los objetivos de esta directiva eran y son: reducir las emisiones de GEI, impulsar la “descarbonización” de los carburantes para el transporte, diversificar las fuentes de abastecimiento de combustibles, ofrecer nuevas oportunidades económicas para las áreas rurales y desarrollar sustitutos a largo plazo para los combustibles fósiles. La Directiva obliga a los Estados Miembros a reemplazar antes del año 2005 el 2% de su gasolina y su gasóleo por biocombustibles, aumentando este porcentaje al 5,75% para el 2010. Sin embargo, en casos puntuales, la Directiva admite desviaciones respecto a dicho porcentaje si éstas están suficientemente justificadas. Además, el Libro Verde de la Comisión «Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético» establece el objetivo de sustituir el 20% de los carburantes convencionales por carburantes alternativos en el sector del transporte por carretera de aquí al año 2020.

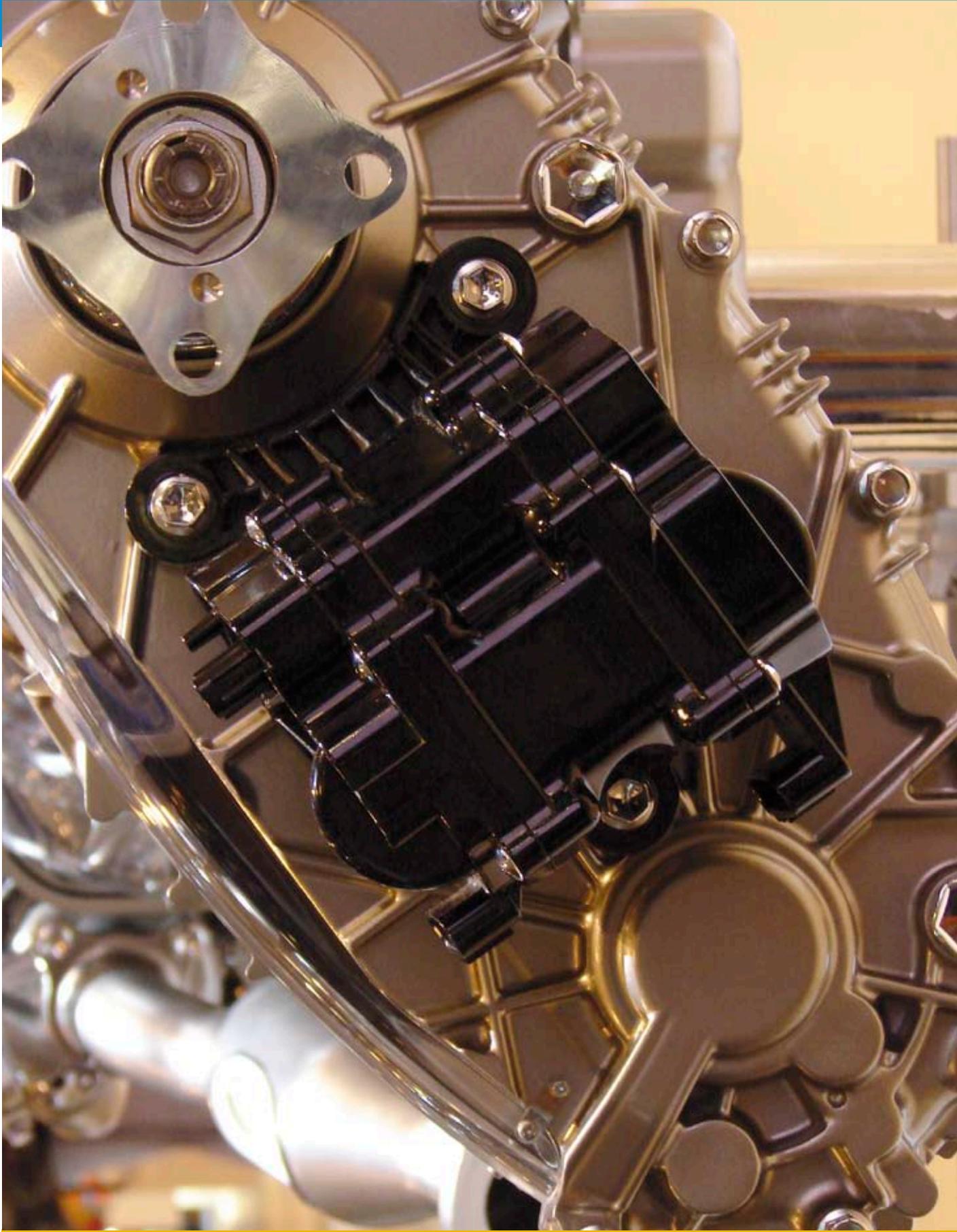
En el Marco de la Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través del IDAE, está ejecutando el Plan de Acción (PA) 2008-2012, que supone un esfuerzo adicional con respecto al anterior Plan 2005-2007 en colaboración con las comunidades autónomas y las ciudades de Ceuta y Melilla. El Plan tiene un objetivo de ahorro de energía primaria del 13,7% anual en 2012, lo que equivale a un ahorro de energía de 24,8 millones de tep al año y un ahorro acumulado cercano a los 90 millones de tep, en todo el periodo 2008-2012. Para lograr los objetivos del Plan de Acción 2008-2012, se han identificado 43 medidas dirigidas a todos los sectores consumidores de energía, incluido el transporte. Las medidas del sector transporte se integran en tres bloques diferenciados: medidas de cambio modal, medidas de mejor uso de los medios de transporte y medidas de mejora tecnológica y promoción de tecnologías y combustibles alternativos, estas últimas con una clara relación con la temática de este documento. De este modo, en el marco del PA 2008-2012, se pretenden movilizar 22.185 millones de euros, en cinco años, en inversiones en ahorro y eficiencia energética, para lo que se necesitarán del orden de 2.367 millones de euros de apoyos públicos.

Recientemente, se ha aprobado el Plan de Activación 2008-2011 en el que se definen medidas dentro de tres líneas estratégicas: movilidad sostenible, edificación sostenible y sostenibilidad energética. Estas medidas suponen, por una parte, una aceleración e intensificación de algunas de las medidas ya recogidas en el Plan de Acción 2008-2012; otras, en cambio, constituyen una novedad con respecto a lo ya aprobado y en ejecución. Dentro de las medidas que se proponen, la Administración General del Estado asumirá el papel ejemplarizante que le corresponde en el fomento del ahorro y la eficiencia, incluyéndose actuaciones de promoción del uso de combustibles alternativos y vehículos más eficientes.

Atendiendo a todas estas consideraciones, y con el fin de contribuir al cumplimiento de los compromisos asumidos en materia de cambio climático, seguridad de abastecimiento en condiciones ecológicamente racionales, y promoción de las fuentes de energía renovables, queda claro que se debe hacer un esfuerzo adicional para fomentar

la investigación, el desarrollo y la utilización de nuevos sistemas de propulsión y combustibles alternativos en el sector del transporte. Estas acciones conllevarán la adaptación de los vehículos existentes a los diferentes tipos de combustibles alternativos, y el desarrollo de nuevos sistemas de propulsión. Gracias a ello, se podrán alcanzar las metas anteriormente citadas, reduciéndose las emisiones de los vehículos y aumentando su eficiencia.

El objetivo de este trabajo es dar una visión panorámica de la entrada en el mercado de las nuevas tecnologías de propulsión, combustibles y modificaciones de los motores actuales que pudiera ser útil, posteriormente, para determinar los efectos que producirán en el sector de componentes español, y para que éste pueda elaborar estrategias industriales de cara a futuro. Así pues, este estudio trata de analizar las nuevas tecnologías de propulsión, y suministrar un informe en el que se recoja la hoja de ruta de la entrada de los nuevos sistemas de propulsión y combustibles alternativos. Las tecnologías revisadas incluyen las modificaciones en las actuales tecnologías, los vehículos híbridos, los automóviles eléctricos y los vehículos de pilas de combustibles. En cuanto a los combustibles analizados en este trabajo se incluyen tanto los combustibles alternativos fósiles como gas licuado de petróleo y gas natural; como los propiamente renovables –biodiésel y bioetanol actuales y de segunda generación– y los combustibles sintéticos.



**El motor de
combustión interna
convencional y sus
modificaciones
y desarrollos**

1 Motores de Combustión Interna

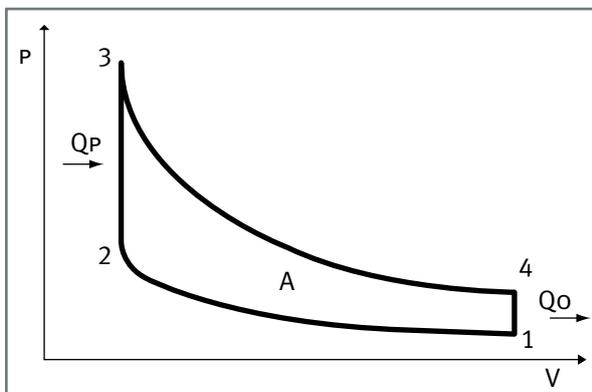
1.1 Definición y características básicas

Un motor de combustión interna es una máquina motriz que obtiene energía mecánica directamente de la energía química suministrada por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Aunque existen otros tipos de motores de combustión interna, los motores más utilizados en el sector de la automoción siguen siendo los motores de ciclos Otto y Diesel.

- **El motor cíclico Otto**, cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, es el motor convencional de gasolina que se emplea tanto en automoción como en aeronáutica. También se conoce como Motor de Encendido Provocado (MEP). Se denomina “provocado” porque el proceso de combustión se provoca con una causa externa, generalmente una chispa producida en una bujía. La chispa produce un frente de llama que se propaga por toda la cámara de combustión. El proceso de combustión se desarrolla a volumen constante.
- **El motor Diesel**, llamado así en honor del ingeniero alemán Rudolf Diesel, funciona con un principio diferente y suele consumir gasóleo. Además de en el sector de automoción, se emplea en instalaciones generadoras de energía eléctrica y en sistemas de propulsión naval. Se conoce como Motor de Encendido por Compresión (MEC). En un MEC el aire introducido en los cilindros se comprime hasta que alcanza una alta temperatura y presión. A continuación, se inyecta el combustible diésel que, debido a esas altas temperaturas y presiones, se inflama espontáneamente. La combustión se realiza a presión constante.

Los motores Otto y Diesel comparten un gran número de componentes mecánicos, y tanto uno como el otro se fabrican en modelos de dos y cuatro tiempos.

1.2 Ciclo Otto



El ciclo Otto es un ciclo termodinámico ideal que se utiliza para representar el ciclo real de los motores de combustión interna de encendido provocado. Se caracteriza porque todo el calor fruto de la combustión se genera a volumen aproximadamente constante [5, 6]. El ciclo consta de cuatro fases, como se muestra en la gráfica de la izquierda:

Figura 1. Diagrama presión-volumen del ciclo Otto

Fuente: Elaboración propia

Las cuatro fases, o procesos, son:

- Fase 1-2: Compresión adiabática (sin aporte de calor). Durante esta fase se aporta trabajo al ciclo (se comprime el aire en el interior de los cilindros).
- Fase 2-3: Encendido o ignición, fase durante la cual se produce el aporte de calor a volumen constante (el calor aportado se representa en la figura anterior con el símbolo “ Q_p ”). La presión se eleva rápidamente.
- Fase 3-4: Expansión adiabática (sin aportación ni sustracción de calor). Es la parte del ciclo que entrega trabajo, al expandirse rápidamente los gases en el interior de los cilindros.

- Fase 4-1: Escape. Durante esta fase se produce la salida de los gases de combustión al exterior y la cesión del calor residual al medio ambiente. Todo ello se produce a volumen aproximadamente constante (el calor cedido se representa en la figura anterior con el símbolo " Q_o ").

Como se ha indicado, existen dos tipos de motores que se rigen por el ciclo de Otto, los motores de dos tiempos y los motores de cuatro tiempos. En el motor de dos tiempos se produce un ciclo de trabajo completo por cada vuelta del cigüeñal del motor (es decir, un ciclo de trabajo completo por cada recorrido de subida y bajada de los cilindros dentro del motor); en el motor de cuatro tiempos el ciclo de trabajo completo requiere dos vueltas de cigüeñal.

El motor de cuatro tiempos es el más utilizado en los automóviles ya que tiene mejor rendimiento (rendimiento volumétrico mayor y renovación de los gases en el interior de los cilindros más perfecta) y contamina significativamente menos que el motor de dos tiempos. Sin embargo, los motores de dos tiempos suelen dar más potencia para la misma cilindrada, ya que se produce una explosión (un ciclo de trabajo) en cada revolución del motor, mientras el motor de cuatro tiempos hace una explosión por cada dos revoluciones. Además, este último cuenta con más partes móviles, lo que aumenta las pérdidas mecánicas por rozamiento entre las mismas [6].

1.2.1 Balance energético

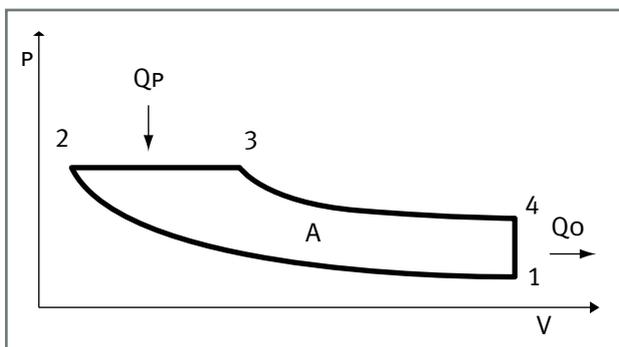
La eficiencia de los motores Otto modernos se ve limitada por varios factores, entre otros, la pérdida de energía en la fricción entre las diferentes piezas o las pérdidas de calor a través de la refrigeración.

En general, la eficiencia de un motor de este tipo depende de la relación de compresión, o proporción entre los volúmenes máximo y mínimo de la cámara de combustión. Esta proporción suele ser de 8 a 1 ó de 10 a 1 en la mayoría de los motores Otto modernos (el volumen mínimo es entre 8 y 10 veces menor que el volumen máximo). Se pueden utilizar proporciones mayores, hasta de 12 a 1, con lo que se aumenta la eficiencia del motor, pero ello exige la utilización de combustibles de alto índice de octano para evitar la detonación o picado del motor, proceso que se produce cuando la mezcla de aire y combustible se inflama espontánea e incontroladamente antes de producirse la chispa. Así, una relación de compresión alta requiere un combustible de octanaje alto para evitar este problema.

Actualmente, la eficiencia media de motor Otto moderno es de un 25%: es decir, sólo la cuarta parte de la energía del combustible se transforma en energía mecánica.

1.3 Ciclo Diesel

Este ciclo también se inicia con una compresión adiabática (sin intercambio de calor con el exterior), y continúa con una combustión que se produce a presión constante en el interior de los cilindros. En el ciclo Diesel no es necesario producir una chispa, ya que la inflamación del combustible se produce de manera espontánea debido a las altas



temperaturas y presiones alcanzadas por el aire en el interior de los cilindros durante la fase de compresión. Nuevamente, la etapa de entrega de trabajo se corresponde con una expansión adiabática. Finalmente, durante la cuarta fase del ciclo, se expulsan los gases de escape, con lo que se evacua el calor que éstos poseen tras la combustión y se enfría el motor [6].

Figura 2. Diagrama presión-volumen del ciclo Diesel

Fuente: Elaboración propia

Las cuatro fases o procesos del ciclo Diesel son:

- Fase 1-2: Compresión adiabática, a lo largo de la cual se aporta trabajo al ciclo.

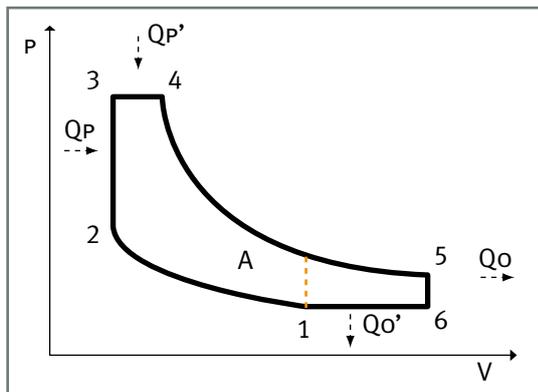
- Fase 2-3: Combustión. Durante esta fase, se produce un aumento de volumen del cilindro a presión constante. Además, en esta fase se aporta calor a presión constante (denominado en la figura anterior " Q_p "). En la fase de combustión ya se obtiene una primera generación de trabajo.
- Fase 3-4: Expansión adiabática. En esta fase también se produce una entrega de trabajo.
- Fase 4-1: Escape. Se produce la cesión del calor residual al medio ambiente a volumen constante (representado por " Q_o ").

Aunque también es posible fabricar motores de dos tiempos que sigan el ciclo Diesel, los motores Diesel de cuatro tiempos son los más utilizados.

1.3.1 Balance energético

La eficiencia de los motores Diesel es superior a la de los motores Otto por varios motivos, como por ejemplo: trabajan con relaciones de compresión más altas, y queman el combustible de manera más completa, ya que suelen operar a menores revoluciones por minuto que los motores de encendido provocado. Las eficiencias térmicas de los motores Diesel pueden situarse cerca del 35%.

1.4 Ciclo Atkinson



Algunos vehículos híbridos actuales (como es el caso del Toyota Prius) utilizan motores de combustión interna alternativos que funcionan según el llamado **ciclo Atkinson**. Este ciclo es ligeramente diferente al tradicional ciclo Otto de cuatro tiempos, como se muestra en el diagrama presión-volumen de la izquierda.

Figura 3. Diagrama presión-volumen del ciclo Atkinson
Fuente: Elaboración propia

En este ciclo se produce un aporte de calor a volumen constante (representado en la figura anterior por Q_p) y otro a presión constante (Q_o'). Análogamente el calor residual cedido por los gases se descompone en Q_o y Q_o' .

Como se ha indicado, el rendimiento termodinámico de un motor de combustión interna aumenta con los altos valores de la relación de compresión. Dicho aumento choca frontalmente con la tendencia que tiene la gasolina a detonar con altas relaciones de compresión. El ciclo Atkinson trata de aprovechar las ventajas que supone una alta relación de compresión, pero evitando el riesgo de detonación de la gasolina en estas condiciones. Ello se consigue reduciendo la duración efectiva de la carrera de compresión con respecto a la de expansión. La forma más viable y sencilla de conseguirlo es retrasar el cierre de la válvula de admisión, permitiendo con ello un cierto reflujo de gases hacia el colector de admisión mientras el pistón asciende.

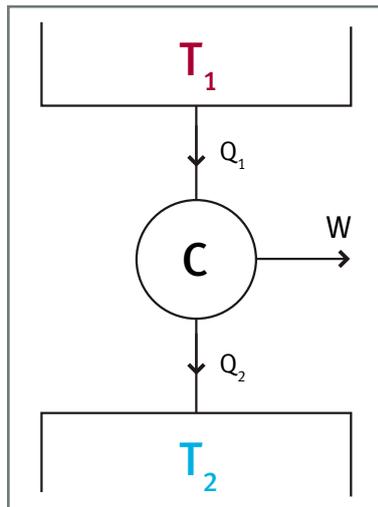
El cierre de la válvula de admisión determina la cantidad de gases que permanecen en el interior del cilindro y el comienzo de la compresión. La menor cantidad de mezcla retenida en el cilindro se traduce en unas menores presiones, pero permite usar relaciones de compresión altas (13:1 en el Prius) sin que se produzca detonación, lo que posibilita un mayor aprovechamiento durante la carrera de expansión de la energía liberada en la combustión.

El ciclo Atkinson proporciona un mayor rendimiento que el ciclo Otto convencional pero a costa de reducir la potencia máxima del motor, por lo que es muy adecuado para vehículos híbridos en los que se puede compensar esa pérdida de potencia mecánica con la aportación adicional del motor eléctrico.

1.5 Ciclo Miller

El **ciclo Miller** es un ciclo termodinámico muy similar al ciclo Atkinson ya que también se produce un retraso en el cierre de la válvula de admisión. La principal diferencia entre ambos es que el ciclo Miller está sobrealimentado. Igual que en el caso del ciclo Atkinson, en el ciclo Miller se consigue un aumento de la eficiencia mediante el aumento del ratio de compresión. Este tipo de motor se utilizó primero en barcos y motores estacionarios, aunque Mazda lo ha adaptado para utilizarlo en algunos de sus vehículos, y Subaru ya ha desarrollado un vehículo híbrido basado en este ciclo termodinámico.

1.6 Ciclo Carnot

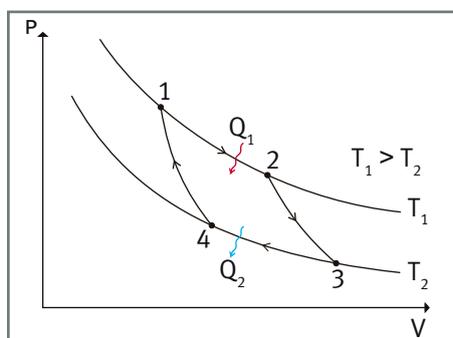


El **ciclo de Carnot** es un ciclo termodinámico teórico ideal y reversible. El rendimiento del ciclo de Carnot es el rendimiento teórico máximo que se puede alcanzar con cualquier máquina térmica.

Figura 4. Esquema de la máquina de Carnot
Fuente: Elaboración propia

Cualquier máquina térmica que realice este ciclo ideal se denomina máquina de Carnot. La máquina de Carnot trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 , procedente de una fuente de alta temperatura, y cediendo un calor Q_2 a otra segunda fuente de baja temperatura. El ciclo produce entre ambos procesos de absorción y cesión de calor un trabajo neto sobre el exterior (representado como "W"). El rendimiento viene definido, como en todo ciclo, por la relación entre el trabajo obtenido y el calor absorbido:

$$\eta = \frac{W = Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



El rendimiento teórico anterior es siempre mayor que el de cualquier otra máquina que funcione cíclicamente entre dos fuentes cualesquiera de calor a temperaturas respectivas T_1 y T_2 .

Figura 5. Diagrama presión-volumen del ciclo Carnot
Fuente: Elaboración propia

1.7 Análisis DAFO

Los combustibles más habitualmente utilizados en los motores que siguen los ciclos anteriores son de origen fósil. Normalmente se trata en general de gasolina o de diésel.

El análisis siguiente, por lo tanto, es el correspondiente a los combustibles convencionales obtenidos mediante refinado del petróleo: la gasolina y el diésel. El análisis correspondiente a los vehículos híbridos y al resto de tecnologías se ofrece más adelante en los capítulos correspondientes.

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Inseguridad de suministro • Recurso energético finito y a largo plazo agotable 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento incontrolado de los precios u oscilaciones bruscas de éstos • Legislación que favorezca otras opciones • Obligaciones de que sean reemplazados por carburantes alternativos
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Motores adaptados a los vehículos • Sistemas logísticos fiables • Costes muy competitivos 	<ul style="list-style-type: none"> • Se trata todavía de combustibles imprescindibles • Vía sencilla para la introducción de los biocombustibles

1.8 Balance de emisiones

Los vehículos actuales de gasolina son mucho más limpios, medioambientalmente hablando, que sus antecesores de hace tan sólo unos años.

La gráfica siguiente muestra los límites máximos de contaminantes fijados por las sucesivas normativas europeas para los vehículos de gasolina (desde la primera normativa “Euro 1” hasta la futura “Euro 6”):

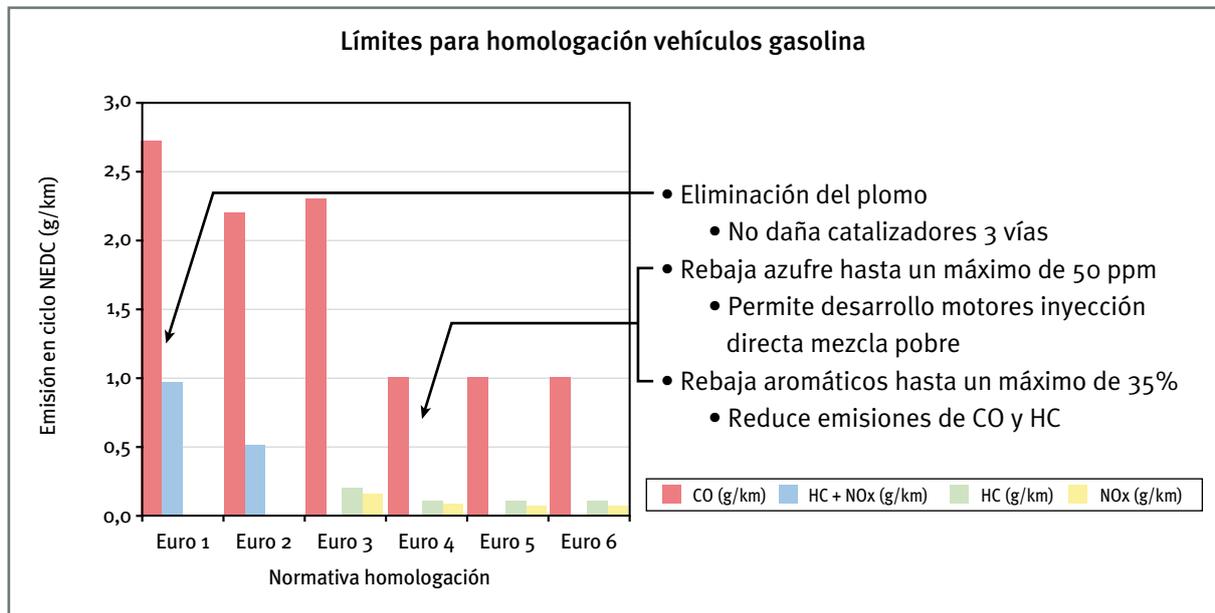


Figura 6. Límites de emisiones para la homologación de vehículos de gasolina

Fuente: Instituto Superior de la Energía

Por otra parte, los vehículos diésel también son ahora mucho más limpios que en el pasado, aunque la mayoría de ellos siguen emitiendo niveles de NO_x y de partículas más altos que los correspondientes a los vehículos de gasolina [7]. Sin embargo, emiten menos CO₂ que los motores de gasolina de la misma potencia, gracias a su mayor eficiencia

(o, lo que es lo mismo, a su menor consumo) [8]. Por ello, en muchos casos, los motores diésel con sistemas capaces de reducir las emisiones de partículas y de NO_x se perfilan como una buena alternativa desde el punto de vista medioambiental. Aunque la reducción prevista en el consumo de los motores de gasolina en los próximos años igualará en buena medida estas diferencias.

La gráfica siguiente muestra los límites máximos de contaminantes fijados por las sucesivas normativas europeas para los vehículos impulsados por combustibles diésel (desde la “Euro 1” hasta la futura “Euro 6”):

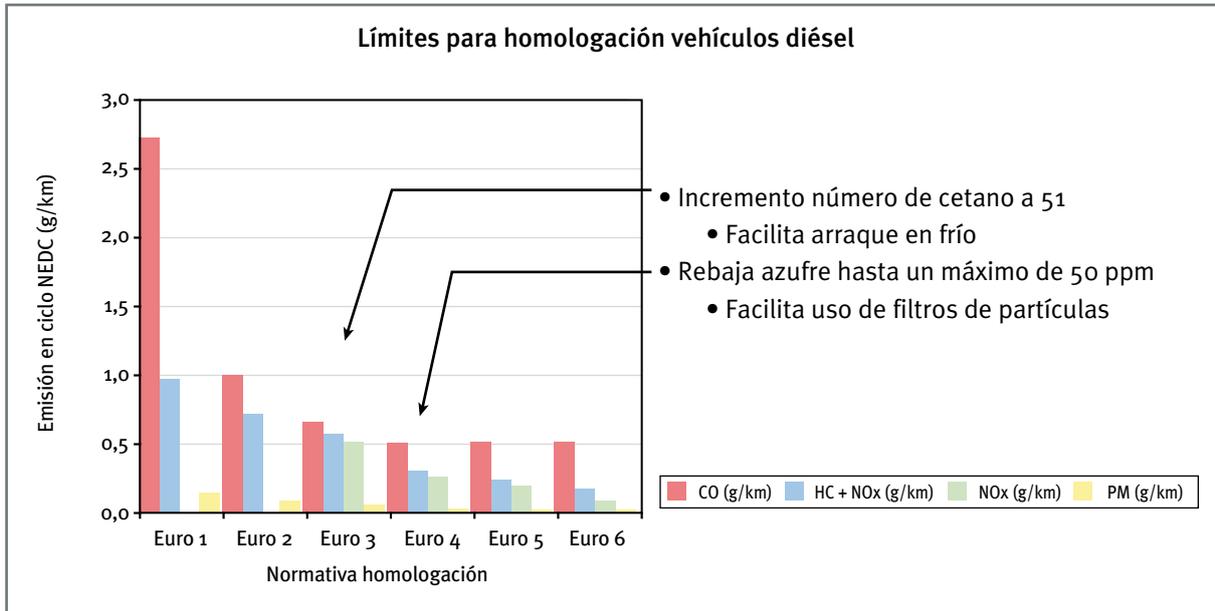


Figura 7. Límites de emisiones para la homologación de vehículos diésel

Fuente: Instituto Superior de la Energía

Tanto los motores de gasolina como los motores diésel son adecuados para su empleo en sistemas híbridos, incrementándose con ello notablemente la eficiencia global del sistema de propulsión y, por consiguiente, también reduciéndose las emisiones de CO_2 . Además, los motores de gasolina y diésel también pueden funcionar con biocarburantes, lo que ofrece la posibilidad de reducir aún más las emisiones netas de CO_2 .

1.9 Carburantes reformulados

Los **carburantes reformulados** son carburantes convencionales a los que se limita el contenido de ciertos componentes directamente relacionados con las emisiones contaminantes. Su repercusión sobre las emisiones es relativamente pequeña en comparación con la influencia de la tecnología de los motores, aunque sí pueden ayudar a mejorar el funcionamiento de los sistemas catalíticos de postratamiento de los gases de escape.

Entre los carburantes reformulados cabe destacar los combustibles con niveles bajos de azufre. Éstos son aquellos cuya composición presenta un máximo de 50 ppm (partes por millón) de azufre. Su utilización reduce las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y también, aunque en menor porcentaje, las emisiones de partículas en el caso de los motores diésel [9].

Además, dado que el azufre en los combustibles reduce la efectividad de los catalizadores de tres vías, de los catalizadores de NO_x , y de las tecnologías de reducción catalítica selectiva (o, en inglés, Selective Catalytic Reduction – SCR), el uso de combustibles de bajo contenido en azufre también permite, precisamente, utilizar estas nuevas tecnologías de tratamiento de gases de escape y reducir notablemente las emisiones de CO, de hidrocarburos y de NO_x [9].

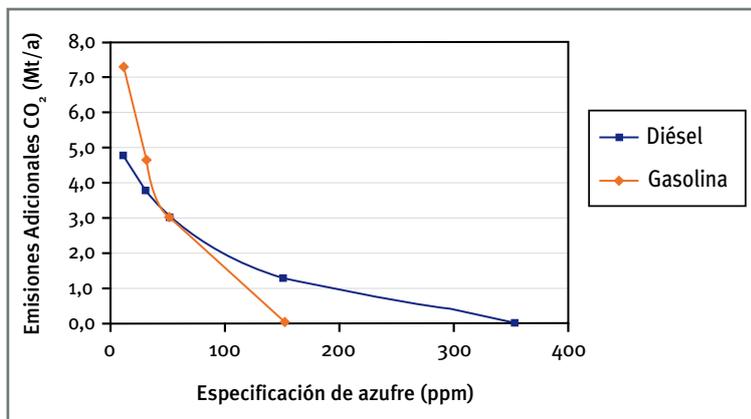
La reducción del contenido de azufre en los combustibles ha supuesto grandes beneficios para la calidad del aire. Sin embargo, es importante señalar que el proceso de eliminación del azufre utiliza energía y ello implica, como contrapartida, mayores emisiones de CO₂ durante el proceso de fabricación de los combustibles.

1.9.1 Ventajas

- Reducen las emisiones de óxidos de azufre, responsables de la lluvia ácida.
- Permiten utilizar tecnologías de reducción de emisiones que no son posibles con combustibles de alto contenido de azufre.

1.9.2 Desventajas

- Es necesaria energía adicional para eliminar el azufre de los combustibles, lo que se traduce en mayores emisiones de CO₂ durante la producción del combustible.



La figura de la izquierda muestra como a medida que se reduce el contenido de azufre en el combustible aumentan muy significativamente las emisiones de CO₂.

Figura 8. Incremento de las emisiones de CO₂ durante la desulfuración de los combustibles
Fuente: Instituto Superior de la Energía

1.9.3 Situación de mercado

En los últimos 6 ó 7 años, el contenido de azufre de la gasolina y del gasóleo de automoción en la Unión Europea (UE) se ha reducido desde aproximadamente 500 ppm (partes por millón), hasta un valor máximo de 50 ppm.

La legislación europea exige reducir el nivel máximo legal de azufre a 10 ppm antes del año 2009. Además, esta normativa europea también reduce el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (o, en inglés, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - PAH) limitándolos al 8% m/m (porcentaje en masa).

En la actualidad los combustibles sin azufre (concentración en azufre inferior a 10 ppm) empiezan a comercializarse en las estaciones de servicio.

2 Modificaciones en vehículos convencionales

En los últimos años los vehículos de gasolina y diésel han reducido notablemente las emisiones que afectan negativamente a la calidad del aire y, por lo tanto, al medio ambiente y a la salud humana. También ha habido mejoras, aunque menos significativas, en cuanto al consumo de combustible y, por consiguiente, en cuanto a las emisiones de CO₂.

Así, cada litro de gasolina consumido en un coche emite por el tubo de escape aproximadamente 2,35 kilogramos de CO₂, mientras que cada litro de gasóleo emite a la atmósfera 2,64 kilogramos de CO₂ (cerca de un 15% más que la gasolina). Sin embargo, al ser más eficiente el motor Diesel, esta diferencia se compensa con la distancia media que permite recorrer por litro de carburante consumido. De este modo, mientras que un litro de gasolina permite recorrer un promedio de 13 kilómetros (lo que equivale a unas emisiones de unos 177 gramos de CO₂ por cada kilómetro recorrido), un litro de diésel permite recorrer una distancia promedio superior, de 16 kilómetros (lo que equivale a unas emisiones de 165 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido) [10].

Por otra parte, es importante señalar que gran parte de los avances que se tratan en esta sección, como la reducción del tamaño y peso de los vehículos, los catalizadores o las mejoras en los equipos eléctricos y de aire acondicionado, son también de aplicación a los vehículos de combustibles alternativos y a los de tecnología híbrida que se describen más adelante.

2.1 Disminución y reducción del peso de los vehículos

Existen factores culturales arraigados en la sociedad que asocian los coches a símbolos de estatus, reflejo de la personalidad, etc. Esto hace que muchas personas sigan escogiendo coches mucho más grandes y con mucha más potencia de lo que sería necesario. La consecuencia es que también se produce un mayor consumo de combustible.

Actualmente, con el fin de reducir el peso de los vehículos y el consumo de combustible, algunos fabricantes emplean materiales como el aluminio o las aleaciones ligeras. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el ahorro de peso que se puede conseguir con materiales más ligeros se compensa con creces con el peso añadido de equipamientos adicionales, fundamentalmente de seguridad, como airbags, barras laterales de seguridad y otros. Además, los equipos eléctricos adicionales también incrementan el consumo de combustible, ya que el alternador que recarga la batería del vehículo recibe la energía mecánica directamente del motor del coche. Así, por ejemplo, el aire acondicionado también supone un incremento en el consumo de carburante debido a la demanda suplementaria de energía, tanto mecánica como eléctrica, para su funcionamiento [11].

Por otro parte, en el campo de los vehículos industriales la reducción del consumo de combustible ha sido siempre una prioridad.

De este modo, se esperan avances en este sentido derivados de aquellas mejoras tecnológicas que permitan reducir su peso.

2.1.1 Ventajas

- Al disminuir el peso del vehículo disminuye su consumo y, por tanto, también sus emisiones de CO₂.
- Se trata de acciones generalmente sencillas que no requieren modificaciones importantes en los vehículos.

2.1.2 Desventajas

- Inclusión en los vehículos de un número cada vez mayor de sistemas de seguridad y confort que añaden peso al conjunto.

- Coste elevado de determinados materiales utilizados para la reducción del peso de los vehículos, como, por ejemplo, el aluminio o las aleaciones ligeras.

2.1.3 Situación de mercado

Actualmente todos los fabricantes intentan reducir el peso de sus vehículos en la medida de lo posible utilizando materiales más ligeros, como el aluminio, las aleaciones ligeras o los materiales plásticos. Por otro lado, la continua introducción de nuevos sistemas de seguridad y de confort, y la demanda creciente de grandes y pesados tipos de vehículos como los todo-terreno apuntan en dirección totalmente opuesta.

2.2 Incremento de la eficiencia del motor

Los vehículos con combustibles convencionales (gasolina y gasóleo) también se han beneficiado del incremento de la eficiencia de los motores en los últimos años. Estos avances se han centrado especialmente en los motores diésel y ello, junto con el menor precio del gasóleo frente a las gasolinas, hasta la fecha, ha contribuido a la creciente popularidad de los coches con motor diésel en la mayor parte de Europa en los últimos diez años.

Desde principios de los años 1990, casi todos los motores diésel son **sobrealimentados**, lo que aumenta su eficiencia y su potencia. Además, se han desarrollado y popularizado otras tecnologías para aumentar la eficiencia del motor, como el sistema de **inyección directa**.

La **inyección directa** de combustible (o, en inglés, **Direct Injection - DI**), presente inicialmente en los motores de camiones, se ha popularizado en los vehículos turismo diésel desde los últimos años de la década pasada. Con la inyección directa, el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión, en vez de en una pre-cámara de combustión. Los motores de inyección directa son más eficientes que los de inyección indirecta y, por lo tanto, consumen menos combustible y reducen las emisiones de CO₂. Sin embargo, como desventajas, los motores de inyección directa, emiten más partículas y son normalmente más ruidosos que los motores de pre-cámara. También existen motores de gasolina con inyección directa, aunque su número es todavía relativamente escaso.

En la **inyección directa por conducto común** (o, en inglés, **Common Rail**) existe un único conducto de alimentación de combustible común para todos los cilindros. El common rail actúa a modo de pequeño depósito de combustible en el que éste se almacena a muy alta presión. Por otro lado, en la **inyección directa con inyector unitario**, la alta presión se genera en cada inyector en el mismo instante de la inyección del combustible.

En ambos casos, la alta presión con la que se inyecta el combustible en la cámara de combustión facilita su atomización, consiguiendo una combustión más eficiente y reduciendo las emisiones de partículas. Además, las válvulas de paso electromagnéticas de cada uno de los inyectores (conocidas en términos técnicos como “solenoides”) controlan con suma precisión la cantidad y el momento justo de la inyección de combustible, lo que también contribuye a mejorar la eficiencia general del motor.

2.2.1 Ventajas

- El aumento en la eficiencia del motor se traduce en un menor consumo y en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, todo ello permite construir motores más pequeños y ligeros, lo que también contribuye a disminuir el peso total del vehículo y, por lo tanto, su consumo.
- Diversidad de tecnologías disponibles para aumentar la eficiencia del motor.

2.2.2 Desventajas

- Mayores sollicitaciones mecánicas en los motores.

2.2.3 Situación de mercado

La mayoría de estas tecnologías se encuentran ya ampliamente extendidas entre los vehículos fabricados en la actualidad. La sobrealimentación y la inyección directa se han introducido totalmente en los vehículos diésel,

dotándoles gracias a ello de una mayor eficiencia. Además, muchos fabricantes ya están utilizando estas tecnologías en motores de gasolina.

2.3 Catalizadores

Uno de los mayores avances en la reducción de las emisiones de los vehículos ha sido la introducción de los **catalizadores**, cuya obligatoriedad entró en vigor en 1992 para los motores de gasolina. El catalizador produce modificaciones químicas en los gases de escape de los automóviles antes de liberarlos finalmente a la atmósfera. Estas modificaciones tienen como fin reducir la proporción de determinados gases nocivos formados en el proceso de combustión.

Los **catalizadores** van instalados a la salida del motor y justo antes del tubo de escape. Exteriormente, el catalizador tiene un aspecto similar al de un recipiente, en general de acero inoxidable. Está formado por un embudo de entrada, un embudo de salida y un monolito. Los monolitos son estructuras cerámicas en forma de colmena (con numerosas celdillas de forma hexagonal) cuya superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene metales nobles, normalmente platino, paladio o rodio [5]. Estos metales actúan como elementos activos “catalizadores” de ciertas reacciones químicas que ayudan a reducir las emisiones contaminantes; es decir, intervienen en alguno de los pasos intermedios de la transformación química, pero sin llegar a formar parte de los productos finales, por lo que no se desgastan. Con el diseño en forma de colmena se consigue una relación muy alta entre la superficie de contacto con los gases de escape y el volumen del catalizador, favoreciendo con ello la transformación química de dichos gases.

Los motores de gasolina o de encendido provocado disponen de “catalizadores de tres vías”, y se llaman así porque reducen las emisiones de tres contaminantes: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Un catalizador de 3 vías consta en realidad de 2 partes diferenciadas:

- Un catalizador de reducción que reduce el NO nocivo transformándolo únicamente en N₂ y O₂, según la siguiente reacción química: $2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$.
- Un catalizador de oxidación que oxida el CO y los hidrocarburos perjudiciales, transformándolos en CO₂ y H₂O.

Para que el catalizador de reducción funcione, es necesario que el dosado (la relación entre la masa de combustible y la masa de comburente, o aire, que se introduce en los cilindros) sea muy próximo al estequiométrico (mezcla para la cual todo el combustible se quema sin que falte ni sobre comburente-aire). Para asegurarse de que se den estas condiciones de funcionamiento del motor, se coloca un sensor de oxígeno antes del catalizador, denominado “sonda lambda”, que está conectado a una unidad de control electrónico que regula la cantidad de combustible que se introduce en los cilindros en función de la cantidad de oxígeno que la sonda lambda detecta en los gases de escape a la salida del motor.

Los motores Diesel, en cambio, están diseñados para trabajar siempre con exceso de aire; es decir, con un dosado inferior al estequiométrico, lo que imposibilita el funcionamiento de los catalizadores de reducción. Por tanto, estos motores sólo llevan catalizadores de oxidación. Los catalizadores de oxidación diésel (o, en inglés, Diesel Oxidation Catalyzers - DOC) no funcionan igual ni tienen las mismas características que los catalizadores de los motores de gasolina, ya que no reducen las emisiones de NO_x. Sin embargo, sí que son muy eficaces a la hora de reducir el monóxido de carbono, los hidrocarburos y determinadas partículas presentes en los gases de escape.

2.3.1 Balance de emisiones

En las siguientes gráficas se puede ver la reducción de cada uno de los tres contaminantes principales citados que se consigue gracias a los catalizadores de tres vías, y en función del dosado relativo del motor:

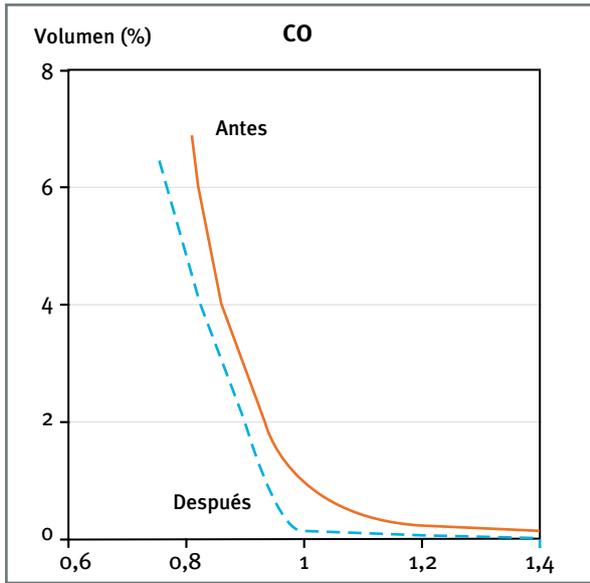


Figura 9. Emisiones de monóxido de carbono (CO) antes y después del catalizador en función del dosado relativo (en porcentaje de volumen)

Fuente: www.as-sl.com [11]

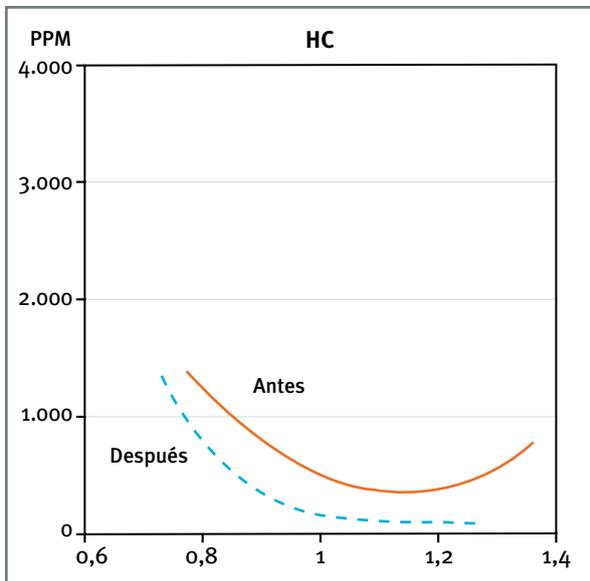


Figura 10. Emisiones de hidrocarburos (HC) en partes por millón (ppm) antes y después del catalizador en función del dosado

Fuente: www.as-sl.com [11]

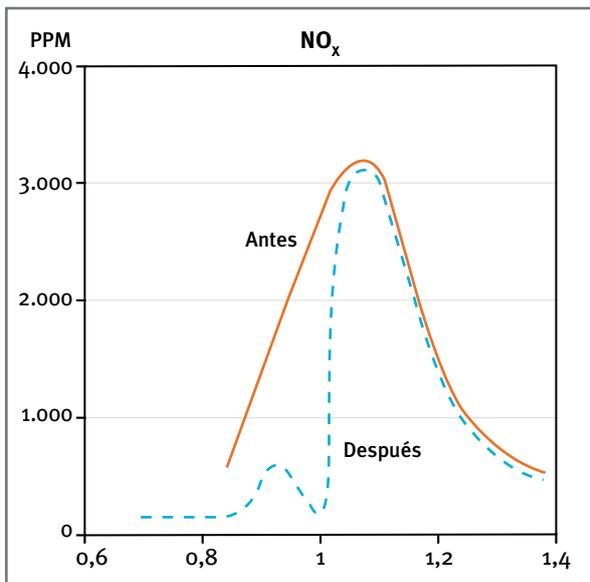


Figura 11. Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) en partes por millón (ppm) antes y después del catalizador en función del dosado

www.as-sl.com [11]

A la vista de las gráficas anteriores, se aprecia cómo el dosado óptimo para la utilización del catalizador de tres vías desde el punto de vista de la reducción de las emisiones es el dosado estequiométrico, es decir, el dosado relativo igual a uno.

2.3.2 Ventajas

- Reducción de las principales emisiones contaminantes: HC, CO y NO_x .
- Tecnología ampliamente desarrollada.
- Bajo coste gracias a su implantación a gran escala.

2.3.3 Desventajas

- Necesidad de utilizar dosado estequiométrico en el motor para que el catalizador funcione correctamente. Esto imposibilita el uso de catalizadores de tres vías en los motores diésel, ya que estos motores siempre funcionan con exceso de aire.
- El catalizador puede presentar un mal funcionamiento en recorridos cortos si no llega a alcanzar una temperatura mínima.

2.3.4 Situación de mercado

Los catalizadores son obligatorios en todos los vehículos de gasolina desde 1992, por lo que su utilización está totalmente extendida.

2.4 Recirculación de gases de escape (EGR)

La **recirculación de los gases de escape** (o, en inglés, Exhaust Gas Recirculation - EGR) es una técnica con la que se consigue reducir significativamente las emisiones de NO_x del vehículo. Para entender su funcionamiento, es importante señalar que el NO_x se forma cuando las altísimas temperaturas de la llama en la cámara de combustión del motor hacen que el oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera se combinen entre sí. Así, a mayor temperatura, mayor es la cantidad de NO_x que se forma.

En los motores con recirculación de gases de escape (EGR) se desvía parte de estos de vuelta al conducto de admisión del motor, consiguiendo con ello una reducción de las temperaturas máximas durante la combustión en el interior de los cilindros del motor. Esta reducción de la temperatura máxima permite disminuir la formación de NO_x .

La recirculación de los gases de escape (EGR) incrementa ligeramente el consumo de combustible, por lo que los fabricantes son reacios a instalar estos sistemas en vehículos industriales. Sin embargo, algunos vehículos industriales podrían terminar incorporando sistemas de recirculación de gases de escape (EGR) con el objetivo de cumplir la norma “Euro 4”, requisitos que se han detallado en las figuras anteriores.

La recirculación de gases de escape (EGR) es una técnica cuyo único objetivo es reducir la emisión de NO_x a cargas parciales del motor. Ello se consigue, como se ha indicado, al reducirse la temperatura de la combustión [5]. Pero la recirculación de gases de escape no causa ningún efecto sobre otras emisiones contaminantes. Por ello, para reducir, por ejemplo, las emisiones de partículas (o, en inglés, Particulate Matter – PM) normalmente hay que aplicar otras técnicas como la inyección de combustible a alta presión, los compresores turbo de paso variable o los filtros de escape.

2.4.1 Balance de emisiones

La técnica de recirculación de gases de escape puede reducir las emisiones de NO_x hasta en un 70% [12]. La siguiente figura muestra la reducción típica de NO_x que se obtiene en un rango de velocidades medias y para un motor Diesel de camión equipado con turboalimentación e intercooler (reducción en función de la tasa de recirculación de gases de escape aplicada):

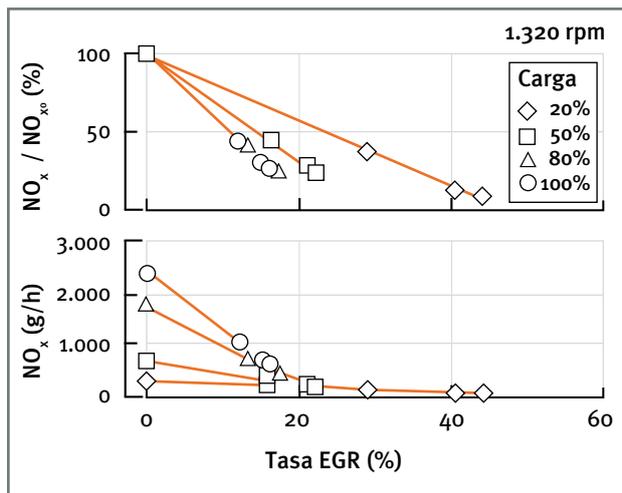


Figura 12. Relación entre la tasa de recirculación de gases de escape en porcentaje (%) y las emisiones de NO_x respecto a las emisiones sin recirculación (en gramos por hora, g/h, y en porcentaje, %)

Fuente: Mitsubishi-motors [12]

Como puede verse, para cualquier condición de carga las emisiones de NO_x decrecen a medida que aumenta la recirculación de gases de escape. Por otro lado, la reducción de NO_x para una misma tasa de recirculación de gases de escape es mayor cuanto mayor es la carga del motor.

2.4.2 Ventajas

- Reducción importante de los óxidos de nitrógeno producidos.
- Bajo coste gracias a su implantación a gran escala.

2.4.3 Desventajas

- Ligero incremento del consumo de combustible.
- Ligero incremento de las partículas en motores diésel.

2.4.4 Situación de mercado

La recirculación de gases de escape (EGR) empezó a utilizarse en los coches de gasolina en EE.UU. en los años 70, antes de que la instalación de los catalizadores de tres vías se configurara como una mejor alternativa para la reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) en estos motores. En Europa, la recirculación de gases de escape (EGR) se ha instalado en casi todos los coches y furgonetas diésel desde que la normativa “Euro 2” entrara en vigor en 1996. También se ha introducido la recirculación de gases de escape en Europa en algunos vehículos de gasolina de elevadas prestaciones.

2.5 Reducción catalítica selectiva (SCR)

La **reducción catalítica selectiva** (o, en inglés, Selective Catalytic Reduction - SCR) es una tecnología más eficiente en la reducción de las emisiones de NO_x en los motores diésel que la recirculación de gases de escape (EGR). La reducción catalítica selectiva (SCR) consiste en un catalizador avanzado que elimina a posteriori el NO_x de los gases de escape utilizando para ello un catalizador metálico y un reactivo químico. Así, la SCR actúa de modo distinto a la recirculación de gases de escape (EGR): ésta reduce a priori la formación de NO_x mientras que la reducción catalítica selectiva los elimina a posteriori.

En primer lugar, en la reducción catalítica selectiva se inyecta urea en los gases de escape aguas arriba del catalizador. La urea se transforma, primeramente, en amoníaco (NH₃), el cual reacciona a continuación con el NO y el NO₂ de los gases de escape para dar como productos finales N₂ y H₂O. La reacción química en el caso del NO es la siguiente: $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$.

En este sistema, la emisión de partículas sin quemar (PM) se controla en la cámara de combustión, mientras que la emisión de NO_x se controla en el tubo de escape, usando como agente reductor un compuesto llamado AdBlue. Este compuesto está formado básicamente por un 32,5% de urea de máxima calidad. El AdBlue es inyectado directamente en los gases y, mediante la citada reacción química en el catalizador, convirtiendo los NO_x en nitrógeno y vapor de agua, productos de reacción inocuos en ambos casos.

El AdBlue se transportaría en el vehículo en un depósito separado y se recargaría en las estaciones de repostaje (ya sean éstas públicas o particulares al servicio de flotas) que ofrecieran dicho servicio.

2.5.1 Balance de emisiones

La reacción de reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) es efectiva solamente dentro de un rango de temperaturas dado, pudiendo alcanzarse reducciones de hasta el 90% en algunos casos [8]:

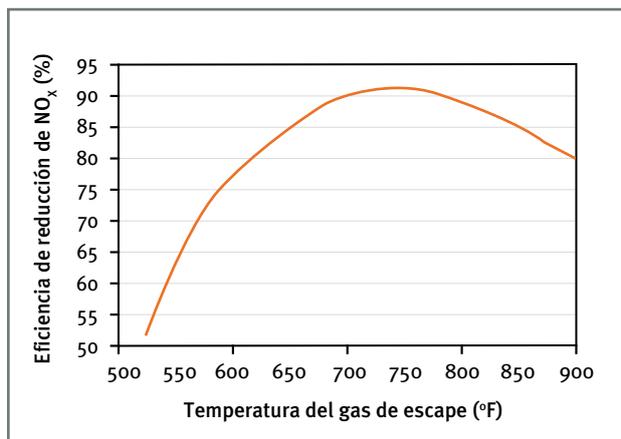


Figura 13. Eficiencia en la reducción de NO_x (%) en función de la temperatura del gas de escape (en la gráfica la temperatura se expresa en grados Fahrenheit, °F)

Fuente: Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU. [13]

2.5.2 Ventajas

- Alta eficiencia en la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x).
- No requiere modificaciones en el proceso de combustión.

2.5.3 Desventajas

- Es necesario el repostaje periódico del agente reductor.
- Es más caro que el sistema de recirculación de gases de escape (EGR).

2.5.4 Situación de mercado

El proceso de reducción catalítica selectiva (SCR) es hoy en día una tecnología plenamente desarrollada, y ampliamente utilizada en diversos sectores industriales y energéticos. La tecnología SCR permite eliminar eficaz, selectiva y económicamente los NO_x presentes en las emisiones industriales tanto de centrales térmicas como de otras fuentes de emisiones fijas.

La reducción catalítica selectiva (SCR) es ya una tecnología comercial aplicada también a grandes motores Diesel estacionarios (en los cuales las limitaciones de tamaño y peso son menos importantes), y ya se ha comenzado a instalar en algunos vehículos industriales. El uso de la reducción catalítica selectiva (SCR) se generalizará en el futuro en el sector del automóvil ya que ayudará a cumplir con los rigurosos límites de emisiones de NO_x de los vehículos industriales diésel que se establecen en las normas "Euro 4" y "Euro 5".

2.6 Filtros de partículas diésel (DPF)

Los **filtros de partículas diésel** (o, en inglés, Diesel Particulate Filter - DPF) eliminan las partículas de los gases de escape mediante un sistema de filtrado, llegando a capturar hasta el 90% de las mismas, las cuales, posteriormente son eliminadas mediante regeneración térmica para evitar que el filtro se sature y deje de funcionar. El término “regeneración térmica” equivale, hasta cierto punto, a decir que las partículas se terminan de quemar completamente en el filtro hasta convertirse únicamente en CO₂.

Los filtros están compuestos por un catalizador de oxidación y unos tubos con rejillas metálicas que atrapan las partículas en suspensión de los gases de escape.

Las temperaturas normales de los gases de escape de los motores diésel no son lo suficientemente altas como para quemar completamente el hollín, pero los filtros de partículas diésel (DPF) solucionan este problema de dos maneras:

- Los filtros de partículas diésel (DPF) “**pasivos**” utilizan catalizadores de oxidación para conseguir disminuir la temperatura a la que se oxida (se quema) el hollín. Al reducirse ésta hasta la temperatura normal de los gases de escape se consigue que las partículas terminen de quemarse antes de salir del tubo de escape.
- Los filtros de partículas diésel (DPF) “**activos**” incrementan periódicamente la temperatura de los gases hasta que se alcanza el valor suficiente para quemar completamente las partículas retenidas en los filtros. Los métodos más usuales para subir la temperatura en un filtro activo son: bien quemar una cantidad adicional de gasóleo en el propio catalizador, o bien utilizar calentadores eléctricos.

2.6.1 Ventajas

- Reducción de las emisiones de partículas hasta en un 90% [8].

2.6.2 Desventajas

- Encarecimiento de los primeros vehículos que cuenten con esta tecnología. Los costes de la tecnología disminuirán a medida que aumente su implantación.
- No consiguen eliminar las partículas más pequeñas.

2.6.3 Situación de mercado

Los filtros de partículas diésel (DPF), por ahora, sólo están disponibles en determinados vehículos nuevos, aunque cada vez se está extendiendo más su instalación. Por otro lado, la instalación de los filtros de partículas diésel (DPF) en los vehículos ya existentes es un proceso muy complicado y, por ello, no constituye una práctica habitual.

En cualquier caso, algunos fabricantes prefieren otras soluciones anticontaminación, debido a que los filtros de partículas diésel (DPF) no solucionan el problema de las partículas más pequeñas, que son precisamente las más dañinas para la salud.

2.7 Sistema eléctrico de 42 V

La industria del automóvil se enfrenta a constantes desafíos con el objetivo de conseguir vehículos con mayor eficiencia, más seguros y más cómodos. La respuesta a dichos desafíos a menudo conlleva un incremento del número de componentes eléctricos y electrónicos a bordo y, como consecuencia, a un mayor consumo de energía eléctrica. Actualmente los fabricantes de automóviles están desarrollando proyectos para sustituir el sistema eléctrico actual de catorce voltios (14 V), que ha sido suficiente para responder a las demandas de potencia eléctrica a lo largo de los últimos cuarenta años, por otro a cuarenta y dos voltios (42 V) que sea capaz de satisfacer las nuevas y mayores demandas.

El consumo de electricidad en los automóviles se ha incrementado de forma drástica en los últimos 10 ó 15 años. Hace cuarenta años, los sistemas eléctricos de los automóviles pasaron de estar alimentados a 6 V al actual sistema estándar de 12 V alimentado por un alternador de 14 V (el voltaje real que suministra el alternador oscila entre 14,2 V y 14,8 V). Ahora, se propone el cambio hacia sistemas de 42 V: sistemas que usan una batería de 36 V y un alternador con una salida de 42 V. Este nuevo sistema se denomina técnicamente *42VPowernet*. Esta propuesta fue presentada por un consorcio de fabricantes de vehículos y suministradores de componentes bajo los auspicios del Massachusetts Institute of Technology (MIT) en EE.UU.

El aumento de la tensión reduce las pérdidas de los nuevos sistemas eléctricos, que son grandes consumidores de energía, y permite satisfacer la demanda de mayores prestaciones. Con una instalación a 42 V, y manteniéndose la misma intensidad de corriente, o lo que es lo mismo sufriendo las mismas pérdidas eléctricas en los conductores, se puede transmitir una potencia tres veces mayor que la que se transmite a 14 V. Pero el principal interés de reducir las citadas pérdidas radica en el ahorro de combustible que ello puede suponer. La potencia eléctrica de un automóvil se almacena en la batería, y el alternador se encarga de mantener ésta cargada cuando el motor esté en marcha. Es decir, toda la energía eléctrica procede de la combustión del carburante en los cilindros, así que una reducción de la energía eléctrica necesaria significa mejorar el consumo y, por consiguiente, reducir las emisiones de CO₂.

La implantación de esta nueva tecnología requiere la sustitución de todos los componentes actuales, preparados para trabajar a 14 V, por otros diseñados para funcionar a 42 V. No todos los sistemas actuales son capaces de funcionar a tensiones más altas; en otros casos sí son capaces de funcionar a 42 V, pero esto implica una disminución de su vida útil. Éste es el caso de las lámparas de filamento, de los circuitos integrados y de algunos pequeños motores eléctricos.

2.7.1 Ventajas

- El sistema de 42 V permite abastecer un mayor número de elementos eléctricos.
- Reducen las pérdidas eléctricas y, por tanto, también el consumo de combustible y las emisiones de CO₂.

2.7.2 Desventajas

Dificultades técnicas y económicas para dar el salto desde los actuales sistemas de 14 V hasta los nuevos sistemas de 42 V. Una solución sería utilizar temporalmente sistemas que sigan suministrando potencia eléctrica a 14 V a los componentes que no puedan funcionar con tensiones mayores hasta que se consiga la adaptación total del vehículo al sistema de 42 V.

2.7.3 Situación de mercado

Durante el desarrollo del proyecto *42VPowernet* han surgido más dificultades, tanto técnicas como económicas, de las previstas en un principio. Como resultado de ello los fabricantes han retrasado sus planes para la introducción de esta tecnología.

2.8 Combustión de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI)

El modo de **combustión de encendido por compresión de carga homogénea** (conocido por las siglas HCCI, procedente de su denominación inglesa “Homogeneous Charge Compression Ignition”) abarca diferentes tipos de combustión en los motores diésel. La característica común de este modo de combustión es que ésta se produce a partir de una mezcla aire-combustible lo más homogénea posible antes de iniciarse el autoencendido. Para conseguir esto, se comienza a inyectar el combustible mucho antes del punto muerto superior (PMS), de modo que tenga tiempo suficiente para mezclarse con el aire antes de que comience la combustión. El punto muerto superior está situado al final de la carrera del pistón, dentro del cilindro, y se corresponde con el momento en el cual el volumen es mínimo en el interior del cilindro. En el encendido por compresión de carga homogénea, el sistema de inyección pasa a tener una importancia secundaria, y son mucho más importantes las condiciones físicas con las que se encuentra

el combustible en el interior del cilindro durante la inyección y hasta el momento del autoencendido. En particular son muy importantes, entre otras, las siguientes condiciones físico-químicas en el interior de los cilindros: la temperatura, la densidad del aire y la concentración de oxígeno.

2.8.1 Ventajas

- Mejor rendimiento indicado. El proceso de combustión produce una liberación de energía próxima a la de volumen constante, con el consiguiente aumento del rendimiento teórico del ciclo de la combustión.
- Menos emisiones de NO_x y de partículas. La principal ventaja de los modos de combustión HCCI o similares radica en la reducción simultánea que se puede conseguir en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas [14].

2.8.2 Inconvenientes

- Presiones de combustión elevadas. La combustión es más rápida que en un motor Diesel convencional, con el consiguiente aumento de las presiones máximas en el cilindro e incremento del ruido producido durante la combustión.
- Funcionamiento sólo a baja carga. Debido a la necesidad de conseguir una mezcla muy homogénea antes del autoencendido, resulta muy difícil hacer funcionar el motor a cargas elevadas o a altas velocidades de giro, quedando restringido, por tanto, este modo de operación o funcionamiento a bajas cargas.
- Poco control sobre la combustión. El proceso de autoencendido del combustible ocurre espontáneamente, lo que hace que sea muy difícil mantener la combustión bajo control. Cualquier pequeña desviación de las variables de influencia puede provocar un proceso de liberación de calor inestable, con consecuencias graves para la integridad del motor. En particular, la formulación del combustible tiene una influencia muy importante sobre el proceso de autoencendido.
- Elevadas emisiones de CO y HC. La combustión en premezcla, con una cierta heterogeneidad espacial, y las bajas temperaturas son responsables de la emisión de hidrocarburos (HC) [14] y de monóxido de carbono (CO).

2.8.3 Situación de mercado

Se han desarrollado varios motores experimentales con combustión HCCI, pero el ejemplo más tangible lo encontramos curiosamente en el sector de las motocicletas, donde en 1997 una motocicleta impulsada por este tipo de motor (Honda EXP-2) finalizó el Rally Granada-Dakar en quinta posición absoluta con un consumo muy reducido y con bajas emisiones contaminantes. Se trata de un motor de dos tiempos, con 400 cm³ de cilindrada y monocilíndrico.

Con este motor se abrió la posibilidad de retomar el desarrollo de motores de dos tiempos, más adecuados para las motocicletas que los de cuatro tiempos, que parecían condenados a desaparecer. Así, en 1998 se lanzó al mercado el scooter Pantheon de 125 cm³ con este tipo de combustión.

Además, se han desarrollado otros motores con este modo de combustión como:

- La Universidad de Berkeley, en EE.UU., conjuntamente con el también estadounidense Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, ha desarrollado un motor híbrido (térmico/eléctrico) a partir de un motor con encendido por compresión de carga homogénea (HCCI). En esta ocasión la configuración escogida fue la de un motor monocilíndrico que funcionaba con gas natural, con butano y con otros combustibles. Este motor podía modificar su relación de compresión y disponía de un calentador del aire de admisión de 6 kW de potencia. Las emisiones de NO_x y de partículas eran extremadamente reducidas y, aún con ello, el motor ofrecía una potencia aceptable. La Universidad de Berkeley también ha modificado un motor 1.9 TDI de VW (ciclo Diesel, inyección directa, 4 cilindros y 8 válvulas) y ha conseguido que funcionara correctamente con dos combustibles distintos: propano y metano. El aire de admisión se calentaba también en esta ocasión con un calefactor eléctrico de 18 kW de potencia.

- El Southwest Research Institute también ha desarrollado un motor monocilíndrico de gasolina con encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) que reduce, de modo notable, la emisión de NO_x e hidrocarburos (HC) a cargas medias en comparación con el motor convencional de inyección directa de gasolina.
- La Universidad de Lund (Suecia), ha trabajado sobre un motor Volvo turbodiésel modificado, el cual ha funcionado con gas natural, gasolina, gasóleo, etc. La investigación sueca ha incluido experimentos con recirculación de gases de escape y sin ella, con relación de compresión variable y con sobrealimentación.
- La Universidad Politécnica de Madrid también ha investigado este tipo de combustión tomando como base un motor Derbi de 50 cm^3 refrigerado por aire, al que se le ha acoplado una válvula de escape.

Finalmente señalar que varios fabricantes de automóviles, entre ellos PSA, Daimler-Chrysler o Ford, están ya investigando las posibilidades que ofrecen comercialmente los motores con encendido por compresión de carga homogénea (HCCI).

Retos tecnológicos

Desarrollo de herramientas de estudio de los fenómenos básicos de la combustión

En el encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) el proceso de formación de la mezcla y el autoencendido son muy sensibles a la variación temporal y local de las variables físico-químicas dentro del cilindro. Para la optimización del diseño del motor es preciso conocer en detalle la evolución del proceso de inyección, el proceso de formación de la mezcla y las reacciones químicas que provocan el autoencendido.

Los métodos de estudio actuales, tanto experimentales como de cálculo, necesitan ser mejorados para cubrir todos los fenómenos relevantes, y para ofrecer aquella información que permita diagnosticar y predecir el desarrollo de esos fenómenos.

Control preciso de los parámetros de operación del motor

Para conseguir un proceso de combustión estable se debe controlar, con una precisión mayor que la habitual en los motores convencionales, las variables que influyen en el proceso de mezcla y de autoencendido: la presión de sobrealimentación, la temperatura de admisión, el patrón de inyección, la recirculación de gases de escape, etc.

Desarrollo y aplicación de equipos de diagnóstico en tiempo real

Dada la alta probabilidad de dispersión del funcionamiento del motor de un ciclo a otro al cambiar las condiciones dentro del cilindro, es necesario disponer de un sistema de diagnóstico del proceso de combustión en tiempo real que permita corregir cualquier funcionamiento indeseado.

Esto implica aplicar o desarrollar nuevos sensores y equipos de detección de variables clave como la presión en el interior de los cilindros, la composición de los gases de escape, etc.

Desarrollo de sistemas flexibles de inyección y combustión

Puesto que el modo de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) funciona sólo a bajas cargas, es preciso que el motor siga trabajando en modo convencional a altas cargas. Cada uno de estos modos de funcionamiento, a baja y a plena carga, requiere en principio características de inyección de combustible muy diferentes y, a veces, incompatibles. La solución es desarrollar equipos de inyección más flexibles que los habituales, o bien duplicar en un mismo motor el número de inyectores: un grupo de inyectores para funcionamiento a baja carga y otro para operación a carga plena.

Perspectivas futuras

La principal ventaja del modo de combustión de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) es la reducción simultánea de las emisiones de NO_x y de partículas. En caso de que se consiguiera que ambos tipos de emisiones quedaran por debajo de los límites impuestos por las normativas mediambientales, se podría llegar a prescindir

de algunos de los sistemas de post-tratamiento que son habituales en la actualidad en el sistema de escape de los motores diésel. Así, por ejemplo, se podría pensar en prescindir de los filtros o trampas de partículas, o de los catalizadores de NO_x . Aunque la sustitución de sistemas completos de post-tratamiento de los gases de escape esté lejos de poder conseguirse en condiciones reales, la citada disminución de emisiones reduciría en cualquier caso las exigencias del sistema de post-tratamiento, alargando, por ejemplo, los períodos de regeneración en el caso de los filtros de partículas activos.

Como se ha indicado, el modo de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) está restringido a niveles de funcionamiento a baja carga, por lo que en la práctica sería preciso combinar este modo con el funcionamiento convencional a cargas altas. Ello requiere sistemas flexibles de sobrealimentación, distribución, inyección, recirculación de gases de escape, etc.

2.9 Combustión de autoencendido controlado (CAI)

El modo de **combustión de autoencendido controlado** (frecuentemente conocido por la expresión inglesa Controlled Auto Ignition - CAI) supone un nuevo modo de funcionamiento de los motores de encendido provocado. Este modo de combustión es el resultado de combinar el proceso de formación de la mezcla típico de los motores de encendido provocado, con el proceso de autoencendido de los motores diésel. Para conseguir el autoencendido del combustible propio de los motores de encendido provocado es preciso aumentar la relación de compresión o la temperatura de admisión.

El interés de este tipo de combustión está en las bajas emisiones contaminantes y en el alto rendimiento, sobre todo cuando el motor trabaja a baja carga. Ello se debe a que con este modo de combustión es posible prescindir del tradicional control del régimen de funcionamiento del motor mediante estrangulación del aire de admisión. Dicho estrangulamiento supone una pérdida de rendimiento del motor.

2.9.1 Ventajas

- Mejor rendimiento. El proceso de combustión produce una liberación de energía próxima a la que se produciría a volumen constante, con el consiguiente aumento del rendimiento teórico del ciclo de combustión. A bajas cargas se puede suprimir la válvula de estrangulación en el conducto de admisión, con el consiguiente incremento del rendimiento del motor.
- Menos emisiones de NO_x . La principal ventaja de este sistema radica en la reducción que se puede conseguir en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x).

2.9.2 Inconvenientes

- Presiones de combustión elevadas. La combustión es más rápida que en un motor de encendido provocado convencional, con el consiguiente aumento de las presiones máximas en el cilindro y el subsiguiente incremento de la producción de ruido de combustión.
- Funcionamiento sólo a baja carga. Debido a la rápida combustión es muy difícil que el motor funcione adecuadamente a cargas elevadas, quedando restringido el modo de funcionamiento únicamente a bajas cargas.
- Escaso control sobre el proceso de combustión. El proceso de autoencendido del combustible ocurre sin influencia directa de los parámetros habituales de control de motor, de modo que es muy difícil mantener dicho proceso bajo control. Cualquier pequeña desviación de las variables de influencia puede provocar un proceso de liberación de calor inestable, con consecuencias graves para la integridad del motor.

2.9.3 Situación de mercado

Retos tecnológicos

Desarrollo de herramientas de estudio de los fenómenos básicos

El proceso de autoencendido controlado (CAI) es muy sensible a la variación temporal y local de las variables físico-químicas dentro del cilindro. Para la optimización del diseño del motor es preciso conocer en detalle la evolución del proceso de inyección, el proceso de la formación de la mezcla y las reacciones químicas que provocan al autoencendido.

Los métodos de estudio actuales, tanto experimentales como de cálculo, necesitan ser mejorados para cubrir todos los fenómenos relevantes, y para ofrecer aquella información que permita diagnosticar y predecir el desarrollo de dichos fenómenos.

Control preciso de los parámetros de operación del motor

Para conseguir un proceso de combustión estable se debe controlar con una precisión mayor que la habitual las variables que tienen influencia sobre el proceso de mezcla y de autoencendido: la presión de sobrealimentación, la temperatura de admisión, el patrón de inyección, la recirculación de los gases de escape, etc.

Desarrollo y aplicación de equipos de diagnóstico en tiempo real

Dada la alta probabilidad de dispersión del funcionamiento del motor de un ciclo a otro al cambiar las condiciones dentro del cilindro, es necesario disponer de un sistema de diagnóstico del proceso de combustión en tiempo real, que permita corregir cualquier funcionamiento indeseado.

Esto implica aplicar o desarrollar nuevos sensores y equipos de detección de variables clave como la presión en el interior del cilindro, la composición de los gases de escape, etc.

Perspectivas actuales y futuras

Actualmente, el modo de combustión de autoencendido controlado (CAI) está limitado a un margen estrecho de todo el campo de funcionamiento posible de un motor (únicamente a baja carga) y resulta difícil de adaptar a un rango amplio de régimen de giro. Por tanto, se trata de un modo de combustión más adecuado para motores estacionarios que para motores de automoción.

En teoría, con un diseño suficientemente sofisticado del motor es posible combinar en el mismo motor el funcionamiento en modo de autoencendido controlado (CAI) y el funcionamiento en modo convencional. Sin embargo, para ello sería necesario disponer de relaciones de compresión variables, de un sistema de distribución variable, de sobrealimentación flexible, etc.

2.10 Sistema de parada y arranque o “Stop and Start”

El **sistema de parada y arranque**, más conocido por su nombre en inglés “Stop and Start”, es un dispositivo que permite parar completamente el motor del vehículo cuando éste se detiene y mientras el freno esté pisado, por ejemplo en un semáforo o en un atasco, y ponerlo nuevamente en marcha con sólo levantar el pie del freno y pisar el acelerador.

El sistema se compone principalmente de dos elementos:

- Un alternador reversible de 2 kW de potencia que ejerce simultáneamente las funciones de motor de arranque y de alternador. Este nuevo alternador-motor de arranque reemplaza al alternador convencional.

- Una unidad electrónica que gestiona el alternador y proporciona un enlace con la unidad de control y con los sistemas de interfaz con el usuario.

El sistema se completa con una batería, una correa especial y un tensor de la correa.

2.10.1 Ventajas

- Reducción en alrededor de un 10% del consumo y de las emisiones de CO₂ en ciclo urbano. En ciclo combinado, los ahorros están cercanos al 6% [15].
- Ausencia de ruido cuando el vehículo está parado.

2.10.2 Desventajas

- Ligero encarecimiento del coste del vehículo.

2.10.3 Situación de mercado

Actualmente ya existen varios modelos disponibles con esta tecnología, como por ejemplo los modelos C2 y C3 de Citroën o algunos modelos de BMW, y es previsible que este número siga aumentando en los próximos años. Entre las empresas de componentes que desarrollan estas tecnologías se pueden destacar Bosch y Valeo.

Aunque la mayoría de los vehículos eléctricos híbridos también son capaces de realizar las funciones de detención y puesta en marcha automática del motor térmico, ello no debe confundirse con el sistema “Stop and Start”. Así mismo, los vehículos con tecnología “Stop and Start” no deberían incluirse como vehículos híbridos puesto que ni aprovechan la energía cinética durante las frenadas ni tampoco utilizan el motor eléctrico para apoyar al motor térmico e incrementar la potencia máxima disponible, aspectos éstos que caracterizan a los vehículos eléctricos híbridos.

2.11 Sistemas de control de la presión de los neumáticos

Circular con presión insuficiente en los neumáticos eleva en gran medida el riesgo de accidente, disminuye la vida útil de los neumáticos y aumenta el consumo de combustible. Los sistemas de control de la presión de los neumáticos, además de aumentar notablemente la seguridad de los vehículos, consigue un ahorro estimado de combustible del 1%, pudiéndose alcanzar ahorros del 4% en algunos casos. Los ahorros en el consumo de combustible se traducen inmediatamente en reducciones de las emisiones de CO₂. La eventual instalación obligatoria de sistemas de control de la presión de los neumáticos es una de las medidas contempladas actualmente por la Unión Europea para reducir las emisiones de CO₂.

Existen dos tipos principales de sistemas de control de la presión de los neumáticos: los sistemas de detección indirecta y los sistemas de detección directa. También existen sistemas alternativos.

- a) El sistema de detección **indirecta** de la pérdida de presión utiliza **sensores de velocidad** de giro de las ruedas. Su funcionamiento se basa en que los descensos de presión provocan una reducción del radio efectivo del neumático y, por tanto, una mayor velocidad de giro con respecto al resto de neumáticos. El sistema compara la velocidad relativa de cada rueda con respecto a la velocidad de rotación de las demás y avisa al conductor cuando detecta diferencias significativas.
- b) En el sistema de medición **directa** de la presión en los neumáticos, mediante un pequeño **sensor de presión (o manómetro) en cada rueda**, resulta posible detectar incluso pequeñas caídas de presión respecto a la recomendada por el fabricante del vehículo. La mayoría de estos sistemas disponen de sensores de temperatura y de presión acoplados a cada válvula de inflado. Los datos son transmitidos mediante antenas hasta un módulo de control, el cual analiza la información y la muestra al conductor a través de un testigo o de una pequeña pantalla digital situada en el salpicadero.

c) Sistemas alternativos. Como alternativa a los dispositivos de medición directa e indirecta existen los llamados “aircheckers” o **comprobadores de presión**. Se trata de tapones de válvulas de inflado que llevan ya incorporado un sensor de presión. La información es mostrada al conductor por la propia válvula, de forma visual y a través de un código de colores: cuando la presión disminuye por debajo de un cierto valor el tapón de la válvula de inflado muestra al conductor un color rojo de advertencia.

2.11.1 Ventajas

Sistema de detección indirecta:

- Muy fácil de implementar en los vehículos equipados con ABS, ya que la velocidad de rotación de las ruedas se puede obtener directamente de los sensores del ABS.

Sistema de detección directa:

- Mayor sensibilidad a los cambios de presión (detecta desviaciones de hasta 0,1 bares, o kg/cm², de presión) y posibilidad de medir la presión individual de cada rueda, incluso en el caso de la rueda de repuesto, y con el coche parado.

Sistemas alternativos:

- Sencillez de instalación: los sensores de presión se incorporan en la propia válvula de inflado.

2.11.2 Desventajas

Sistema de detección indirecta:

- Normalmente, no es capaz de indicar qué rueda es la que está desinflada, ni de detectar una pérdida simultánea de presión en todas las ruedas. Tampoco es capaz de comprobar la presión de la rueda de repuesto, ni de detectar pérdidas de presión por debajo de un cierto umbral mínimo.

Sistema de detección directa:

- El coste de un sistema de medida directa de la presión de los neumáticos es superior al coste del sistema de detección indirecta, y además exige un cierto mantenimiento.

Sistemas alternativos:

- La información se muestra en el propio sensor (la válvula de inflado situada en la llanta), por lo que no es posible comprobar la presión de los neumáticos con el vehículo en marcha.

2.11.3 Situación de mercado

Los sistemas de control de la presión de los neumáticos pueden ser adquiridos como opción en varios modelos de vehículos (en otros forman ya parte del equipamiento de serie). La implantación universal del sistema de control de la presión de los neumáticos en todos los vehículos presentaría un beneficio social superior a su coste.

En los Estados Unidos, la Administración Nacional de la Seguridad del Tráfico (National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA) obliga ya a los fabricantes de automóviles a instalar estos sistemas en todos los vehículos nuevos comercializados a partir de 2008.

2.12 Otras posibles modificaciones para reducir las emisiones de CO₂

La Unión Europea está contemplando diversas posibilidades para reducir las emisiones de CO₂ en el transporte y alcanzar en el año 2015 el objetivo de 125 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido. Desde el mes de octubre de 2007 dicho objetivo sustituye al anterior de reducir las emisiones hasta los 120 g CO₂/km antes del año 2012. La estrategia de la Unión Europea se basa en la introducción de **mejoras tecnológicas en los motores** de los vehículos hasta alcanzar

130 gramos de CO₂/km como media en los nuevos coches matriculados, y en una reducción adicional de 10 gramos de CO₂/km por un **aumento del uso de biocarburantes** y la introducción de **otras mejoras tecnológicas** como:

- a) Establecimiento de requisitos mínimos de eficiencia para los sistemas de aire acondicionado;
- b) Instalación obligatoria de sistemas exactos de control de la presión de neumáticos;
- c) Establecimiento a nivel de la UE de límites máximos de resistencia a la rodadura de los neumáticos de turismos y vehículos industriales ligeros;
- d) Uso de indicadores del cambio de velocidades, en la medida en que los consumidores utilicen ese tipo de dispositivos en condiciones reales de conducción;
- e) Mejora de la eficiencia del combustible de los vehículos industriales ligeros (furgonetas), con los objetivos de 175 g de CO₂/km de aquí a 2012 y 160 g de CO₂/km para antes de 2015.



**Descripción de los
combustibles
y los sistemas
de propulsión
alternativos**

3 Biodiésel

3.1 Definición y características básicas

El biodiésel es un biocombustible líquido formado por compuestos denominados “ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga”. Se obtiene a partir de lípidos naturales como los aceites vegetales o las grasas animales, y se fabrica industrialmente mediante procesos de esterificación y transesterificación, como se verá posteriormente. Este biocombustible se utiliza como sustituto total o parcial del gasóleo obtenido del petróleo en motores de ciclo diésel convencionales o adaptados. Su posible uso como carburante provocó que ya a principios del siglo XXI se comenzara a impulsar su desarrollo como alternativa a los combustibles para automóviles derivados del petróleo. Actualmente, el impacto medioambiental y las consecuencias sociales de su previsible producción y comercialización masiva, especialmente en los países en vías de desarrollo o del tercer mundo, son objeto de debate internacional entre los especialistas y los diferentes agentes sociales y gubernamentales.

El biodiésel puede emplearse como combustible único sustituyendo al gasóleo por completo, pero la opción que se utiliza, debido a las limitaciones reales de garantías de los fabricantes de sistemas de inyección y de automóviles, es la de mezclarse con él en distintas proporciones para su uso en motores de ciclo diésel o motores de encendido por compresión (MEC). Dentro de esta segunda opción, la mezcla más habitual es la correspondiente a 5% de biodiésel y 95% de gasóleo, denominada comúnmente B5.

Las propiedades físicas y químicas del biodiésel son muy similares a las del gasóleo [16], por lo que los motores Diesel convencionales no necesitan modificaciones para poder utilizar mezclas al 5% [17]. Así, la mayoría de los fabricantes garantizan sus motores para mezclas de hasta el 5% de biodiésel [18], si bien ya hay algunos fabricantes que garantizan sus vehículos para mezclas del 30%. Sin embargo, a estas mezclas superiores pueden surgir determinados problemas en los motores diésel convencionales como el deterioro de las juntas de caucho y la posible obstrucción de los inyectores, de ahí las limitaciones en las garantías de los fabricantes de sistemas de inyección y de automóviles [16, 19].

Desde el punto de vista normativo, la norma europea para el gasóleo EN 590 [20] permite la utilización de mezclas de hasta un 5% de biodiésel. La composición y propiedades de éste último están reguladas por la norma europea de calidad EN 14214 [21, 22, 23]. La siguiente tabla muestra las propiedades físico-químicas del biodiésel, tal y como se recoge en la segunda de las citadas normas europeas:

Propiedades	Unidad	Límites		Método de ensayo
		Mínimo	Máximo	
Contenido en éster	% (mm)	96,5		EN 14103
Densidad a 15°C	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120	-	prEN ISO 3679
Contenido de azufre	mg/kg	-	10,0	prEN ISO 20846 prEN ISO 20884
Residuo de carbón (en 10% de residuo destilado)	% (mm)	-	0,30	EN ISO 10370
Índice de cetano		51,0		EN ISO 5165
Contenido en cenizas sulfatadas	% (mm)	-	0,02	ISO 3987

(continuación)

Propiedades	Unidad	Límites		Método de ensayo
		Mínimo	Máximo	
Contenido en agua	mg/kg	-	500	EN ISO 2937
Contaminación total	mg/kg	-	24	EN 12662
Corrosión de la tira de cobre (3h a 50°C)	clasificación	clase 1		EN ISO 2160
Estabilidad a la oxidación a 110°C	horas	6,0	-	EN 14112
Índice de ácido	mg KOH/g		0,50	EN 14104
Índice de yodo	g de yodo/100 g		120	EN 14111
Éster de metilo de ácido linolénico	% (mm)		12,0	EN 14103
Ésteres de metilo poli-insaturados (4 o más dobles enlaces)	% (mm)		1	
Contenido de metanol	% (mm)		0,20	EN 14110
Contenido en monoglicéridos	% (mm)		0,80	EN 14105
Contenido en diglicéridos	% (mm)		0,20	EN 14105
Contenido en triglicéridos	% (mm)		0,20	EN 14105
Glicerol libre	% (mm)		0,02	EN 14105 EN 14105
Glicerol total	% (mm)		0,25	EN 14105
Metales del grupo I (Na+K) Metales del grupo II (Ca+Mg)	mg/kg		5,0	EN 14108; EN 14109 prEN 14538
Contenido en fósforo	mg/kg		10,0	EN 14107

Tabla 1. Propiedades físico químicas del biodiésel

Fuente: Wearcheck Ibérica. Boletín Mensual, septiembre 2004 [24]

Entre las propiedades anteriores del biodiésel cabe destacar el índice de yodo [25], cuya inclusión ha sido muy controvertida. El índice de yodo es intrínseco a la naturaleza del ácido graso y conlleva una mayor presencia de ácidos grasos insaturados. La mayor presencia de ácidos grasos insaturados implica a su vez una mayor polimerización, y ésta una mayor inestabilidad que puede traducirse en una mayor facilidad para la oxidación [25, 26]. Afortunadamente, esta cadena de efectos podría ser interrumpida mediante la adición de ciertos aditivos.

Puesto que la materia prima utilizada para obtener el biodiésel influye fuertemente en las características finales del combustible, no son inusuales diferencias sustanciales en la calidad del combustible y en los niveles de las emisiones. El proceso de fabricación del biocombustible también tiene una notable influencia en su calidad.

3.2 Obtención y materias primas

Atendiendo a su origen, es posible distinguir dos grandes tipos de materias primas para la elaboración del biodiésel [26, 27,28]: aceites usados de fritura o aceites vegetales de final de campaña, y aceites puros:

- El primer grupo incluye los aceites usados de fritura y los aceites vegetales de final de campaña (por ejemplo, el aceite de oliva de gran acidez). El volumen disponible de este tipo de residuos es limitado, y por ello la tendencia lógica apunta hacia una mayor utilización del segundo grupo.
- El segundo grupo, formado por los aceites vegetales puros cultivados para su uso energético, se obtiene a partir de las semillas de plantas oleaginosas, como por ejemplo el girasol, la colza, la soja, el coco y la palma oleífera. De esta última, no hay una gran tradición de cultivo en España, pero debido a su rápido crecimiento y a su alta productividad se están realizando cultivos experimentales para determinar las posibilidades reales que podría ofrecer este cultivo en el campo español. Otras materias primas alternativas son los aceites vegetales procedentes de plantas como la *Brassica carinata*, la *Cynara cardunculus*, la *Camelina sativa*, el *Pogonius* y la *Jatropha curcas*. También los aceites modificados, como el aceite de girasol de alto oleico, son otras de las posibles materias primas alternativas.

En el cuadro que se muestra a continuación se indican las características de las materias primas más utilizadas.

	COLZA	GIRASOL	SOJA	PALMA
Estabilidad a la oxidación				
Comportamiento en frío				
Precio/Rendimiento				

Figura 14. Características de las materias primas más utilizadas actualmente para la obtención de biodiésel (cara sonriendo con boca abierta – muy buena; cara sonriendo – buena; cara enfadada – regular; cara llorando – mala)
Fuente: Acciona [29]

Desde el punto de vista del cumplimiento de la normativa, la colza representa la materia prima más adecuada, aunque tiene el inconveniente de su elevado precio.

Una vez obtenida la materia prima, el proceso de fabricación del biodiésel resulta bastante sencillo desde el punto de vista técnico. En la siguiente figura se recoge el proceso básico de producción de biodiésel:

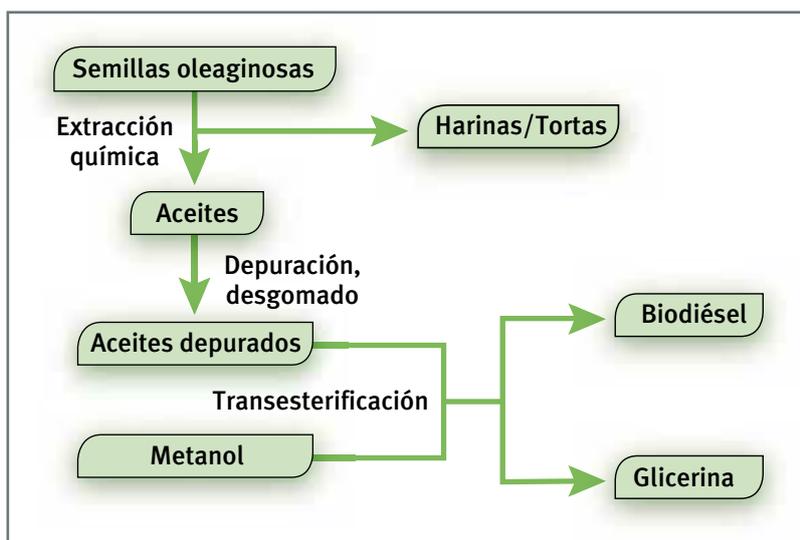


Figura 15. Producción de biodiésel
Fuente: IDAE [16]

Aunque la esterificación es un proceso técnicamente posible, el método comercial utilizado para la obtención del biodiésel es la transesterificación. En la transesterificación el aceite vegetal se somete a un proceso en el que se hidrolizan los enlaces éster de los triglicéridos obteniéndose, de este modo, nuevos ésteres con los ácidos grasos liberados en la hidrólisis (descomposición química de una sustancia cuando se le añade agua). Como reactivo se

utiliza un alcohol sencillo (metanol, o en algunos casos etanol). El proceso se realiza a una temperatura moderada de unos 60 - 65°C, y a presión atmosférica o ambiente, en presencia de un catalizador que mejora la velocidad de la reacción y el rendimiento final. El catalizador habitual es sosa o potasa, si bien además de estos catalizadores homogéneos básicos pueden usarse otros como ácidos heterogéneos, ácidos homogéneos o básicos enzimáticos [16, 26]. Los glicéridos y el alcohol han de ser anhidros (<0,06 v/v) para evitar que se produzca la saponificación y, además, los glicéridos, por su parte, han de tener un bajo porcentaje de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y formen jabones [25, 30]. Este proceso es muy parecido a la elaboración del jabón casero, de hecho, durante la elaboración del biodiésel se obtiene el principal compuesto de estos jabones: la glicerina, subproducto de gran valor añadido y con múltiples salidas comerciales en los sectores químico, agrario y alimentario. El rendimiento del proceso productivo es alto: a partir de una tonelada de aceite, de 156 kg de metanol y de 9,2 kg de potasa se pueden obtener 956 kg de biodiésel y 178 kg de glicerina sin refinar. De este proceso también se recuperan 23 kg de metanol [16].

Por tanto, el proceso completo consiste en el refinado y eliminación de ácidos del aceite vegetal en la unidad de refinamiento y, posteriormente, en la unidad de transesterificación tiene lugar el proceso con el mismo nombre, en donde el triglicérido se calienta a la temperatura adecuada (60-65°C), se le añade el alcohol y el catalizador, se mezcla y se transporta a las columnas donde se obtiene el nuevo éster y la glicerina. Finalmente, los ésteres se lavan con agua acidificada y la glicerina se trata en la unidad de purificación y concentración del glicerol. La reacción química se muestra a continuación:

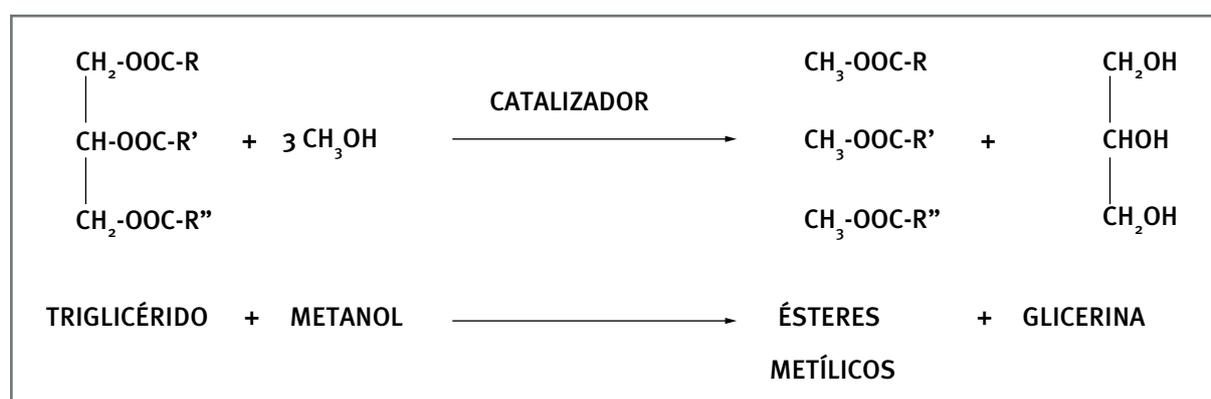


Figura 16. Reacción de transesterificación (en torno a 65°C y a presión ambiente)

Fuente: Elaboración propia

En sustitución del metanol como producto primario, se pueden utilizar otros alcoholes de bajo peso molecular como pueden ser el etanol, el propanol o el butanol [25].

En la reacción química anterior, los símbolos R, R' y R'' representan cadenas lineales con o sin enlaces dobles. El número de átomos de carbono más habitual en dichas cadenas es 18, aunque éste puede estar comprendido entre 15 y 23, dependiendo de si se trata de un aceite vegetal o de una grasa [31]. El peso molecular final se reduce a una tercera parte del inicial.

Cuando los ésteres obtenidos con el proceso anterior son ésteres metílicos, el producto final se denomina, en inglés, "Fatty Acid Metil Ester" (FAME). Cuando se obtienen ésteres etílicos el producto final se denomina, también en inglés, "Fatty Acid Etil Ester" (FAEE).

Aunque, como se ha indicado, el proceso comercial de la producción de biodiésel es la transesterificación, la esterificación también se viene aplicando, combinándola con la transesterificación, de cara a aprovechar los ácidos grasos que se generan como subproducto y producir otra cantidad adicional de biodiésel [23, 31]. Se han desarrollado numerosos procesos de esterificación, sin embargo el más común es el que se muestra a continuación, y en donde se utiliza ácido sulfúrico como catalizador:

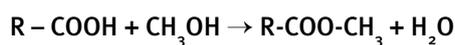


Figura 17. Reacción de esterificación

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, como ya se ha señalado anteriormente, no es el proceso habitual por sus tiempos de reacción más largos, mayores temperaturas para que tenga lugar la reacción, posibilidad de descarboxilación del ácido carboxílico inicial, etc.

En función del aceite o la grasa de partida así como de su proceso de fabricación, la calidad del biodiésel será diferente.

3.3 Almacenamiento. Manipulación

3.3.1 Almacenamiento. Control de calidad del combustible

Como promueve la directiva de biocombustibles [32, 33], en la mayoría de los países europeos el biodiésel se mezcla con diésel fósil en las refinerías. Al manipularse conjuntamente con el diésel “normal”, no existen problemas de logística. Además, y al menos desde el punto de vista de su manipulación y almacenamiento, gracias a sus similares propiedades tanto el biodiésel como el diésel fósil pueden mezclarse en cualquier proporción. Por otro lado, los impuestos finales sobre los combustibles pueden ser en algunos países diferentes en función del porcentaje de mezcla [32-37].

Las mezclas de biodiésel y de combustibles diésel convencionales tienen peores propiedades de almacenamiento que el diésel fósil. Estas mezclas se oxidan con mayor facilidad, sufren una biodegradación [16] más acentuada, y poseen una mayor tendencia a absorber agua. Así, para el almacenamiento del biodiésel pueden utilizarse depósitos normales de diésel mineral siempre que posean filtros adecuados. Como precaución adicional, los depósitos que no se encuentren en funcionamiento deben ser inspeccionados mensualmente para prevenir la acumulación de agua. Además, en los depósitos subterráneos y las áreas de mantenimiento es necesario un cierto nivel de ventilación. También es importante usar antioxidantes si el almacenamiento se prolonga durante un largo periodo de tiempo (un ejemplo de antioxidante sería el conocido como “TBHQ”). En caso de que se cambie el tipo de combustible contenido en un depósito, éste debe ser drenado, limpiado e inspeccionado.

En lo que hace referencia al proceso de mezcla del biodiésel y del diésel fósil, cuando la mezcla se realiza “in situ”, se debe realizar un muestreo del resultado para comprobar que el combustible final se encuentre bien mezclado y sea homogéneo.

En el lado positivo, el biodiésel tiene buenas propiedades de lubricación y los combustibles con mezcla de biodiésel no necesitan aditivos especiales para evitar el desgaste de las piezas metálicas [17]. Además, los combustibles de mezclas con diésel tienen también puntos más altos de congelación y mejores características de filtrabilidad.

3.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

El biodiésel es un producto biológico, biodegradable, y no tóxico que se descompone fácilmente y, por tanto, que se clasifica en la clase 1 de peligro.

Se caracteriza por no ser fácilmente inflamable, siendo su punto de inflamabilidad significativamente más elevado que el del diésel fósil. Tampoco es corrosivo ni reactivo. De cualquier manera, el almacenamiento de biodiésel no debe realizarse cerca de fuentes de calor, chispas o llamas. También es recomendable utilizar en los depósitos recubrimientos de plástico “PVC” o de otros plásticos de seguridad.

A bordo de los vehículos los sistemas automáticos de extinción de incendios son menos necesarios que en el caso de otros combustibles como el etanol o el gas natural comprimido (GNC).

3.4 Comercialización

El biocarburante más ampliamente comercializado en España es el biodiésel, existiendo más de 360 estaciones de servicio que lo distribuyen [39]. A continuación se muestra la localización de las estaciones de servicio que ofrecen biodiésel:



Figura 18. Distribución de estaciones de servicio que ofrecen biocombustibles en España (año 2007)
Fuente: http://www.biodieselspan.com/mapa_biogasolineras.php [40]

La mayor densidad geográfica de gasolineras que ofrecen biocombustibles (principalmente biodiésel) se encuentra en Barcelona y Sevilla, siendo, también, elevada en el resto de Cataluña y Andalucía, así como en el norte y centro de España.

3.5 Modificaciones en los motores

La utilización de biodiésel puro (B100) en motores Diesel antiguos exige efectuar unas pequeñas modificaciones técnicas como es el modificar el compuesto de la goma y/o cauchos de los manguitos, juntas y latiguillos del circuito del combustible. Ello es debido a que el biodiésel puro tiene la particularidad de disolver la goma. Sin embargo, desde los años 90, casi todos los fabricantes de vehículos (principalmente marcas alemanas), ya han sustituido dichos conductos fabricados con materiales plásticos o derivados, que este biocarburante puro no disuelve.

Además de esta propiedad disolvente, el biodiésel tiene un alto poder detergente gracias al cual mantiene limpio de residuos y carbonilla todo el sistema de alimentación, así como el de combustión. Sin embargo, esta ventaja puede ser al principio un pequeño inconveniente en aquellos motores que usaron siempre gasóleo y de pronto comienzan a usar biodiésel puro (B100), porque este removerá y arrastrará todos los depósitos y sedimentos del gasóleo del tanque y conductos de alimentación, obligando al principio a sustituir con más frecuencia los filtros de combustible.

A continuación se enuncian los principales materiales compatibles y no compatibles con el biodiésel [44]:

- No compatibles: cobre y aleaciones de cobre, latón, zinc, bronce y materiales galvanizados. El resultado de los efectos de la corrosión sobre estos materiales es la formación de jabones metálicos.
- Compatibles: acero C (St 37), aluminio, teflón, polietileno fluorado y polipropileno fluorado.

3.6 Funcionamiento y mantenimiento

El funcionamiento y mantenimiento de los vehículos que utilicen biodiésel es en general el mismo que en el caso de los vehículos que emplean combustibles convencionales.

En el caso de emplear biodiésel puro (B100), éste puede deteriorar las propiedades lubricantes del aceite del motor, ya que en cualquier motor Diesel es normal que una pequeña cantidad de carburante pase a través de los anillos del pistón al aceite del motor, siendo más acusado en motores de inyección directa que en los de inyección indirecta.

Así, el intervalo entre cambios de aceite puede ser más corto en el caso de utilizarse biodiésel que cuando se utiliza diésel fósil convencional. Como alternativa, se recomienda analizar el aceite frecuentemente para comprobar sus propiedades y, en el caso de que dichas propiedades se mantengan en los valores adecuados, alargar los intervalos entre cambios de aceite [44].

Por otro lado y como se ha dicho anteriormente, cuando se empieza a emplear biodiésel en un motor en el que se viene utilizando gasóleo puede ser necesario realizar el cambio de filtros antes de lo normal, dependiendo del nivel de suciedad inicial que haya en el motor y en el depósito de combustible [45]. Además, como ya se ha indicado, y de nuevo con mayor motivo en el momento de comenzar a utilizar biodiésel, el aceite debe revisarse o cambiarse con mayor frecuencia para evitar problemas mecánicos.

A su vez, es importante revisar el nivel de aceite del motor regularmente. En caso de aumento del nivel de aceite, síntoma de la dilución del biodiésel en el aceite, será necesario cambiar el aceite.

3.7 Ventajas

Ventajas energéticas:

- Es una fuente de energía alternativa y limitada por la producción agraria.
- Contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.
- Tiene un balance energético positivo: ahorra energía primaria y energía fósil.

Ventajas ambientales [29, 46]:

- Cuando se considera el ciclo de vida completo del combustible, se obtiene un balance positivo de reducción de CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero.
- Reducción de otras emisiones contaminantes (factor clave en muchas aglomeraciones urbanas). De hecho, el biodiésel puro (B100) reduce la emisión de partículas, metales pesados, monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH).
- Es fácilmente biodegradable y no contaminan el terreno en caso de vertido accidental. Cuando se emplea mezclado con gasóleo, obviamente esta ventaja desaparece.
- El uso de aceites usados para producir biodiésel ayuda a aprovechar dicho residuo.
- No es tóxico.

Ventajas socioeconómicas [29]:

- Ahorro económico derivado de la reducción de las importaciones de petróleo y de la disminución de las emisiones contaminantes.
- Creación de empleo en la industria y la agricultura local.
- Oportunidad para el desarrollo agrícola, contribuyendo a mantener la población rural y las rentas.
- Se puede utilizar mezclado en bajas proporciones con diésel fósil sin necesidad de modificaciones en los motores de encendido por compresión (MEC).

3.8 Desventajas

- Baja rentabilidad. Alto coste, en muchas ocasiones superior al del producto a sustituir [46].
- El biodiésel tiene un 8% menos de energía por unidad de volumen y un 12% menos de energía por unidad de masa que el diésel fósil. En otras palabras, su poder calorífico es menor que el poder calorífico del gasóleo, por lo que o bien se disminuye la potencia de los motores, o bien aumenta el consumo de combustible [47-48].
- Las emisiones de NO_x podrían aumentar dependiendo de las condiciones de conducción de los vehículos y de materias primas utilizadas en la fabricación del biodiésel [49].
- Menor fluidez (mayor viscosidad) en frío en comparación con el diésel convencional [50].
- Al tener mayor poder disolvente puede deteriorar los materiales del circuito de alimentación en los vehículos.

3.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Baja rentabilidad (alto coste) • Baja disponibilidad de materias primas agrícolas 	<ul style="list-style-type: none"> • Precio del petróleo • Reducción o desaparición en el futuro de la exención del Impuesto Especial de Hidrocarburos (IEH) • Aumento de emisiones de NO_x • Reducción del precio de la glicerina • Posibilidad de impactos negativos en los mercados de cereales y oleaginosas así como en otros, como en el mercado de la alimentación animal o en el mercado de la glicerina
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Programas importantes de I+D • Beneficios medioambientales • Creación de empleo en el sector agrario • Aumento de seguridad en el abastecimiento • Puede usarse en motores diésel convencionales • Contribuye a reducir las importaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del contenido máximo de biodiésel del 5 al 10% permitido por la norma técnica EN - 590 • Mercado en expansión • Aplicación del protocolo de Kioto al sector del transporte • Introducción de una cuota de obligatoriedad de uso de biocarburantes

3.10 Balance de emisiones

La ventaja principal de utilizar el biodiésel como combustible de automoción es reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en comparación con el empleo de gasóleo fósil. Así, la utilización de biodiésel puro al 100% reduciría estas emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ eq) entre un 57% (si el biodiésel se produce a partir de aceites vegetales crudos) y un 88% (si es fabricado a partir de aceites vegetales usados) [46].

Estos cálculos se basan en el “ciclo de vida” completo del biodiésel: desde el cultivo de las plantas y la producción del biocombustible propiamente dicho, hasta el uso del biodiésel en un vehículo. En teoría, podría considerarse que el biodiésel es un combustible libre de CO₂, dado que el CO₂ emitido cuando se quema habría sido absorbido inicialmente de la atmósfera durante el crecimiento de la cosecha oleaginosa. En la práctica, sin embargo, las reducciones

netas de CO₂ a partir del biodiésel obtenido de cosechas oleaginosas son menores debido a que el procesamiento de estas cosechas necesita un cierto aporte de combustible fósil [51].

En relación a las emisiones de gases locales, el biodiésel puro utilizado en motores de encendido por compresión reduciría las emisiones de monóxido de carbono (CO) y de partículas. Sin embargo, como puede verse en la gráfica siguiente, no reduciría por sí sólo las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), que aumentarían en el caso del biodiésel puro. Para reducir estas emisiones y gracias a los bajos contenidos de impurezas del biodiésel, puede emplearse un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR), que como se ha visto al inicio del estudio, sí reducen los óxidos de nitrógeno [51 - 53].

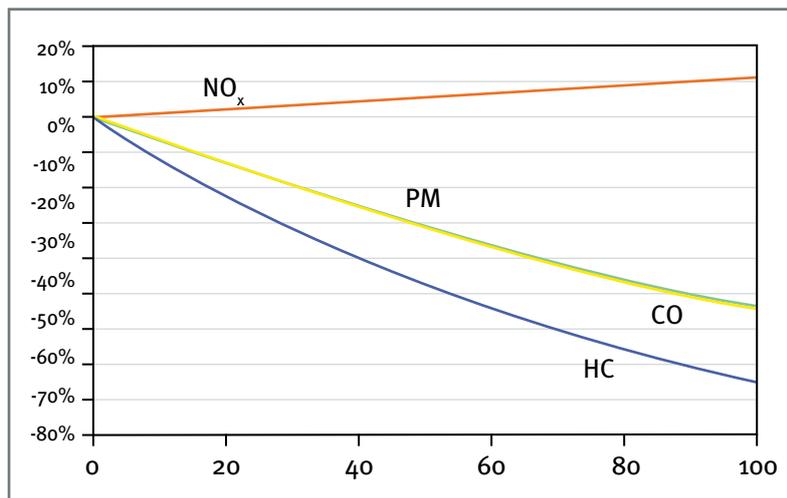


Figura 19. Cambio en las emisiones de NO_x, PM, CO y HC en función del porcentaje de mezcla de biodiésel (%)

Fuente: A comprehensive analysis of biodiesel impacts on Exhaust Emissions (Technical Report EPA 420-P-02-001) [49]

Las emisiones exactas de este biocombustible varían en función del tipo de vehículo diésel y de la especificación concreta del combustible.

Como se ha indicado anteriormente, el biodiésel se biodegrada fácilmente, lo que resulta realmente beneficioso en ciertos usos, como la propulsión de barcos en vías fluviales.

Emisión	Signo	Porcentaje
Monóxido de carbono	-	12,6
Dióxido de carbono (ciclo de vida completo)	-	15,7
Óxidos de nitrógeno	+	1,2
Partículas	-	18
Otros compuestos tóxicos	-	12/20
Mutagenicidad	-	20

Tabla 2. Efecto sobre las emisiones de añadir un 20% de biodiésel al diésel fósil (el resultado de dicha mezcla es un combustible conocido técnicamente como B20)

Fuente: Report EUR 20279 EN de la Comisión Europea [54]

3.11 Balance energético

Los balances energéticos del ciclo de vida del biodiésel son tanto mejores cuanto mayor sea el contenido de biodiésel añadido en la mezcla, especialmente si se trata de biodiésel procedente de aceites vegetales usados. Un estudio

español realizado por el CIEMAT con biodiésel obtenido de aceites vegetales crudos revela que en España, para biodiésel al 100%, el balance energético es el siguiente [46]:

- El biodiésel de aceites vegetales crudos permite un ahorro de energía primaria de un 45% comparado con el diésel fósil.
- El biodiésel de aceites vegetales usados permite un ahorro de energía primaria de un 69% comparado con el diésel fósil.
- El biodiésel de aceites vegetales crudos permite un ahorro de energía fósil de un 75% comparado con el diésel fósil.
- El biodiésel de aceites vegetales usados permite un ahorro de energía fósil de un 96% comparado con el diésel fósil.

Estos porcentajes pueden variar en función de la materia prima utilizada. En el caso expuesto se trata de biodiésel compuesto de aceite de soja importada (40%), de girasol de producción nacional (10%), de palma importada (25%) y de colza casi totalmente importada (25%). Esta composición se considera representativa de la situación en 2006.

3.12 Potencial tecnológico

El FAME (Fatty Acid Methyl Ester), frecuentemente llamado biodiésel, tiene una menor influencia en el funcionamiento de los motores que otros combustibles como el aceite vegetal sin modificar. El aceite vegetal sin modificar se conoce a menudo con su denominación en inglés: Straight Vegetable Oil/Pure Plant Oil (SVO/PPO).

El tratamiento de los gases de escape producidos por el biodiésel es relativamente más sencillo que el tratamiento de los gases producidos por el diésel fósil.

3.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación

El coste de producción de biodiésel a partir de semillas oleaginosas es sensiblemente más elevado que el coste del gasóleo derivado del crudo. La diferencia final en el coste real depende, evidentemente, de los costes relativos de las materias primas del biodiésel y del crudo. El biodiésel gravado con los habituales impuestos sobre los carburantes resultaría muy caro y, por ello, se necesita una importante reducción impositiva. Esos recortes impositivos son habituales en los países de la Unión Europea, aunque la producción de este biocarburante esté todavía poco desarrollada en algunos países europeos.

El biodiésel producido a partir de residuos vegetales oleaginosos se beneficia de los precios relativamente bajos de éstos, lo que hace que su fabricación resulte rentable con los incentivos fiscales actuales. Sin embargo, el suministro limitado de estos residuos y los problemas sobre la calidad del combustible producido a partir de los mismos pueden limitar el papel que podría jugar esta materia prima.

España cuenta con medidas legislativas que regulan el sector del biodiésel desde hace tiempo. La Ley de Impuestos Especiales establece que, desde el 1 de enero de 2003, los biocarburantes se benefician de un tipo cero en el Impuesto Especial de Hidrocarburos [32-35]. También están claramente definidas, mediante el Real Decreto 61/2006 [55], las nuevas especificaciones de las gasolinas y gasóleos, incluidas las especificaciones que han de cumplir las mezclas de biodiésel con gasóleo, hasta un máximo del 5% en volumen.

Además, merece la pena recordar que el biodiésel es una fuente europea de suministro de carburante alternativo, lo que hace a Europa algo menos dependiente de las importaciones de crudo.

Es importante señalar que el desarrollo de la industria del biodiésel dependerá de que su demanda sea lo suficientemente grande como para movilizar otras políticas como la agrícola.

3.14 Mercado mundial

3.14.1 Situación actual

Europa es la principal región productora de biodiésel del mundo, concentrando aproximadamente el 85% de la producción mundial del mismo [67].

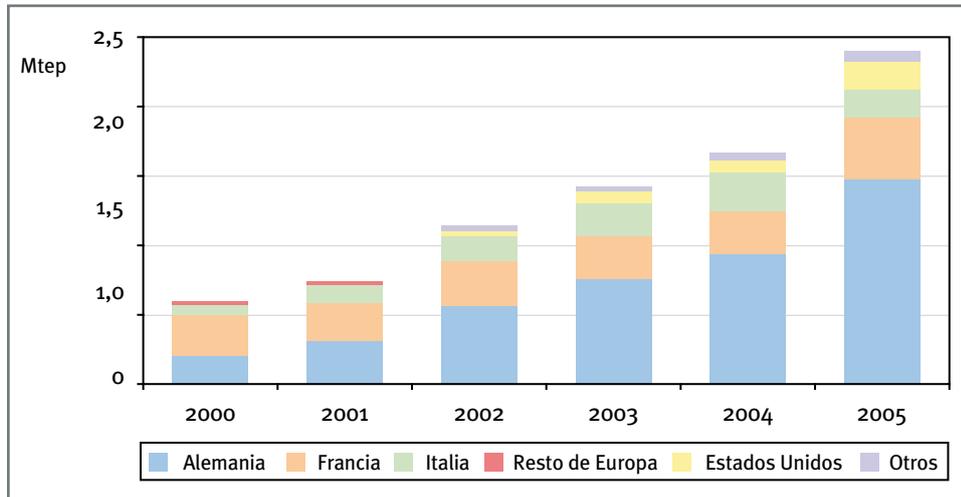


Figura 20. Producción mundial de biodiésel entre 2000-2005 en millones de toneladas equivalente de petróleo (Mtep, datos de 2006) Fuente: IEA [56]

Por otra parte, el biodiésel es el biocarburante de mayor implantación en el viejo continente, con un porcentaje aproximado del 80% del total de la producción de biocarburantes, según EurObserv'ER [57]. Las cotas de fabricación del biodiésel en la UE se han visto reforzadas con la entrada de los nuevos Estados miembros, habiéndose unidos todos ellos, excepto Hungría, a la nómina de productores europeos de biodiésel, entre los que se cuenta ya con 20 países. En el año 2005 se produjo un importante crecimiento en el volumen de fabricación de biodiésel, situándose éste por primera vez por encima de los 3 millones de toneladas. La cifra correspondiente a 2004 fue de casi 2 millones. Los principales productores fueron, por este orden: Alemania, con 1.669.000 toneladas; Francia, con 492.000 toneladas e Italia con 396.000 toneladas.

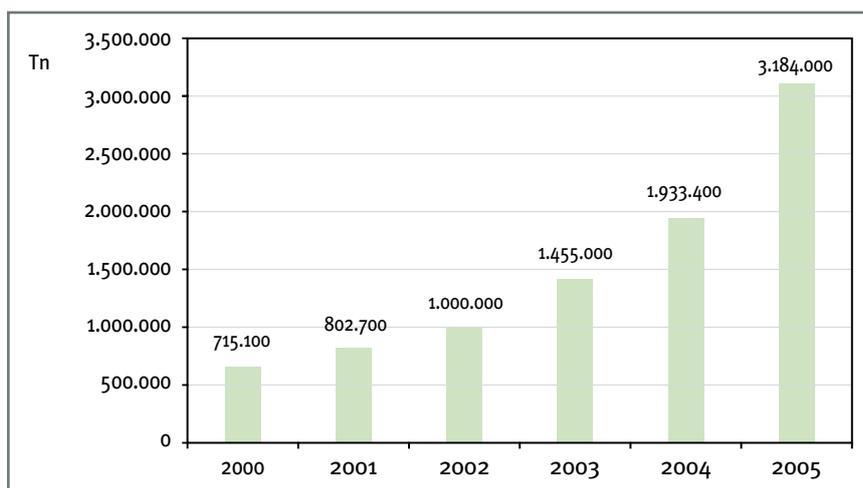


Figura 21. Evolución de la producción de biodiésel en la Unión Europea desde el año 2000 en toneladas. La UE incluye 25 países desde 2004. Nota: una tonelada de biodiésel equivale a 0,9 toneladas equivalentes de petróleo (tep) Fuente: EurObserv'ER 2006 [57]

En cuanto a los biocarburantes en general, su producción experimentó en Europa un aumento durante 2005 de más del 60% con respecto al año anterior, produciéndose en total 3.904.927 toneladas de biocarburantes. Así, en la siguiente figura puede verse la producción actual de biocarburantes en los diferentes países de la Unión Europea:

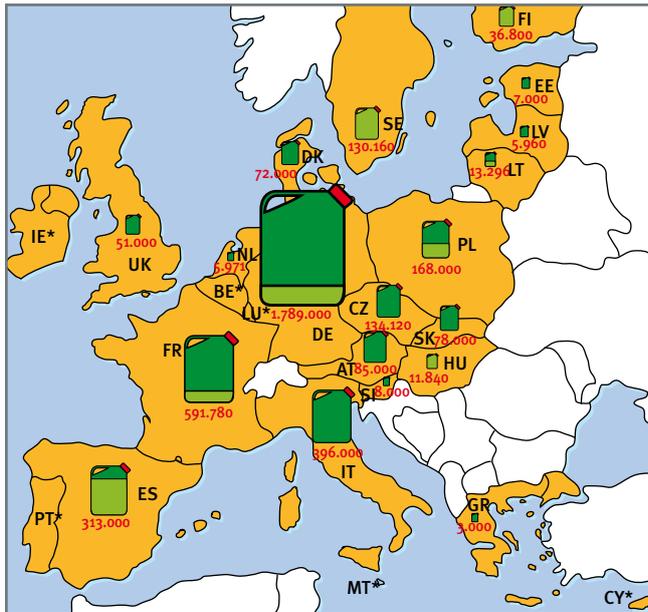


Figura 22. Producción total de biocombustibles en los diferentes países de la Unión Europea en 2005 (en toneladas). En verde oscuro se representa la producción de biodiésel y en verde claro la producción de bioetanol
Fuente: EurObserv'ER 2006 [57]

Por otro lado, el objetivo fijado en el Libro Blanco de Energías Renovables en Europa [58] respecto a los biocarburantes es alcanzar en 2010 una cantidad de 18 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep), lo que se corresponde aproximadamente con el objetivo de la Directiva 2003/30/CE [33] relativa al fomento del uso de biocarburantes, en donde se establece para la misma fecha una sustitución del 5,75% del combustible total utilizado por el sector del transporte.

Para alcanzar dicho objetivo y potenciar el uso de biocarburantes, una de las herramientas con las que cuentan los Estados miembros en su territorio es la reducción de la fiscalidad que se aplica a los biocombustibles [16]. En realidad, sin incentivos fiscales es imposible producir biocarburantes de manera competitiva, por lo que varios países han promulgado medidas en este sentido. España, Alemania, Reino Unido, Francia, Suecia, Italia, Holanda y Polonia ya han aplicado incentivos fiscales a los biocarburantes. Los incentivos pueden aplicarse al total de la producción, como en el caso de España, en donde se aplica un tipo cero del impuesto sobre hidrocarburos, o como en el del Reino Unido, en donde se reduce en 20 peniques por litro este tipo de fiscalidad. En otros países, como son los casos de Francia o Suecia, se han establecido incentivos únicamente para un determinado número de toneladas.

3.14.2 Perspectivas futuras de los biocarburantes

Las medidas prioritarias previstas por la Comisión Europea en su estrategia para la promoción de los biocarburantes se articulan en torno a siete ejes políticos:

- Estimular la demanda de biocarburantes.
- Actuar en beneficio del medio ambiente.
- Desarrollar la producción y distribución de biocarburantes.
- Ampliar el abanico de materias primas.
- Potenciar las oportunidades comerciales de los biocarburantes.
- Apoyar a los países en desarrollo que dispongan de potencial para la producción de biocarburantes.
- Continuar fomentando la investigación y la innovación a fin de mejorar los procedimientos de producción de los biocombustibles y reducir sus costes.

De este modo, en el marco del desarrollo sostenible europeo y del Libro Verde «Hacia una estrategia europea de seguridad en el abastecimiento energético», la Comisión Europea propone un verdadero plan de acción dirigido a aumentar el porcentaje de los biocarburantes hasta alcanzar el 20% de todo el consumo europeo de gasolina y gasóleo en el año 2020.

Así, la Directiva 2003/30/CE establece un porcentaje mínimo de biocarburantes en sustitución del gasóleo y la gasolina utilizados en el sector del transporte en cada Estado miembro. Según la citada directiva, los Estados miembros velarán por que la proporción mínima de biocarburantes comercializados en sus mercados sea del 2% en el año 2005 y del 5,75% en diciembre de 2010. Todo Estado que fije unos valores inferiores deberá justificarlo suficientemente. El objetivo de esta medida es disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros elementos como las partículas sin quemar que resultan perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

3.15 Mercado español

3.15.1 Situación actual

España ha experimentado uno de los mayores crecimientos porcentuales de toda la Unión Europea al pasar de una producción de 13.000 toneladas al año en 2004, a otra de 73.000 toneladas al año en 2005 [57, 59]. En el año 2006 se alcanzaron en España las 124.577 toneladas al año [57]. Estas cifras situaban a España, en 2005, como el octavo país europeo en producción de biodiésel, aunque todavía se está muy lejos de alcanzar los volúmenes de producción de Alemania, Francia o Italia.

Desde el punto de vista energético, y respecto a la totalidad del gasóleo de automoción comercializado en el período 2006 (24.615.223 toneladas equivalentes de petróleo), las ventas de biodiésel procedentes de las plantas productoras españolas alcanzaron tan sólo una cuota de mercado del 0,23%.

En total la capacidad productiva de biodiésel en España a finales de 2005 era de 255.000 toneladas al año. Sin embargo, la producción total durante este año fue ostensiblemente menor, debido fundamentalmente a que algunas de las plantas de producción entraron en servicio precisamente a finales de ese año. En España existían, a finales de 2005, 8 plantas de biodiésel, de las cuales 6 estaban en funcionamiento en 2004 y las 2 restantes (con una capacidad de 76.000 toneladas al año) entraron en funcionamiento a lo largo de 2005. Al término del año 2006 estaban en funcionamiento en España 12 plantas de producción de biodiésel.

Merece la pena reseñar que existe un acuerdo suscrito entre Acciona y Repsol-YPF en el que se contempla crear una capacidad productiva superior al millón de toneladas para finales de 2009.

Actualmente, en España existen más de 360 gasolineras que ofrecen biodiésel obtenido principalmente a partir de materias primas como aceites usados, la colza o el girasol.

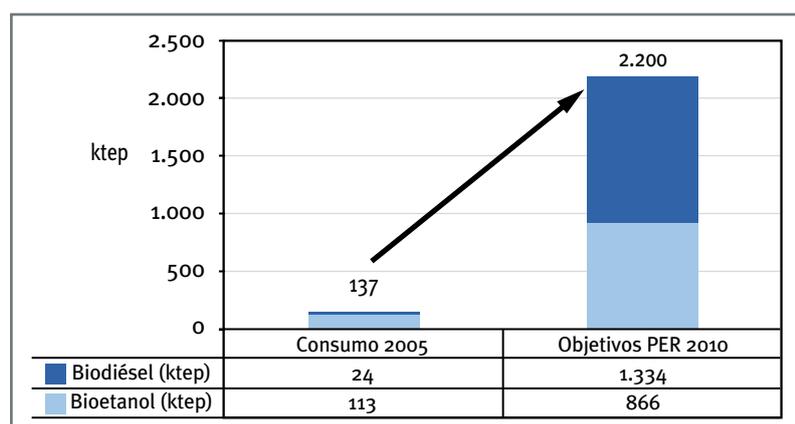
3.15.2 Perspectivas futuras de los biocarburantes

El papel de los biocarburantes en el Plan de Energías Renovables (PER)

El Plan de Energías Renovables en España 2005-2010 (PER) [60], constituye la revisión del anterior Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000-2010 (PFER) [61]. Para los biocarburantes, el nuevo plan incluye objetivos mucho más ambiciosos que el antiguo. En concreto se pasa del medio millón de toneladas equivalentes de petróleo propuesto por el anterior Plan de Fomento de las Energías Renovables, a los 2,2 millones de toneladas equivalentes de petróleo del actual Plan de Energías Renovables. La meta, como no podía ser de otro modo, es alcanzar los objetivos propuestos por la Directiva 2003/30/CE: sustituir con biocarburantes el 5,75% de la gasolina y del gasóleo consumido por el sector del transporte en 2010.

Tal y como recoge el Balance del Plan de Fomento de las Energías Renovables, el consumo de éstas en nuestro país ha crecido en 2.700.000 toneladas equivalentes de petróleo a lo largo del período comprendido entre 1999 y 2004. Esto supone un aumento significativo pero a la vez insuficiente para alcanzar los objetivos fijados, que han sido cumplidos únicamente en un 28,4%. Los biocarburantes son una de las tres fuentes renovables cuyo uso más se ha incrementado en este período. En 2004 se produjeron en nuestro país biocarburantes equivalentes, en términos de energía primaria, a un total de 228.200 toneladas equivalentes de petróleo.

El PER plantea un escenario para los biocarburantes que permitiría alcanzar los 2.200.000 toneladas equivalentes de petróleo en 2010, como se observa en la figura siguiente en donde se representan los objetivos del Plan de Energías Renovables. Esta cantidad representaría un 5,83% del consumo de gasolina y gasóleo, un porcentaje ligeramente superior al indicado por la directiva europea sobre biocarburantes para dicho año. De alcanzarse dicho objetivo se evitaría la emisión a la atmósfera de 5.905.270 toneladas de CO₂ al año.



superior al indicado por la directiva europea sobre biocarburantes para dicho año. De alcanzarse dicho objetivo se evitaría la emisión a la atmósfera de 5.905.270 toneladas de CO₂ al año.

Figura 23. Objetivos de biocarburantes propuestos en el Plan de Energías Renovables de España 2005-2010
Fuente: APPA [63].

Como es lógico, el Plan de Energías Renovables no es sólo una declaración de intenciones, sino que incluye una serie de medidas para alcanzar sus objetivos. Entre las propuestas para los biocarburantes destacan la continuación de la fiscalidad actual (tipo cero en el Impuesto Especial de Hidrocarburos) durante al menos 10 años; el desarrollo de todas las posibilidades que ofrece la Política Agraria Común europea (PAC) [62], en especial las ayudas europeas y nacionales a los cultivos energéticos; y un paquete de medidas para abaratar el coste final de los aceites para biodiésel. Entre estas medidas de abaratamiento se pueden citar el desarrollo de una logística de recogida de aceites usados, o la investigación y selección de nuevas especies de plantas oleaginosas.

La industria española está preparada para producir el volumen de biodiésel previsto en el Plan de Energías Renovables (1.334.000 toneladas equivalentes de petróleo o, lo que es lo mismo, 1.680 millones de litros):

- Durante el año 2006 entraron en funcionamiento la planta de producción de biodiésel de “Biocarburantes Almadén”, en Ciudad Real, con una capacidad de 32.000 toneladas anuales, y otras tres plantas más en Asturias, Andalucía y Cuenca. También se ampliaron algunas de las plantas ya existentes.
- Entre 2007 y 2010 está prevista la entrada en funcionamiento de numerosas plantas de biodiésel en casi todas las Comunidades Autónomas con el fin de producir los 1.680 millones de litros fijados en el Plan de Energías Renovables (PER).

Retos tecnológicos y económicos [64]

En la actualidad, existen algunas barreras que dificultan un mayor desarrollo de los biocarburantes en nuestro país. La primera es que su coste de producción es actualmente mayor que el coste de los productos derivados del petróleo. Por el momento, esta situación se ha compensando con la exención del Impuesto Especial de Hidrocarburos, con lo que el precio final de los biocarburantes es equivalente con el de la gasolina y el gasóleo. Sin embargo, para alcanzar mayores cotas de producción es preciso implicar al sector agrario, que hasta ahora se ha mostrado bastante reacio a entrar en el negocio de los cultivos energéticos. Para ello, como señala el Plan de Energías Renovables (PER), será necesario explorar al máximo las subvenciones y ayudas de la Política Agraria Común europea (PAC), al mismo tiempo que también resultará imprescindible dedicarle mayores esfuerzos a la investigación de nuevas

especies vegetales y procesos productivos más eficientes. Con la tecnología actual, tanto en EE.UU. como en Europa, la producción de un volumen tal de biocarburantes que permitiera sustituir el 10% del combustible total utilizado en el transporte requeriría la puesta en cultivo del 40% de sus respectivas superficies.

Otro de los retos a superar en estos momentos es la adopción por parte de todos los fabricantes de unos estándares de calidad comunes. Actualmente son escasos los constructores de automóviles que garanticen sus mecánicas para su uso con biocarburantes cuyo porcentaje supere el 5% (hasta dicho porcentaje no es necesario ningún etiquetado especial que advierta a los consumidores). Sería necesario un acuerdo entre los fabricantes de automóviles, los productores de biocarburantes y las administraciones para establecer una serie de características técnicas normalizadas.

Posibles medidas

Además de la reciente implantación de un sistema de “obligación de consumo de biocarburantes”, podrían ponerse en práctica una serie de medidas, muchas de ellas ya contempladas en el propio PER o en la Estrategia Europea de Biocarburantes, como:

- Garantizar los actuales incentivos fiscales por un plazo de al menos 10 años.
- Aumentar del 5% al 10% el porcentaje admitido de biocarburante en la gasolina y el gasóleo sin necesidad de etiquetado (EN 228 y EN 590, respectivamente).
- Actualizar las especificaciones para mezclas superiores de biocarburantes.
- Adaptar la red logística de hidrocarburos para la introducción de biocarburantes.
- Desarrollar decididamente los cultivos energéticos en España para asegurar la máxima producción autóctona. Mejora de las condiciones de la Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC).
- Obligar a los fabricantes de vehículos a garantizar su uso con biocarburantes.
- Fomentar la utilización de biodiésel entre administraciones públicas y particulares.
- Estudiar la posibilidad de contabilizar el uso de biocarburantes como parte de los objetivos de reducción de las emisiones de CO₂ de los vehículos.
- Realizar una campaña informativa sobre biocarburantes.

3.16 Factores clave

Algunos de los factores clave para el desarrollo de los biocarburantes son:

- Revisión de la normativa y del nivel de su cumplimiento.
- Fiscalidad energética.
- Parque nacional de vehículos.
- Consumo de biocarburantes.
- Obtención de cultivos energéticos.
- Distribución y logística.
- Beneficios ambientales del uso biocarburantes.
- Protocolo de Kioto.

Por otro lado, algunos factores clave para el desarrollo de los cultivos energéticos son:

- Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC): aumento de la ayuda de 45 euros por hectárea.

- Reglamentación adecuada.
- Desarrollo de un mercado que sea independiente del sector alimentario.
- Precio garantizado.
- Adquisición de derecho de cuota.
- Contrato marco con productores.
- Medidas de ahorro energético.
- Medioambiental, coste sanitario, desarrollo rural, dependencia energética.

3.17 Experiencias y vehículos ya en el mercado

A continuación, se listan algunos vehículos disponibles en el mercado actual y que utilizan biodiésel:

- 1 Iveco ofrece modelos capaces de funcionar con biodiesel en todas las categorías de vehículos.
- 2 Mercedes/EVOBUS ofrece algunos modelos capaces de funcionar con B100 (denominación comercial del combustible compuesto por un 100% de biodiésel). Además, Mercedes ofrece actualmente autobuses B100 con filtro o trampa de partículas.
- 3 Todos los vehículos pesados de Scania pueden funcionar con biodiésel con la condición de que se establezca un contrato de servicio especial, el cual incluye una revisión del aceite cuando se utiliza biodiésel.
- 4 New Holland, fabricante centrado en el sector de vehículos para uso fuera de carretera (vehículos off – road), ha anunciado que en todos sus vehículos con motores CNH es posible utilizar hasta un 20% de mezcla de biodiésel siempre que este biocombustible cumpla con el estándar europeo EN 14214.
- 5 Los tractores agrícolas de la marca Fendt son compatibles con el combustible conocido técnicamente como “Rapeseed Methyl Ester” o RME. Este combustible es, simplemente, aceite de colza procesado. Dicha compatibilidad se consigue integrando las bombas de inyección en el bloque motor y aplicando lubricación de aceite separada.

Por otro lado, en España se han realizado diversas experiencias con biodiésel. Ya entre 1996 y 1997 la Empresa Municipal de Transportes de Valencia realizó una prueba con biodiésel proporcionado por Repsol con resultados positivos. Actualmente, encontramos las siguientes aplicaciones del biodiésel en nuestro país:

- 1 La empresa de Transporte Urbano de Santander (TUS) ha incorporado la utilización de biodiésel 100% en los nuevos autobuses adquiridos.
- 2 La Empresa Municipal de Transportes de Madrid cuenta actualmente con más de 200 autobuses funcionando con biodiésel.
- 3 “La Montañesa” de Pamplona contará con 50 autobuses propulsados por biodiésel puro suministrado por Acciona.
- 4 La constructora Vidaurre utilizará biodiésel puro al 100% en todo su parque móvil compuesto por 16 coches y furgonetas y 12 máquinas y camiones de obra.
- 5 El Parque Móvil del Estado (PME) ha adquirido 160 vehículos aptos para biodiésel y ha sustituido su surtidor diésel convencional por otro que abastece diésel fósil mezclado con un 10% de biodiésel.
- 6 Otras ciudades como Mataró o Bilbao cuentan también con autobuses impulsados por diésel de origen vegetal.

4 Bioetanol

4.1 Definición y características básicas

El bioetanol es un alcohol producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en la remolacha, en cereales como el maíz, la cebada o el trigo, en la caña de azúcar, en el sorgo o en otros cultivos denominados “energéticos”. Al mezclar el bioetanol con gasolina se produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a las de la gasolina y con una importante reducción de las emisiones contaminantes.

Propiedades	Unidad	Límites		Método de ensayo
		Mínimo	Máximo	
Contenido en etanol y alcoholes más saturados	% (mm)	98,7		EC/2870/2000 - Apéndice 2, método B
Contenido en mono-alcoholes altamente saturados (C ₃ -C ₅)	% (mm)		2,0	EC/2870/2000 - Método III o EN13132 ó EN1601
Contenido en metanol	% (mm)		1,0	EC/2870/2000 - Método III o EN 13132 o EN 1601
Contenido en agua	% (mm)		0,3	prEN 15489
Contenido en cloruros inorgánicos	mg/l		20	prEN 15484 o prEN 15492
Contenido en cobre	mg/kg		0,1	prEN 15488
Acidez total	% (mm)		0,007	prEN 15491
pHe		6,5	9,0	prEN 15490
Apariencia		Claro y brillante		Inspección visual
Fósforo	mg/l		0,5	prEN 15487
Material no volátil	mg/100 ml		10	EC/2870/2000 - Método II
Azufre	mg/kg		10,0	prEN 15485 o prEN 15486

Tabla 3. Propiedades físico químicas del bioetanol

Fuente: Wearcheck Ibérica. Boletín Mensual, septiembre 2004 [24]

El bioetanol tiene dos vías de empleo diferenciadas: empleo directo como combustible, o empleo indirecto para síntesis de ETBE (mezcla de etanol e isobutileno cuyo nombre químico completo es “5 - etil - ter - butil - éter”).

Como combustible y con arreglo a la norma de calidad europea EN 228 [65], el bioetanol puede emplearse mezclado con gasolina en una proporción de 5% de bioetanol y 95% de gasolina, no precisándose modificación alguna del motor en este caso. Este porcentaje del 5% de bioetanol está admitido por los fabricantes, quienes por lo general especifican que la mezcla máxima de bioetanol en la gasolina no debe exceder el 5% del volumen para no anular la garantía del vehículo. Otros fabricantes fijan dicho porcentaje máximo en el 10% de bioetanol [22, 66-75].

Dado que el bioetanol tiene un poder calorífico equivalente a dos tercios del poder calorífico de la gasolina, un 5% de volumen de bioetanol en una mezcla con gasolina equivale a un 3,4% del contenido energético de la mezcla.

Además, el bioetanol puede utilizarse en otros porcentajes de mezcla. Así, puede mezclarse con la gasolina hasta en un 85% en motores de encendido provocado, pero en este caso se requieren ciertas modificaciones en los motores [67-77]. Los automóviles que admiten dicho porcentaje del 85% de bioetanol se denominan “vehículos de combustible flexible” (o, en inglés, Flexible Fuel Vehicle – FFV). También es posible utilizar el bioetanol mezclado con gasóleo en diversas proporciones y con una serie de aditivos en motores de encendido por compresión. Esta última mezcla de combustibles se denomina “E-Diésel” [78-81].

4.2 Obtención y materias primas

La base para la fabricación de bioetanol son los azúcares contenidos en plantas como la remolacha, la caña de azúcar o el sorgo azucarero. El bioetanol también puede obtenerse a partir del almidón o de la inulina (compuesto formado principalmente por azúcares) presentes en los granos de cereal o los tubérculos de patata. En este segundo caso, los vegetales deben ser previamente hidrolizados para obtenerse glucosa o fructosa. Además de las fuentes anteriores existe una tercera: la biomasa lignocelulósica. A partir de la biomasa y, por hidrólisis (descomposición química de una sustancia cuando se le añade agua), en este caso de la celulosa o hemicelulosa, se puede obtener glucosa fermentable [26]. El etanol es finalmente resultado de la fermentación de la glucosa. Las dos primeras alternativas son las más extendidas en la actualidad, pero la tercera es probablemente la más atractiva por su abundancia y bajo coste.

En la figura siguiente se recoge un esquema básico de la producción de bioetanol:

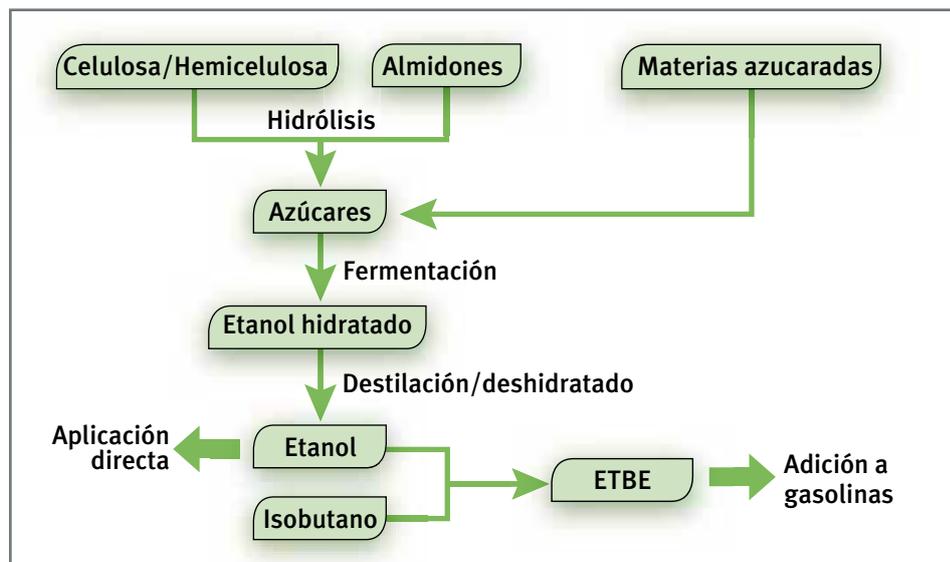


Figura 24. Producción de bioetanol

Fuente: IDAE [16]

A partir de cualquiera de las opciones comentadas, se obtiene un mosto azucarado cuya fermentación en ausencia de oxígeno transforma la glucosa en etanol hasta obtenerse un líquido con un grado alcohólico de entre el 10 y el 15%. El líquido en este punto se destila para conseguir alcohol hidratado, el cual contiene entre un 4 y un 5% de agua. El producto resultante ya es capaz de sustituir a la gasolina en motores de explosión convencionales, aunque es preciso para ello realizar algunas modificaciones mecánicas. En cualquier caso, la sencillez de uso de este carburante queda constatada por los millones de automóviles brasileños alimentados con él.

El proceso anterior puede continuarse con una segunda fase de deshidratación tras la que se obtiene un alcohol con una pureza superior al 99,8%. Los modos de utilización de este alcohol de alta pureza son varios: por ejemplo, en mezclas con gasolina tal y como se viene utilizando en aproximadamente 35 países, principalmente EE.UU. y Brasil. Una de las ventajas de esta mezcla es que aumenta el índice de octano del combustible resultante. Otra

posibilidad de uso del bioetanol consiste en mezclarlo con gasóleo de automoción en proporciones variables y añadirle algunos aditivos con objeto de hacerlo apto para motores diésel. Esta modalidad ya ha sido empleada en flotas de autobuses y ha demostrado su eficacia a la hora de reducir la contaminación: los vehículos impulsados con mezclas de bioetanol emiten menos contaminantes que los vehículos que consumen únicamente gasóleo.

Por otro lado, el bioetanol también se utiliza para sintetizar el ETBE (5 - etil - ter - butil - éter), que es un sustituto del MTBE (metil - ter - butil - éter). Ambos son aditivos que se añaden a las gasolinas para incrementar el índice de octano. Las ventajas del ETBE son varias: por un lado es menos volátil y menos soluble en el agua, por otro tiene una mayor eficiencia térmica y, por último, es menos corrosivo [25, 26, 82, 83]. Como contrapartida, se requiere un proceso adicional para su fabricación y se depende de la disponibilidad de su segundo componente, el isobutileno. Este último es un subproducto obtenido en las refinerías.

4.3 Almacenamiento. Manipulación

4.3.1 Almacenamiento

Este combustible líquido se puede transportar y almacenar del mismo modo que la gasolina, y también mezclarse con ésta para formar, por ejemplo, combustible E85 (nomenclatura que indica que la mezcla contiene un 85% de etanol y un 15% de gasolina convencional). De hecho, la mezcla de bioetanol con gasolina es la práctica habitual, ya que la mezcla facilita la adaptación del motor y mejora su arranque en frío [16, 25, 26, 66-68].

Por otro lado, el etanol no debe de contener agua para evitar que se produzca su separación en dos fases, algo que podría reducir el rendimiento del motor [83] y provocar problemas de corrosión.

4.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

Las precauciones de seguridad con el bioetanol son las mismas que con la gasolina.

Por otro lado, durante el repostaje de los depósitos de etanol se puede producir una mezcla de aire-etanol que puede resultar explosiva en el intervalo de temperatura de 4-46 °C. Por ello, para evitar explosiones, durante las operaciones de repostaje no debe situarse cerca ninguna fuente de energía adicional (procedente, por ejemplo, de soldaduras, elementos a elevadas temperaturas, chispas...) [83, 84].

Comparado con la gasolina, el etanol tiene una baja presión de vapor [67, 68]. Por otro parte, el encendido del etanol no es tan fácil como el de la gasolina y la intensidad de la llama es menor [44]. Las llamas producidas al quemarse el bioetanol son invisibles con la luz del sol, lo cual puede dificultar su detección.

4.4 Comercialización

En España no existe todavía una red consolidada de estaciones de servicio que suministren bioetanol para uso público. La mayoría de las estaciones que suministran este producto lo hacen para uso exclusivo de flotas de vehículos, sobre todo autobuses.

4.5 Modificaciones

Los motores de encendido provocado (conocidos más abreviadamente como MEP) están diseñados para que la combustión de la mezcla de carburante y aire se inicie por una causa externa (la chispa generada por las bujías). Una vez iniciada la combustión se forma un frente de llama que se propaga por el interior del cilindro hasta quemar toda la mezcla.

A medida que avanza el frente de llama, el cual separa los productos quemados de la mezcla todavía sin quemar, la expansión de los productos quemados provocada por las altas temperaturas comprime la mezcla fresca que queda sin quemar. Para evitar la autoinflamación o autoencendido de la mezcla sin quemar, lo cual implicaría aumentos bruscos

de la presión en el interior del cilindro y un elevado riesgo de detonación violenta de la mezcla, los combustibles empleados en estos motores han de poseer una baja tendencia a la autoinflamación. En general, es necesario que la mezcla sea capaz de resistir presiones superiores a los 60 ó 70 bares. La detonación es un fenómeno que limita la potencia y el rendimiento de los motores de encendido provocado, pudiendo producirse, si ésta es persistente, graves averías en los pistones y la culata de los motores.

La mayor o menor tendencia a la detonación de un combustible se mide por el número o índice de octano (NO). Así, se habla de gasolina de 95 octanos, de 98, etc. A mayor número de octanos, mayor es la resistencia del combustible a la detonación [85]. Al añadir una mezcla del 10% de etanol a la gasolina, el “octanaje” de la gasolina se incrementa en dos puntos. Por eso, el bioetanol se conoce como “potenciador del octanaje”.

La relación teórica combustible-aire que se necesita para que la gasolina complete la combustión sin que haya exceso de aire es de 1 a 14,66, lo que significa que se necesitan 14,66 kg de aire para completar la combustión de 1 kg de gasolina. Esta relación se denomina relación o dosado estequiométrico.

El bioetanol, fruto de su propia composición química, aporta oxígeno para la combustión. Así, una mezcla al 10% de bioetanol normalmente tendrá un contenido de oxígeno de alrededor del 3,5%. Esto tiene que ser tenido en cuenta ya que ese oxígeno aportado por el bioetanol afecta al dosado del motor [67, 83].

Cuando se emplean combustibles como el bioetanol, los modernos sistemas electrónicos de gestión del motor y de inyección electrónica de combustible son capaces de detectar en cada momento la relación combustible-aire y modificarla con el fin de mantener el dosado correcto. Para algunos vehículos, el contenido máximo de oxígeno que se puede compensar es del 3,5% (contenido que, como se ha indicado, se corresponde con un contenido máximo del 10% de bioetanol en la gasolina). Los vehículos más antiguos, dotados de carburador en lugar de inyección electrónica no disponen de ningún sistema electrónico que, entre otras cosas, permita detectar y corregir el dosado.

A continuación se indica qué materiales son compatibles y cuáles incompatibles para su utilización con bioetanol [85-87]:

- Incompatibles: zinc, latón, plomo, aluminio, terne (aleación de plomo y estaño), acero chapado y soldadura basada en plomo, caucho natural, poliuretano, juntas de corcho, cuero, PVC, poliamidas, plásticos de metil metacrilato y ciertos plásticos termoestables.
- Compatibles o, en otras palabras, con una resistencia aceptable a la corrosión provocada por el etanol: acero sin chapar, acero inoxidable, hierro negro, bronce, fibra de vidrio “Fiberglass” reforzada termoestable no metálica, conducciones de termoplástico, depósitos reforzados de fibra de vidrio “Fiberglass” Buna-N, caucho de neopreno, polipropileno, nitrilo, viton y teflón.

4.6 Funcionamiento y mantenimiento

El etanol es un combustible con un alto índice de octanos, superior al de la gasolina, lo que conlleva que los ajustes y las prestaciones de los motores sean diferentes. El alto octanaje del bioetanol permite obtener más potencia y más par motor que con gasolina convencional [66, 68, 89].

Entre los ajustes que pueden ser necesarios se pueden citar los siguientes ejemplos: el bioetanol puede requerir lubricantes especiales; los recambios deben ser certificados para su uso con E85; también los tanques de combustible han de ser compatibles con el alcohol (como es el caso, por ejemplo, de los depósitos fabricados en fibra de vidrio “Fiberglass”) [44].

Desde 1994 algunos modelos de automóviles con inyección multipunto indirecta pueden funcionar con E85 (combustible compuesto por una mezcla de un 85% de etanol y un 15% de gasolina), aunque generalmente es preciso actualizar la centralita que controla la inyección [44]. Por otro lado, hasta la fecha no se ha conseguido utilizar el bioetanol en motores de inyección directa. En los motores más antiguos el único modo de compensar las diferentes características de los combustibles es reemplazar la centralita de inyección.

Actualmente, el uso de vehículos de combustible flexible (o, en inglés, Flexible Fuel Vehicle - FFV), proporciona un enfoque alternativo muy interesante y amplía el abanico de posibilidades [69-75, 90]. Este tipo de vehículos está especialmente diseñado para utilizar una amplia gama de concentraciones de etanol, al menos hasta llegar al combustible E85.

Por otro lado, debido a la menor densidad energética del biocombustible, al utilizar bioetanol se necesita un depósito de combustible de mayor volumen para evitar que se reduzca la autonomía [91].

4.7 Ventajas [10, 44, 66, 68, 91, 92]

Ventajas energéticas:

- Es una fuente de energía renovable y, por tanto, no agotable (aunque limitada por la producción agraria).
- Contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y, por tanto, aumenta la seguridad del abastecimiento energético.
- Tiene un balance energético positivo: ahorran energía primaria y energía fósil.

Ventajas ambientales:

- Reducción de las emisiones de CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero.
- Reducción de otras emisiones contaminantes (factor clave en muchas aglomeraciones urbanas): el bioetanol reduce las emisiones de PM y CO.
- Es fácilmente biodegradable y no contamina los suelos.

Ventajas socioeconómicas:

- Ahorro económico derivado de la reducción de las importaciones de petróleo y de las emisiones contaminantes.
- Creación de empleo en la industria y la agricultura española.
- Oportunidad para el desarrollo agrícola, ayudando a mantener la población rural y las rentas rurales.

4.8 Desventajas [66, 68, 83, 87, 89, 92]

- Baja densidad energética: menor autonomía del vehículo para un volumen de depósito dado.
- Alto calor latente de vaporización.
- Gran afinidad por el agua.
- Bajo poder lubricante.
- Baja rentabilidad (alto coste).
- Corrosión en algunos materiales (juntas, conductos...) de los vehículos en circulación.
- Alto coste de la producción de etanol. La producción de bioetanol a partir de la celulosa abaratará dicho coste.

4.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Bajo contenido energético por unidad de volumen • Alto coste de las infraestructuras propias de transporte, almacenamiento y distribución • Conocimiento público limitado y falta de concienciación social en torno a sus beneficios • No contribuye a reducir las importaciones • Ausencia de un sistema estándar de aseguramiento de la calidad del bioetanol para su uso en el mercado. Necesidad de redefinir las especificaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Aparición de conflictos derivados del uso de tierras y materias primas inicialmente destinadas a la alimentación • Desaparición o reducción de la exención del impuesto especial de hidrocarburos
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la dependencia del petróleo • Materias primas seguras y diversificadas (para su producción, por ejemplo, se prevé que se pueda emplear biomasa celulósica a partir de 2015) • Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero • Mejora de la calidad del aire • Mejor combustión en el motor (aumento del índice de octanos) • Apoyo al desarrollo rural aportando renta y empleo • Eliminación de residuos orgánicos (material celulósico) 	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas públicas de fomento de los biocarburantes • Desarrollo de tecnologías avanzadas de conversión de la celulosa en bioetanol • Desarrollo futuro de bio-refinerías que aprovechen toda la energía contenida en la materia prima celulósica • Posibilidad de utilización de las actuales infraestructuras de transporte y almacenamiento de los productos petrolíferos convencionales • Desarrollo de cultivos dedicados

4.10 Balance de emisiones [10, 66, 91, 92]

La ventaja principal de emplear bioetanol como carburante consiste en la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero en comparación con el uso de la gasolina. Cuando se considera todo su “ciclo de vida útil”, el empleo de bioetanol al 85% (E85) fabricado a partir de cereales reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ eq) en un 70%.

Aunque no hay que olvidar que el proceso de producción del bioetanol demanda por sí mismo una cantidad importante de energía, cuando se considera el ciclo completo “del pozo a la rueda” se puede demostrar que la sustitución de gasolinas por este biocarburante contribuiría a reducir sustancialmente las emisiones globales de CO₂.

Además, la utilización de etanol reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO), de partículas y de otros contaminantes precursores del ozono.

Emisión	Signo	Porcentaje
Monóxido de carbono	-	25/30
Dióxido de carbono (ciclo de vida completo)	-	6/10
Óxidos de nitrógeno	+	5
Compuestos orgánicos volátiles	-	7
Aldehídos	-	30/50*

* Si el vehículo monta catalizador, la emisión de aldehídos es insignificante

Tabla 4. Comparación de las emisiones del bioetanol mezclado al 10% frente a la gasolina sin mezclar

Fuente: Report EUR 20279 EN de la Comisión Europea [54]

4.11 Balance energético

La energía fósil necesaria para la producción y distribución del E85 es un 21% inferior a la energía contenida en dicho combustible. Además, esta energía es un 36% inferior por kilómetro recorrido respecto a la de la gasolina. En el caso del E5, la energía es un 1,12% inferior [64].

Aunque la energía primaria total necesaria para la producción y distribución del E85 es un 3% superior a la energía contenida en el combustible, esta energía primaria total es todavía un 17% inferior por kilómetro recorrido en comparación con la energía primaria total necesaria para la producción y distribución de la gasolina (un 0,28% inferior en el caso del E5) [64].

Estos valores mejorarán todavía más con algunas medidas previstas en el futuro, especialmente la utilización de biomasa lignocelulósica como materia prima para la obtención del bioetanol.

4.12 Potencial tecnológico

En el futuro el etanol puede ayudar a alcanzar una mayor eficiencia en los motores de combustión interna gracias a su mayor índice de octanos [67, 83]. Así, gracias a su mayor octanaje el bioetanol permite utilizar mayores relaciones de compresión en los motores [68], lo cual mejora su rendimiento. Aunque para aprovechar esta posibilidad se requerirá una adaptación del funcionamiento general de los motores, como por ejemplo cambios en la distribución.

El bioetanol puede también utilizarse para fabricar ETBE (mezcla de etanol e isobutileno cuyo nombre químico completo es “5 – etil – ter – butil – éter”), producto que se utiliza como aditivo de la gasolina.

En un futuro próximo, mediante la utilización de los motores Flexi Fuel (o, en castellano, motores de combustible flexible) en combinación con la tecnología híbrida, se podrá incrementar aún más la eficiencia energética del bioetanol [70-76]. En este sentido, por ejemplo, Saab ya dispone de vehículos de demostración de estas tecnologías: su modelo Saab Aero. Además, los vehículos Flexi Fuel podrán también funcionar en el futuro con mezclas de combustibles sintéticos.

4.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación

La producción actual de bioetanol, al igual que la de biodiésel, resulta bastante más cara que la de gasolina o gasóleo, respectivamente. Por tanto, estos biocarburantes necesitan ventajas fiscales frente a los combustibles convencionales para poder competir con éstos y así estimular el mercado y fomentar su producción [14, 34, 93].

Estas rebajas impositivas son habituales en los países de la Unión Europea, aunque la producción de los biocarburantes esté todavía poco desarrollada en algunos países europeos.

España ha introducido diversas medidas legislativas para regular el sector. La Ley de Impuestos Especiales establece que, desde el 1 de enero de 2003, los biocarburantes tienen derecho a un tipo cero en el Impuesto Especial de Hidrocarburos. También están definidas, mediante el Real Decreto 61/2006 [55], las nuevas especificaciones de las gasolinas y los gasóleos, entre las que se contemplan las especificaciones que han de cumplir las mezclas directas de bioetanol con gasolina, hasta un máximo del 5% en volumen.

En cuanto a su disponibilidad en España se ha iniciado ya la venta al público de E85 en cinco estaciones de servicio (en el País Vasco, Madrid y en Valencia) y está prevista la próxima apertura de otras cuatro estaciones más en Madrid, Sevilla y Barcelona.

En lo que se refiere a los vehículos FFV que pueden utilizar gasolina o cualquier mezcla de ésta con bioetanol hasta el 85%, la tecnología utilizada tiene una fiabilidad equiparable a la de los vehículos de gasolina.

4.14 Mercado mundial

4.14.1 Situación actual

Brasil es sin duda la locomotora mundial del bioetanol. Con 15.100 millones de litros de producción anual y 14.500 millones de litros de consumo interno, el país sudamericano es líder absoluto en la producción de etanol, obtenido a partir de la caña de azúcar, y uno de los principales consumidores de este producto. Aunque el parque móvil brasileño es variopinto, la modalidad de uso más extendida es la adición directa de un 25% de biocarburante a la gasolina. Sin embargo, más de la mitad de los nuevos automóviles brasileños montan motores Flexi-Fuel capaces de utilizar mezclas de hasta el 85% de bioetanol [94].

Por su parte, EE.UU. es el mayor consumidor de bioetanol del mundo y el segundo país productor, después de Brasil, con 13.400 millones de litros. El Comité del Senado para la Energía de este país estableció en abril de 2005 el objetivo de alcanzar antes de 2012 los 8.000 millones de galones de producción (30.300 millones de litros) obtenidos a partir de maíz y de biomasa leñosa. En EE.UU. cerca del 12% de la cosecha de maíz en 2006 se destinó a la producción de bioetanol [81].

Otros países como Japón, Canadá, Tailandia, India o China tienen también un papel relevante en el mercado mundial de bioetanol.

En la figura siguiente se muestra la evolución de la producción mundial de bioetanol entre los años 2000 y 2005:

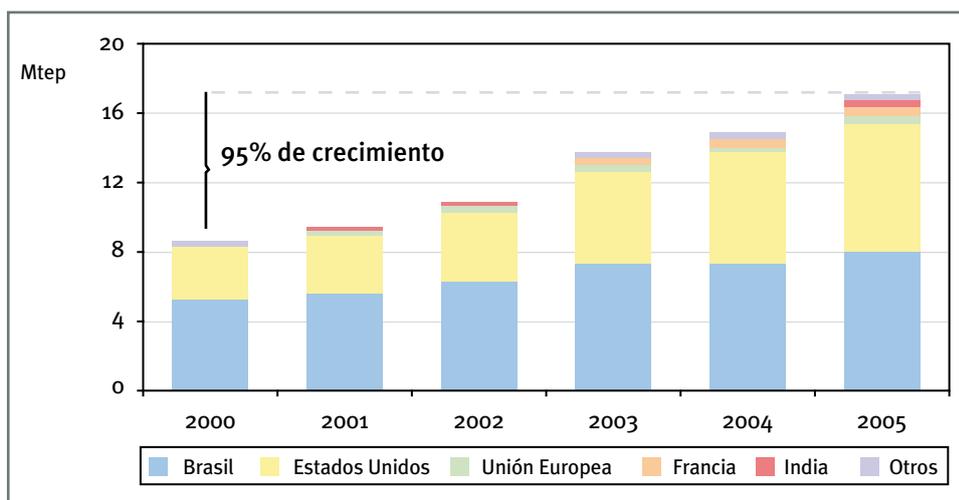


Figura 25. Evolución de la producción mundial de bioetanol entre 2000 y 2005, en millones de toneladas equivalente de petróleo - Mtep (datos de 2006)
Fuente: IEA [56]

La producción de bioetanol también ha experimentado un aumento significativo en Europa como se observa en la siguiente figura:

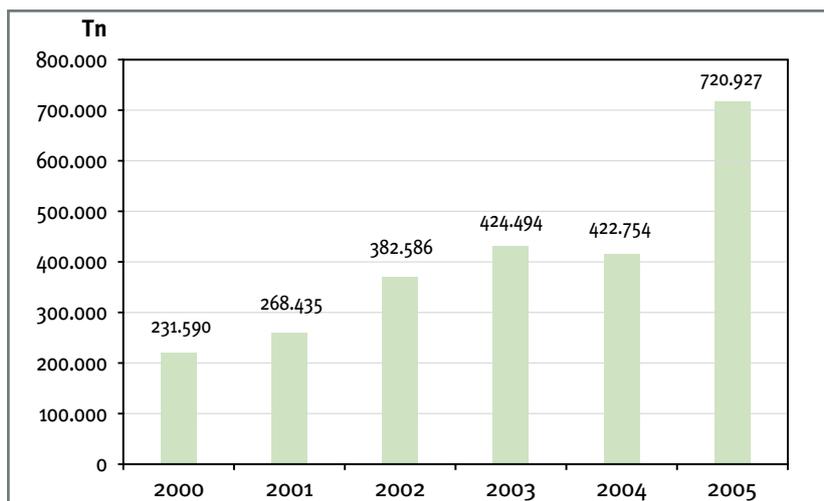


Figura 26. Producción de bioetanol en la Unión Europea desde el año 2000 hasta el año 2005 (en toneladas de bioetanol). La UE incluye 25 países desde 2004

Fuente: EurObserv'ER 2006 [57]

En España, Francia y Alemania el bioetanol no se consume directamente, sino que se añade a las gasolinas en forma de aditivo ETBE. Sin embargo, en los últimos años el número de estaciones de servicio que suministran E85 ha ascendido considerablemente en diversos países europeos. Así, en Suecia se puede repostar E85 en más de 1.000 estaciones de servicio, en Alemania en aproximadamente 300 estaciones y en Francia en cerca de 200.

En Europa, el principal consumidor europeo de bioetanol es Suecia [95, 96]. Ello se debe a las siguientes circunstancias:

- Compromiso político del Gobierno de hacer de Suecia un país independiente del petróleo en 2020. Así, Suecia ya alcanzó en su día el objetivo europeo de sustituir el 2% de combustibles fósiles en el año 2005 y, además, lo consiguió sólo con bioetanol.
- Exención a los biocarburantes del impuesto de hidrocarburos, de la tasa de CO₂, de los peajes de entrada a Estocolmo y de las zonas azules de ciertas ciudades.
- Beneficios fiscales para la compra de vehículos “ecológicos” para flotas privadas.
- Obligación de que el 75% de los vehículos públicos adquiridos en 2006 sean “ecológicos”.
- Obligación de que todas las gasolineras con ventas superiores a 1.000 m³ de carburantes (unas 2.400 gasolineras en Suecia) ofrezcan al menos un tipo de biocarburante a partir de 2009. En estos momentos, todas las gasolineras del país (unas 4.000) ofrecen E5, mientras que 360 gasolineras ofrecen ya E85.
- Es el único país europeo en el que se aprecia un desarrollo significativo del mercado de “Vehículos de Carburante Flexible” (o, en inglés, Flexible Fuel Vehicle – FFV): el 15% de todos los vehículos vendidos en Suecia son ya FFV.

La producción actual de biocarburantes en los diferentes países de la Unión Europea puede consultarse en la figura 22 mostrada en el capítulo anterior.

4.14.2 Perspectivas futuras de los biocarburantes

Como se ha indicado en el capítulo anterior, las medidas prioritarias previstas por la Comisión Europea en su estrategia para la promoción de los biocarburantes se articulan en torno a siete ejes políticos:

- Estimular la demanda de biocarburantes.
- Actuar en beneficio del medio ambiente.
- Desarrollar la producción y distribución de biocarburantes.
- Ampliar el abanico de materias primas.
- Potenciar las oportunidades comerciales de los biocarburantes.
- Apoyar a los países en desarrollo que disponen de potencial para la producción de biocarburantes.

- Continuar fomentando la investigación y la innovación a fin de mejorar los procedimientos de producción de los biocombustibles y reducir sus costes.

De este modo, en el marco del desarrollo sostenible europeo y del Libro Verde «Hacia una estrategia europea de seguridad en el abastecimiento energético», la Comisión Europea propone un verdadero plan de acción dirigido a aumentar el porcentaje de biocarburantes hasta alcanzar el 20% de todo el consumo europeo de gasolina y gasóleo en el año 2020 [97].

Así, la Directiva 2003/30/CE establece un porcentaje mínimo de biocarburantes en sustitución del gasóleo y la gasolina utilizados en el sector del transporte en cada Estado miembro. Según la citada directiva, los Estados miembros velarán por que la proporción mínima de biocarburantes comercializados en sus mercados sea del 2% en el año 2005 y del 5,75% en diciembre de 2010. Todo Estado que fije unos valores inferiores deberá justificarlo suficientemente. El objetivo de esta medida es disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros elementos como las partículas sin quemar que resultan perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

4.15 Mercado español

4.15.1 Situación actual

Dentro del contexto europeo, nuestro país es líder absoluto en la producción de bioetanol, y a una considerable distancia sobre el segundo productor, Francia. España cuenta con una capacidad productiva total de 420.000 toneladas al año, repartida en cuatro plantas de producción. En términos energéticos, las ventas nacionales de bioetanol procedentes de las plantas españolas alcanzaron en el año 2006 una cuota de mercado del 1,57% del conjunto de la gasolina de automoción consumida en España en dicho año [23]: un total de 7.248.856 toneladas equivalentes de petróleo. El consumo de carburantes en España se muestra en la figura siguiente:

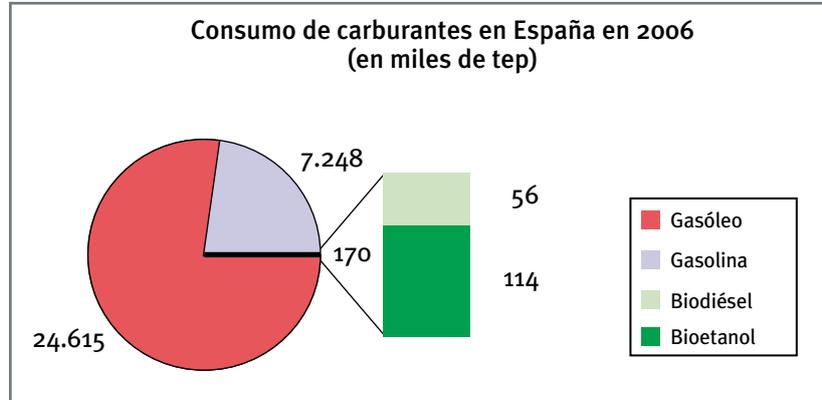


Figura 27. Consumo de carburantes en España 2006

Fuente: APPA [63], CORES [98]

Las materias primas más extendidas para la producción del bioetanol en España son los cereales, principalmente el trigo y la cebada.

La producción total de bioetanol en España en 2005 fue de 240.000 toneladas, cifra inferior a la capacidad productiva total. Esta diferencia se explica por el hecho de que algunas de las plantas existentes actualmente en España entraron en funcionamiento a final de ese año. Buena parte de estas cifras se deben a la actividad del grupo Abengoa, que es el mayor fabricante de bioetanol en la Unión Europea. Abengoa cuenta además con una presencia muy significativa en EE.UU., donde es el quinto productor. En 2006 la producción de bioetanol en España ascendió hasta las 320.000 toneladas.

La mayoría del bioetanol producido en España se destina a la fabricación de ETBE para su posterior uso como aditivo en las gasolinas, aunque la tendencia en estos momentos es emplearlo también en mezclas con gasolina. Ello se

debe a que la fabricación de ETBE está limitada por la cantidad de isobutileno (normalmente importado) disponible. El isobutileno es un producto obtenido del petróleo en las refinerías.

4.15.2 Perspectivas futuras de los biocarburantes

El papel de los biocarburantes en el Plan de Energías Renovables español

El Plan de Energías Renovables en España 2005-2010 (PER) [60], constituye la revisión del anterior Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000-2010 (PFER) [61]. Para los biocarburantes, el nuevo plan incluye objetivos mucho más ambiciosos que el antiguo. En concreto se pasa del medio millón de toneladas equivalentes de petróleo propuesto por el anterior Plan de Fomento de Energías Renovables, a los 2,2 millones de toneladas equivalentes de petróleo del actual Plan de Energías Renovables. La meta, como no podía ser de otro modo, es alcanzar los objetivos propuestos por la Directiva 2003/30/CE: sustituir con biocarburantes el 5,75% de la gasolina y del gasóleo consumido por el sector del transporte en 2010.

Tal y como recoge el Balance del Plan de Fomento de las Energías Renovables, el consumo de éstas en nuestro país ha crecido en 2.700.000 toneladas equivalentes de petróleo a lo largo del período comprendido entre 1999 y 2004. Esto supone un aumento significativo pero a la vez insuficiente para alcanzar los objetivos fijados, que han sido cumplidos únicamente en un 28,4%. Los biocarburantes son una de las tres fuentes renovables cuyo uso más se ha incrementado en este período. En 2004 se produjeron en nuestro país biocarburantes equivalentes, en términos de energía primaria, a un total de 228.200 toneladas equivalente de petróleo.

El PER plantea un escenario para los biocarburantes que permitiría alcanzar las 2.200.000 toneladas equivalentes de petróleo en 2010, como se observa en la figura siguiente en donde se representan los objetivos del Plan de Energías Renovables. Esta cantidad representaría un 5,83% del consumo de gasolina y gasóleo, un porcentaje ligeramente superior al indicado por la directiva europea sobre biocarburantes para dicho año. De alcanzarse dicho objetivo se evitarían la emisión a la atmósfera de 5.905.270 toneladas de CO₂ al año.

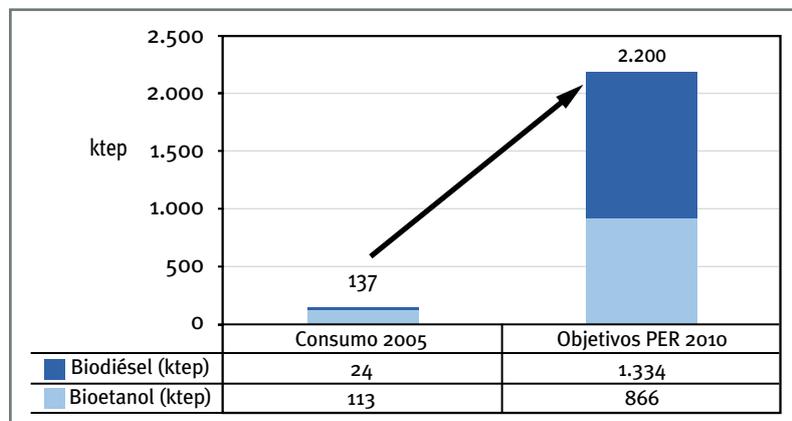


Figura 28. Objetivos de biocarburantes propuestos en el Plan de Energías Renovables de España 2005-2010
Fuente: APPA [63]

Como es lógico, el Plan de Energías Renovables no es sólo una declaración de intenciones, sino que incluye una serie de medidas para alcanzar sus objetivos. Entre las propuestas para los biocarburantes destacan la continuación de la fiscalidad actual (tipo cero en el Impuesto Especial de Hidrocarburos) durante al menos 10 años; el desarrollo de todas las posibilidades que ofrece la Política Agraria Común europea (PAC) [62], en especial las ayudas europeas y nacionales a los cultivos energéticos; y un paquete de medidas para abaratar el coste final de los aceites para biodiésel. Entre estas medidas de abaratamiento se pueden citar el desarrollo de una logística de recogida de aceites usados, o la investigación y selección de nuevas especies de plantas oleaginosas.

Las perspectivas de la industria española para alcanzar el volumen de bioetanol previsto en el Plan de Energías Renovables (866.000 toneladas equivalentes de petróleo o, lo que es lo mismo, 1.700 millones de litros) son:

- En el año 2006 entraron en funcionamiento las plantas de producción de bioetanol de “Biocarburantes de Castilla y León”, situada en Babila Fuente (Salamanca), con una capacidad de 200 millones de litros anuales, y la planta de “Bioetanol de La Mancha”, en Alcázar de San Juan (Ciudad Real), con una capacidad de 33 millones de litros anuales. Estas plantas se sumarán a las dos ya existentes (Bioetanol Galicia y Ecocarburantes Españoles), que entre ambas suman una capacidad anual de 226 millones de litros [40].
- Entre 2007 y 2010 está prevista la entrada en funcionamiento de nuevas plantas de bioetanol en, entre otras Comunidades, Cantabria, País Vasco, Castilla y León, y Cataluña. El objetivo de dichas plantas es producir los 1.150 millones de litros adicionales requeridos [60].

En cualquier caso queda claro que el objetivo de consumo de bioetanol fijado en el Plan de Energías Renovables español sólo podrá alcanzarse si se comienza a mezclar el bioetanol directamente con la gasolina, ya que la producción de ETBE (véase el apartado anterior 4.2) ha alcanzado su techo y no podrá ya incrementarse en los años siguientes debido a la falta de disponibilidad adicional de isobutileno para su fabricación.

En cuanto al biodiésel, como ya se ha explicado en el apartado 3.15, la industria española está preparada para producir el volumen de biodiésel previsto en el Plan de Energías Renovables (1.334.000 toneladas equivalente de petróleo o 1.680 millones de litros).

Retos tecnológicos y económicos [93]

En la actualidad existen algunas barreras que dificultan un mayor desarrollo de los biocarburantes en nuestro país. La primera es que su coste de producción es actualmente mayor que el coste de los productos derivados del petróleo. Por el momento esta situación se ha compensado con la eliminación del Impuesto Especial de Hidrocarburos; el precio final de los biocarburantes es equivalente al de la gasolina y el gasóleo. Sin embargo, para alcanzar mayores cotas de producción es preciso implicar al sector agrario, que hasta ahora se ha mostrado bastante reacio a entrar en el negocio de los cultivos energéticos. Para ello, como bien señala el Plan de Energías Renovables (PER), será necesario explorar al máximo las subvenciones y ayudas de la Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC), al mismo tiempo que también resultará imprescindible dedicarle mayores esfuerzos a la investigación de nuevas especies vegetales y procesos productivos más eficientes. Con la tecnología actual, tanto en EE.UU. como en Europa la producción de un volumen tal de biocarburantes que permitiera sustituir el 10% del combustible total utilizado en el transporte requeriría la puesta en cultivo del 40% de sus respectivas superficies. Brasil e India, gracias fundamentalmente a su clima, podrían suministrar “sin gran esfuerzo” el equivalente al 10% de toda la gasolina que se consume en el mundo, según datos de la Agencia Internacional de la Energía (o, en inglés, International Energy Agency - IEA).

Sin embargo, esta situación podría dar un vuelco gracias a los últimos avances en técnicas de ingeniería genética. Hasta ahora, los biocarburantes se obtenían aprovechando pequeñas partes de la biomasa. En el caso del biodiésel se aprovechan los aceites contenidos en las semillas y en los frutos de ciertas plantas, mientras que el bioetanol se obtiene a partir de azúcar y almidón. Esto obliga a producir grandes cantidades de biomasa para obtener pequeñas cantidades de biocarburantes. Sin embargo, está surgiendo una nueva generación de biocarburantes que podrían solucionar este problema. El secreto está en unas enzimas modificadas genéticamente para producir glucosa directamente a partir de la celulosa. Esto supondría un gran adelanto con respecto al actual sistema de fermentación, ya que permitiría obtener bioetanol a partir de la paja residual. La empresa canadiense IOGEN ya cuenta con una planta de producción que utiliza esta tecnología y Shell Oil ha invertido 46 millones de dólares para que IOGEN construya unas instalaciones con capacidad para producir 200.000 toneladas de bioetanol anuales a partir del 2008 empleando esta técnica.

Ahora el reto está en obtener especies de crecimiento rápido y con gran volumen de masa vegetal, ya que con las nuevas técnicas no importa el tamaño de la fruta o las semillas. Según un estudio publicado por el Laboratorio Nacional Oak Ridge del Departamento de Energía de EE.UU., aplicando estas técnicas el país norteamericano podría obtener el 30% de su consumo de gasolina para 2030, sin modificar en exceso el uso actual del suelo y sin afectar a su producción alimentaria.

Otro de los retos a superar en estos momentos es la adopción por parte de todos los fabricantes de unos estándares de calidad comunes. Actualmente son pocos los constructores de automóviles que garanticen sus mecánicas para su uso con biocarburantes cuyo porcentaje supere el 5% (hasta dicho porcentaje no es necesario ningún tipo de etiquetado especial ni advertencia a los consumidores). Sería necesario un acuerdo entre los fabricantes de automóviles, los productores de biocarburantes y las administraciones para establecer una serie de características técnicas normalizadas.

Posibles medidas

Dado que la industria petrolera española no comercializa voluntariamente mezclas directas de bioetanol y gasolina, se podría contemplar la posibilidad de implementar en España un sistema de “obligación de biocarburantes” que impusiera cuotas específicas para el bioetanol, el biodiésel y el biogás. La nueva medida debería compatibilizarse con el actual incentivo fiscal.

Además de la reciente implantación de un sistema de “obligación de consumo de biocarburantes”, podrían ponerse en práctica una serie de medidas, muchas de ellas ya contempladas en el propio PER o en la Estrategia Europea de Biocarburantes, como:

- Garantizar los actuales incentivos fiscales por un plazo de al menos 10 años.
- Aumentar del 5% al 10% el porcentaje de biocarburante admitido en la gasolina y el gasóleo sin necesidad de etiquetado (EN 228 y EN 590, respectivamente).
- Actualizar las especificaciones para mezclas superiores de biocarburantes.
- Adaptar la red de logística de hidrocarburos para la introducción de los biocarburantes.
- Desarrollar decididamente los cultivos energéticos en España para asegurar la máxima producción autóctona. Mejora de las condiciones de la Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC).
- Obligar a los fabricantes de vehículos a garantizar su uso con biocarburantes.
- Fomentar la adquisición de vehículos de combustible flexible (o, en inglés, Flexible Fuel Vehicle – FFV), por parte tanto de clientes privados como de administraciones públicas.
- Estudiar la posibilidad de contabilizar el uso de biocarburantes como parte de los objetivos de reducción de las emisiones de CO₂ de los vehículos.
- Realizar una campaña informativa sobre biocarburantes.

4.15.3 Factores clave

Como se ha indicado en el capítulo anterior, algunos de los factores clave para el desarrollo de los biocarburantes son:

- Revisión de la normativa y del nivel de su cumplimiento.
- Fiscalidad energética.
- Parque nacional de vehículos.
- Consumo de biocarburantes.
- Obtención de cultivos energéticos.
- Distribución y logística.
- Beneficios ambientales del uso biocarburantes.
- Protocolo de Kioto.

Por otro lado, algunos de los factores clave para el desarrollo de los cultivos energéticos son:

- Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC): aumento de la ayuda de 45 euros por hectárea.
- Reglamentación adecuada.
- Desarrollo de un mercado que sea independiente del sector alimentario.
- Precio garantizado.
- Adquisición de derecho de cuota.
- Contrato marco con productores.
- Medidas de ahorro energético.
- Medioambiental, coste sanitario, desarrollo rural, dependencia energética...

4.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

Los primeros fabricantes en ofrecer vehículos de combustible flexible en Europa son:

- Ford: modelos Focus FFV y Focus C-max FFV [70]
- Saab: modelos 9-3 BioPower y 9-5 BioPower [71]
- Volvo: modelos V50 F, Volvo S40 F y Volvo C30 F [72]
- Renault: modelo Megane [73]
- Peugeot: modelo 307 Bioflex [74]
- Citroën: modelo C4 Bioflex [75]

Además, durante el año 2007 se planeaba que también estuviesen disponibles los modelos Octavia Flexifuel 1.6 de Skoda y los Volkswagen Golf y Caddy 1.6. Audi y Seat también habían anunciado la introducción de coches impulsados por etanol en 2007.

Por su parte, Scania ofrece autobuses de etanol que funcionan con E95 [71]. Están impulsados por un motor diésel modificado y el combustible está formado por etanol y un 5% de aditivo mejorador del encendido. El motor de etanol es tan eficiente energéticamente como el que utiliza diésel convencional, si bien se necesita un volumen de etanol superior en un 40-50% al volumen equivalente de diésel, debido al menor contenido energético del etanol.

Entre las experiencias destacadas en este campo, España cuenta con dos zonas de demostración dentro del proyecto de la Comisión Europea BEST (Bioetanol para el Transporte Sostenible o, en inglés, Bio-Ethanol for Sustainable Transport), en Madrid y el País Vasco. En estas regiones funcionan flotas de vehículos y surtidores de combustible privados que operan con total satisfacción y cuyo objetivo es difundir y promocionar el uso del bioetanol en el transporte. Como resultado de esta experiencia, la Empresa Municipal de Transporte de Madrid anunció con fecha 2 de abril de 2007 la puesta en circulación de cinco nuevos autobuses que utilizan bioetanol como combustible.

Por otro lado, la empresa Fomento de Construcciones y Contratas (FCC) ha equipado los siete distritos del centro de Madrid con una 'flota verde' de vehículos de limpieza. Una flota compuesta por 166 vehículos propulsados por energías limpias: bioetanol, gas natural comprimido o electricidad. Quince de estos vehículos son híbridos eléctricos-diésel. Además se ponen en marcha otros 15 vehículos de inspección propulsados por bioetanol.

El Parque Móvil del Estado tenía previsto incorporar, entre junio y septiembre de 2007, 80 vehículos de combustible flexible para funcionar con E85 y una estación de bioetanol, lo que movilizaría un suministro de más de 35.000 litros de carburante al año.

Asimismo es destacable, por lo que atañe a la tecnología y al empleo en la industria del automóvil en España, que en Valencia se fabrican todos los motores flexibles de E85 de Ford y Volvo que se comercializan en Europa, y que Renault y Peugeot-PSA también fabrican en España sus vehículos flexibles para E85.

5 Combustibles sintéticos

5.1 Definición y características básicas

Los **combustibles sintéticos** son combustibles obtenidos mediante procesos termoquímicos a partir de diferentes materias primas: principalmente gas natural, carbón y biomasa. Atendiendo a su materia prima de origen se contemplan tres tipos de combustibles sintéticos [100-102]:

- “Gas a líquido” o GTL (en inglés, Gas To Liquid) – materia prima gas natural.
- “Carbón a líquido” o CTL (en inglés, Coal To Liquid) – materia prima carbón.
- “Biomasa a líquido” o BTL (en inglés, Biomass To Liquid) – materia prima biomasa.

Por extensión también puede usarse el término “combustible sintético” para designar otros productos combustibles como el metanol, el dimetiléter o el butano.

Los combustibles sintéticos obtenidos de la biomasa suelen llamarse también biocombustibles, aunque lo habitual es reservar el término “biocombustible” para el bioetanol y el biodiésel. Entre el combustible “biomasa a líquido” (BTL), por un lado, y el bioetanol y el biodiésel, por otro, existe una importante diferencia: mientras que en el caso de estos dos últimos su proceso de fabricación se basa en la fermentación de azúcares, almidones, celulosas o aceites, en el caso del combustible “biomasa a líquido” (BTL) su fabricación se realiza mediante otro tipo muy diferente de transformación termoquímica, como se verá a continuación.

5.2 Obtención y materias primas

Las materias primas utilizadas para el GTL, CTL y BTL son, respectivamente, gas natural, carbón y biomasa. En el caso de las materias primas del combustible “gas a líquido” (GTL) y del combustible “carbón a líquido” (CTL), gas natural y carbón respectivamente, éstas siguen siendo combustibles fósiles no renovables. Por ello, y como sucede con los combustibles convencionales, tanto el GTL como el CTL siguen amenazados por los problemas de agotamiento de su materia prima y de dependencia de factores estratégicos geopolíticos.

En cuanto a los procesos de obtención, tres son los principales procesos de producción de los combustibles sintéticos [103, 104]:

- Licuefacción directa del carbón. En este caso, los productos obtenidos son ricos en componentes aromáticos, lo cual los hace poco aptos para satisfacer las especificaciones actuales de los combustibles de automoción.
- Producción de gas de síntesis ($\text{CO} + \text{H}_2$) mediante un proceso de reformado con vapor, seguido a continuación de otro proceso de síntesis Fischer-Tropsch.
- Producción de gas de síntesis seguida de síntesis de metanol y, a continuación, transformación del metanol en gasolina y/o gasóleo.

Conviene señalar que tanto los productos de la licuefacción directa como los obtenidos mediante síntesis de Fischer-Tropsch requieren una etapa de hidrotreamiento que tiene como objetivo aumentar su calidad hasta niveles comercializables. En el caso de la licuefacción directa el consumo de hidrógeno en dicha etapa es mucho mayor y la calidad de los productos obtenidos es menor [105, 106].

Los procesos detallados de obtención de los combustibles sintéticos son los siguientes:

- 1 El proceso de producción del GTL a partir de gas natural (metano) consta de distintos pasos como se muestra en la figura siguiente [107]. En el primer paso, el oxígeno (O_2) separado del aire es insuflado en un reactor junto con el metano (CH_4). Los productos resultantes son ya gases sintéticos: hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO). Éstos pasan a un reactor Fischer-Tropsch donde los catalizadores ayudan a reformar los gases

en moléculas de hidrocarburos de cadena larga. Los hidrocarburos de cadena larga son cargados en una unidad de craqueo (o ruptura de la cadena) que mediante, básicamente, calor y presión los descomponen en hidrocarburos de cadena más corta como diésel u otros combustibles líquidos, además de nafta y ceras.

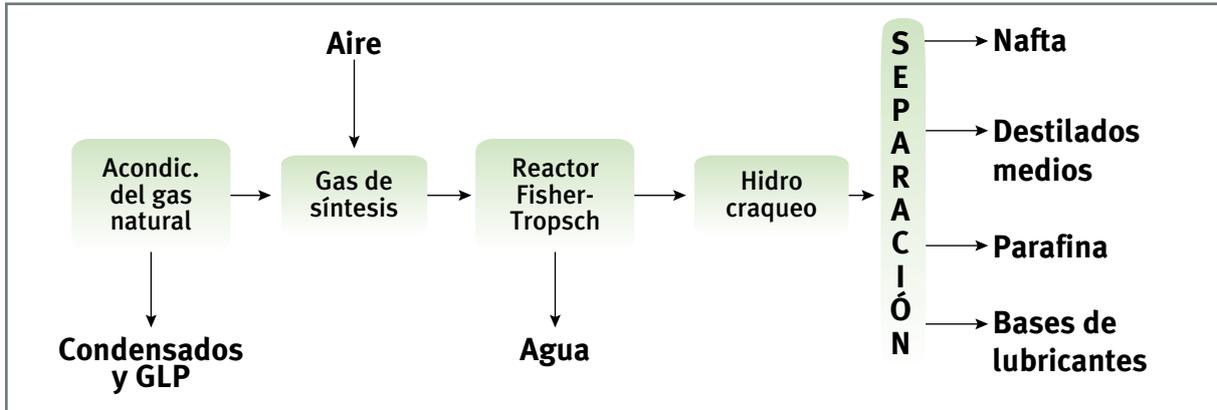


Figura 29. Esquema del proceso “gas a líquido” (GTL)

Fuente: Enagás

2 El proceso BTL es análogo al anterior, con la diferencia de que el gas de síntesis se obtiene mediante gasificación de la biomasa en lugar de utilizar gas natural [108,109].

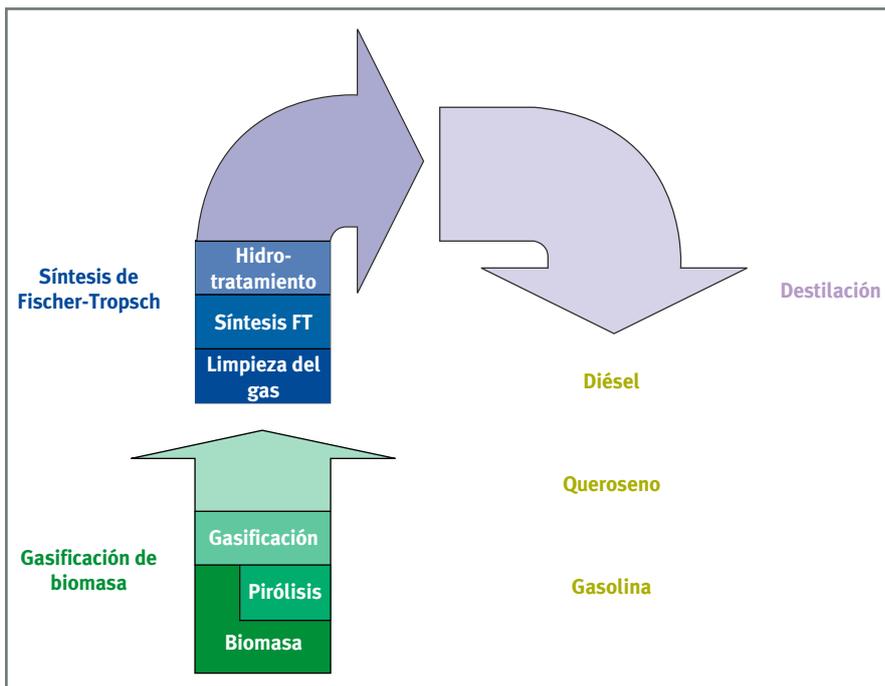


Figura 30. Esquema del proceso “biomasa a líquido” (BTL)

Fuente: Volkswagen AG [108, 109]

Algunos de los biocarburantes de segunda generación que se estudiarán en el capítulo siguiente se obtienen a partir de biomasa lignocelulósica utilizando esta tecnología “biomasa a líquido” o BTL.

3 El proceso CTL, por último, es similar a los dos anteriores, con la diferencia de que el gas de síntesis se obtiene utilizando carbón como materia prima en lugar de gas natural o biomasa [110].

5.3 Almacenamiento. Manipulación

5.3.1 Almacenamiento

El almacenamiento depende del combustible sintético en cuestión, pero en general es similar al almacenamiento de otros combustibles. Así, el diésel obtenido por procedimientos Fischer-Tropsch puede utilizarse bien sólo o bien mezclado con diésel fósil, en cualquiera de los dos casos, el almacenamiento es convencional.

5.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

La manipulación y las precauciones de seguridad que deben adoptarse en el caso de los combustibles sintéticos son similares a las de los combustibles convencionales.

Además, el combustible sintético puede utilizar la infraestructura existente en las estaciones de servicio actuales ya que el combustible sintético es un combustible líquido de gran pureza con unas características físicas similares a las de la gasolina o el diésel [101]. Consecuentemente, la red actual de estaciones de servicio puede continuar siendo utilizada sin problemas.

5.4 Comercialización

Actualmente aún no se ha extendido la comercialización de los combustibles sintéticos, pero es probable que se empiecen a comercializar en los próximos años, sobre todos aquellos combustibles sintéticos obtenidos a partir de la biomasa.

5.5 Modificaciones

Puesto que los combustibles sintéticos son combustibles de gran calidad, con características muy similares a las de los carburantes convencionales, no se espera que exijan grandes cambios técnicos en los vehículos.

Además, el combustible sintético permite el uso de otras tecnologías de optimización del motor tales como la tecnología de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y la tecnología de autoencendido controlado (CAI). Estos sistemas de combustión combinan dos ventajas clave: menores emisiones en los motores de gasolina y menor consumo en los motores Diesel [110].

5.6 Funcionamiento y mantenimiento

El funcionamiento y el mantenimiento de los vehículos que utilicen en el futuro combustibles sintéticos será previsiblemente el mismo que en el caso de los vehículos convencionales.

5.7 Ventajas

- Los combustibles sintéticos se pueden elaborar a partir de multitud de materias primas y de fuentes de energía: carbón, gas natural y muchos tipos de biomasa. Una variedad que posibilita una gran diversificación energética.
- El proceso “gas a líquido” (GTL) es una forma de rentabilizar el gas disponible, algo cada vez más interesante para los países con importantes reservas gasistas (por ejemplo Qatar) [111, 112].
- La conversión del “carbón a combustible líquido” (CTL) es una vía de independencia energética, especialmente para algunos países con grandes reservas de carbón como China o EE.UU. [113, 114].
- El BTL facilita el crecimiento sostenible y produce uno de los tipos de biocarburantes de segunda generación. Este tipo de biocarburantes está siendo activamente promovido en Europa.

5.8 Desventajas

- Se trata de tecnologías incipientes poco desarrolladas a nivel industrial.
- Coste elevado de los procesos de síntesis y de las instalaciones.

5.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de certificación del gasóleo • No es económicamente viable para precios inferiores a 30 euros cada barril de petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> • Desconfianza de las empresas • Reducción del precio en caso de exceso de oferta • Mayor emisión de CO₂ si se utiliza gas natural como materia prima en comparación con la utilización directa de gas natural
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Precio competitivo a partir de 30 euros cada barril de petróleo • Menor dependencia (diversificación) • Mejor comportamiento medioambiental. Reducción de las emisiones de NO_x, SO_x, componentes aromáticos y partículas • Excelente imagen • Generalmente pueden utilizar la infraestructura de distribución existente 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología disponible • Nuevo segmento de aplicación para el gas natural (GTL) y el carbón (CTL) • Nicho en zonas de temperaturas extremas • Mejora de la rentabilidad por el posible aumento del precio del petróleo

El análisis anterior se centra principalmente en el uso de combustibles producidos por síntesis Fischer-Tropsch a partir de gas natural (GTL) en comparación con la utilización directa del gas natural. Algunas de las debilidades y amenazas a las que está sometido el biocarburante “gas a líquido” (GTL) pueden resolverse si se utiliza la biomasa como materia prima.

5.10 Balance de emisiones

El balance de emisiones que se presenta en esta sección se centra principalmente en los combustibles diésel obtenidos mediante procesos de síntesis Fischer-Tropsch (o, de modo abreviado, procesos FT) [101].

El gasóleo sintético contribuye a reducir las emisiones en todos los motores, especialmente durante la fase de arranque en frío. La excepción son las emisiones de NO_x, que no se ven alteradas [101]. Además tiene las ventajas de apenas contener azufre (con lo cual cumple de forma natural las duras reglamentaciones en vigor en Europa) y de tener un alto índice de cetano, gracias a su bajo contenido en compuestos aromáticos [115].

Combustible “gas a líquido” GTL [116-118]

El combustible sintético más habitual en la actualidad es el “gas a líquido” o GTL. El uso de diésel GTL, con un mayor número de cetanos que el diésel convencional, en vehículos sin modificar y comparado con el combustible diésel libre de azufre, ofrece reducciones significativas en las emisiones de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y partículas (PM). También contribuye a reducir las emisiones de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO)

durante la fase de arranque en frío. Además, los combustibles “gas a líquido” (GTL) permiten mayores índices de recirculación de gases de escape (o, en inglés, Exhaust Gas Recirculation - EGR). La recirculación de los gases de escape puede utilizarse para reducir las emisiones de NO_x . Así, para el combustible “gas a líquido” (GTL) se predicen reducciones del 35% en las emisiones de NO_x y de partículas.

Por su parte, las mezclas de diésel GTL con gasóleo convencional siguen proporcionando notables mejoras en cuanto a las emisiones de NO_x y de partículas: un 20% de mezcla de diésel GTL con gasóleo convencional supone un 43% de reducción de emisiones, mientras que, un 50% de mezcla supone un 86% de reducción. En la fase de arranque en frío la mayor reducción se obtiene para el CO (70-75%), seguido de los HC (70%) y de las partículas (60%). Estas reducciones se muestran en la gráfica siguiente:

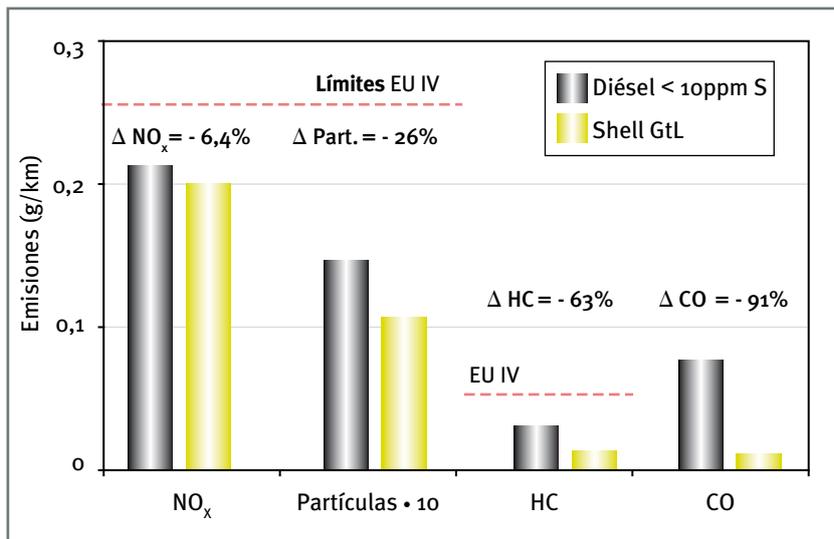


Figura 31. Comparación entre las emisiones del combustible diésel con bajo contenido en azufre y las emisiones del combustible sintético Shell GTL (g/km)

Fuente: Shell [117]

El proceso GTL permite obtener un combustible diésel de alta calidad a partir del gas natural. Sin embargo, las emisiones globales de gases de efecto invernadero son superiores a las del combustible diésel convencional. Por otro lado, el diésel “gas a líquido” es un combustible con un mayor número de cetanos que el diésel convencional.

Combustibles “carbón a líquido” (CTL) y “biomasa a líquido” (BTL) [119-121]

Las características de las emisiones del diésel “carbón a líquido”, o CTL, son parecidas a las características del combustible “gas a líquido” o GTL. Sin embargo, existen algunas diferencias. La emisión total de CO_2 para el caso del combustible obtenido de carbón vía FT (CTL) es aproximadamente dos veces superior a la del mismo tipo de combustible obtenido mediante refinado de petróleo. El CO_2 no es emitido en la reacción de Fischer-Tropsch (FT) propiamente dicha sino en la etapa previa de gasificación y en la posterior combustión del gas de síntesis sobrante.

Si bien el proceso de gasificación permite en teoría la captura y secuestro del CO_2 generado, en el año 2006 aún no existía ninguna planta de gasificación a escala industrial que incluyera esta posibilidad.

Como se ha indicado, el proceso de fabricación del combustible “gas a líquido” o GTL produce unas emisiones globales de gases de efecto invernadero que son superiores a las del combustible diésel convencional. Sólo si se utiliza biomasa como materia prima para producir combustible “biomasa a líquido” (BTL) el proceso de síntesis Fischer-Tropsch puede alcanzar un nivel de emisiones de gases de efecto invernadero inferiores a las del combustible convencional obtenido del petróleo.

5.11 Balance energético [101, 103, 122]

El balance energético dependerá del combustible concreto de que se trate y del proceso de síntesis utilizado. Uno de los biocarburantes de segunda generación que más se está fomentando en Europa es el gasóleo obtenido

mediante síntesis Fischer-Tropsch. Si se utiliza gas natural como materia prima, y desde el punto de vista de la eficiencia energética global, la utilización del proceso “gas a líquido” (GTL) para producir diésel es menos eficiente que el uso directo del gas natural. En el caso de este proceso “gas a líquido” (GTL) la eficiencia energética puede situarse en torno al 60%.

Como se ha indicado, este análisis puede ser diferente cuando se utiliza biomasa como materia prima para la producción del combustible “biomasa a líquido” (BTL).

5.12 Potencial tecnológico

La gasificación para la producción del gas de síntesis permite separar fácilmente una gran parte del CO₂ generado. Ello permitiría, en teoría, su captura y secuestro a largo plazo, haciendo compatible este proceso con el protocolo de Kioto para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la licuefacción directa no permite el secuestro de CO₂ ni siquiera de modo teórico [123].

Por otro lado, las menores emisiones contaminantes de los combustibles sintéticos permiten un rango de operación más amplio y con mayores exigencias o cargas en los motores. Esto permite que el tratamiento de los gases de combustión sea más sencillo.

Asimismo, los combustibles FT permiten elegir la materia prima inicial (carbón, gas o biomasa).

5.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación [103]

El gasóleo obtenido mediante el proceso Fischer-Tropsch es un combustible con fácil salida al mercado por su bajo contenido en azufre y su alto índice de cetano [113]. Sin embargo, las plantas FT son caras de construir y presentan toda una serie de problemas medioambientales. Así, su uso únicamente se justifica cuando el petróleo sea particularmente caro o escaso y cuando se disponga de una fuente alternativa de hidrocarburos barata o cercana como, por ejemplo, carbón, gas natural, desechos vegetales o residuos pesados de refinerías.

La producción de gasolina y gasóleo a partir de carbón y mediante el proceso Fischer-Tropsch (FT) supondría un avance desde el punto de vista de la independencia energética de los países que dispongan de carbón pero no de petróleo, aunque sería negativa en cuanto al impacto sobre el cambio climático.

Por otro lado, el proceso Fischer-Tropsch (FT) no es la única vía para convertir el carbón en combustible líquido. La principal alternativa es la licuefacción directa del carbón, aunque también ésta sufre de desventajas similares a las del proceso FT [109].

En cuanto al combustible “gas a líquido” (GTL), éste sólo es rentable económicamente cuando algún obstáculo impida la comercialización directa del gas. Ello ocurre, por ejemplo, en yacimientos pequeños situados lejos de los terminales de licuefacción del gas.

Sin embargo, por el momento tanto el gasóleo como la gasolina y los demás productos que se obtienen mediante el proceso Fischer-Tropsch (FT) pueden obtenerse de forma más sencilla y barata mediante el refinado de petróleo.

A continuación se realiza una valoración multicriterio de los diferentes combustibles sintéticos [124]:

	GTL	CTL	BTL	Crudo
Tecnología (inversión)	Demo/industrial (alta)	Industrial (muy alta)	Piloto/demo (muy alta)	Industrial (media)
Reserva energía (coste)	Concentrada (bajo)	Extensa (muy bajo)	Extensa pero competitiva (bajo)	Muy concentrada (medio)

(Continuación)

	GTL	CTL	BTL	Crudo
Calidad y Medioambiente	Diésel de alta calidad	Altas amisiones de CO ₂	Renovable (créditos CO ₂)	Estándar
Punto de vista de gobiernos	Opción para monetizar gas	Forma de asegurar energía	Potenciación crecimiento sostenible	Dependencia energética

Tabla 5. Comparación multicriterio entre los combustibles “gas a líquido”, “biomasa a líquido” y “carbón a líquido” (GTL/BTL/CTL)
Fuente: Repsol YPF [99]

5.14 Mercado mundial

5.14.1 Situación actual

No existe ningún ejemplo actual de planta industrial que realice licuefacción directa del carbón. Las plantas que actualmente realizan procesos de Fischer Tropsch se recogen en la siguiente tabla [103, 124, 125]:

Ubicación	Empresa	Fecha de apertura	Origen del gas de síntesis
Sasolburg (Sudáfrica)	Sasol Chemicals	1955	Hasta 2004, carbón; desde 2004, gas natural
Secunda (Sudáfrica)	Sasol Synfuels	1979	Carbón
Bintulu (Malasia)	Shell	1993	Gas natural
Mossel Bay (Sudáfrica)	PetroSA	1993	Gas natural
“Oryx” (Qatar)	Sasol Chevron y Qatar Petroleum	Construcción finalizada	Gas natural
Escravos (Nigeria)	Chevron y Nigeria NPC	En construcción	Gas natural
“Pearl” (Qatar)	Shell y Qatar Petroleum	En construcción	Gas natural
ErDOS (Mongolia Interior, China)	Yitai	En construcción	Carbón

Tabla 6. Plantas de producción de combustible sintético según el método Fischer-Tropsch (datos de febrero de 2007)
Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

5.14.2 Perspectivas de futuro de los combustibles sintéticos

La producción de los combustibles sintéticos se basa en dos procesos secuenciales: la gasificación y el proceso catalítico de Fischer-Tropsch [102]. La necesidad de combinar procesos y tecnologías, y la variedad añadida de sistemas y opciones, hace que el desarrollo de plantas económica y ambientalmente viables sea mucho más complejo, por ejemplo, que la construcción de una planta de etanol.

En la fabricación de los combustibles sintéticos hay actualmente numerosas cuestiones que resolver. Éstas incluyen:

- La decisión sobre la ruta de gasificación apropiada y la tecnología del gasificador. Existen dos procesos alternativos principales:
 - El primero consiste en una trayectoria de alta temperatura y un solo paso en el que se eleva la materia prima directamente hasta los 1.300 °C. Este proceso es similar al sistema de gasificación del carbón. Se trata de un proceso usado por Shell, Uhde, Future Energy o Chemrec, entre otras compañías [126].
 - El segundo es un proceso de dos etapas con menor temperatura media. Este proceso permite una mayor optimización general y la depuración intermedia de los gases, aunque también tiene alguna desventaja como la mayor formación de partículas. Este proceso es utilizado, entre otras empresas, por Choren y Värnamo/Chrisgas [126].
- Aspectos específicos de la utilización de la biomasa en un gasificador como son la alimentación sólida, el pretratamiento del flujo de entrada de los gasificadores, etc.
- Flexibilidad del combustible.
- Optimización de la calidad del gas de síntesis.

El nivel de emisiones de CO₂ en estos procesos depende de aspectos como: la tecnología del proceso propiamente dicha; la fuente de energía utilizada para el proceso (si, por ejemplo, sólo se utiliza la biomasa o si también se emplea alguna otra fuente de energía externa); y la circunstancia de si la biomasa es un producto de deshecho (por ejemplo, paja) o, al contrario, es un cultivo energético. Este último aspecto, la fuente de la biomasa, también afecta significativamente al coste final del combustible.

En los años próximos se esperan mejoras significativas tanto en las emisiones de CO₂ como en el balance de energía. En Europa, Choren está desarrollando una planta piloto a gran escala (15.000 toneladas al año) en Freiberg, Alemania. Además, Choren y Shell están en camino de desarrollar un prototipo a escala real de una planta comercial con una capacidad de 200.000 toneladas al año. Esta planta comercial, dependiendo de los resultados obtenidos en la planta piloto, podría estar operativa en 2009 ó 2010 [127].

También se están preparando soluciones híbridas de biocombustibles de primera y segunda generación. Así, Neste Oil, en Finlandia, está ampliando su refinería de Porvoo para utilizar aceite vegetal y grasa animal como materia prima en un proceso de hidrogenación convencional (utilizando hidrógeno producido en la propia refinería) [128]. El combustible sintético resultante (NExBTL) tiene las mismas calidades y características que los combustibles “biomasa a líquido” (BTL) o “gas a líquido” (GTL), con la ventaja de que exige una menor inversión inicial, si bien son mayores los costes de su materia prima (costes cercanos al biodiésel convencional). Esta planta de NExBTL, con capacidad para producir 170.000 toneladas al año, se esperaba que entrara en funcionamiento en el verano de 2007 [129].

Además, Neste también ha firmado un acuerdo con Total para evaluar las posibilidades de construir conjuntamente una planta de NExBTL a gran escala adyacente a una de las refinerías de petróleo de Total, con la intención de comenzar la producción en 2008 [130, 131].

Es de destacar también la creación de la Alianza para los Combustibles Sintéticos en Europa (o, en inglés, Alliance for Synthetic Fuels in Europe - ASFE), formada por los grupos automovilísticos DaimlerChrysler, Renault y Volkswagen AG, y por las compañías energéticas Royal Dutch, Shell y Sasol Chevron. El objetivo de esta alianza es la promoción de los combustibles sintéticos [102].

5.15 Mercado español

5.15.1 Situación actual

En España se está desarrollando un proyecto de investigación relacionado con los combustibles sintéticos denominado proyecto ACES. El proyecto ACES es un proyecto de investigación liderado por el grupo Abengoa junto con el Centro

Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) español. El proyecto se desarrolla en las instalaciones del Instituto de Catálisis y Petroquímica (ICP) en Madrid, en donde también se están llevando a cabo otros proyectos liderados por la empresa Abengoa Bioenergy R&D (ABRD) [132]. El principal objetivo de ACES es el desarrollo de un catalizador capaz de producir etanol a partir de gas de síntesis, gas que como se ha indicado consiste fundamentalmente en hidrógeno y monóxido de carbono. Este paso es la clave para la vía termoquímica de la obtención de etanol a partir de biomasa. El catalizador que se desarrollará se integrará y utilizará en otros proyectos de investigación de ABRD como catalizador en el reactor de síntesis.

5.15.2 Perspectivas de futuro de los combustibles sintéticos

Véase el apartado anterior 5.14.2.

5.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

Ya se han realizado algunas experiencias de utilización de diésel GTL en vehículos diésel convencionales. En 2003 una flota de 25 Volkswagen Golf TDI circuló durante cinco meses en Berlín utilizando el combustible “gas a líquido” (GTL) obtenido con tecnología de la compañía Shell a partir de gas natural. Las pruebas realizadas por Volkswagen indican que los vehículos reducirían sus efectos contaminantes si utilizaran este combustible [115].

6 Biocarburantes de segunda generación

6.1 Definición y características básicas

Para solventar las limitaciones de los biocarburantes de primera generación, principalmente sus exigencias de grandes extensiones de cultivo de la materia prima, se están desarrollando una serie de **biocarburantes de segunda generación** [133, 134]. Estos biocarburantes proporcionan la posibilidad de utilizar biomasa lignocelulósica como materia prima (por ejemplo paja), lo que reduce notablemente las extensiones de tierra utilizadas.

Los biocarburantes de segunda generación incluyen los siguientes combustibles: “biomasa a líquido” o BTL (principalmente diésel sintético Fischer-Tropsch), bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica y biogás.

Entre los biocarburantes de segunda generación que se obtienen a partir de la biomasa utilizando para ello la tecnología de producción del combustible “biomasa a líquido” o BTL, actualmente están en desarrollo los siguientes:

- Bio-hidrógeno [135].
- Bio-dimetil éter (bio-DME) [136].
- Biometanol [137].
- Diésel mejorado de alta temperatura (o, en inglés, High Temperature Upgrading - HTU) [135].
- Diésel sintético Fischer-Tropsch [136].
- Mezcla de alcoholes: por ejemplo, mezcla de etanol, propanol y butanol, con pequeñas proporciones de pentanol, hexanol, heptanol y octanol.

Todos estos biocombustibles utilizan para su producción gas de síntesis obtenido de la gasificación de la biomasa.

6.2 Obtención y materias primas

La materia prima utilizada para la producción de los biocarburantes de segunda generación es la biomasa lignocelulósica [133, 134].

Existen diferentes procesos de producción u obtención de los biocarburantes de segunda generación:

- Los combustibles “biomasa a líquido” (BTL) se obtienen mediante la producción de gas de síntesis seguida de procesos de síntesis Fischer-Tropsch (FT), como se ha explicado anteriormente [106, 107, 138, 139].
- La producción de etanol a partir de materia prima lignocelulósica incluye un pre-tratamiento de la biomasa para liberar la celulosa y la hemicelulosa; un proceso de hidrólisis (descomposición química de un compuesto al reaccionar con el agua) para obtener azúcares de 5 ó 6 átomos de carbono; un proceso de fermentación del azúcar; la separación de los residuos sólidos y la celulosa no hidrolizada; y, finalmente, la destilación del producto resultante hasta el grado de combustible. Para optimizar esta cadena de transformaciones se están investigando nuevos procesos químicos y enzimáticos. Es importante considerar que algunos de los residuos sólidos y de los productos secundarios obtenidos de estos procesos pueden provocar, como efecto secundario indeseable, la inhibición de la hidrólisis. Afortunadamente, dichos residuos y subproductos pueden normalmente ser aislados y reutilizados durante el proceso de producción, reduciendo así los costes finales y las emisiones [140, 141].
- El biogás se produce típicamente mediante digestión anaerobia (es decir, en ausencia de oxígeno) de materias primas agrícolas o materiales de desecho [142].

6.3 Almacenamiento. Manipulación

6.3.1 Almacenamiento

El almacenamiento depende del biocarburante de que se trate, pero en general el tratamiento es similar al del combustible fósil al que sustituyen. Así, el diésel obtenido por procesos Fischer-Tropsch puede utilizarse sólo o mezclado con diésel fósil, y el almacenamiento es, en cualquiera de los dos casos, convencional. Para el dimetil-éter (DME) el almacenamiento es similar al del gas licuado del petróleo (GLP) [143- 144].

6.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

La manipulación y las precauciones de seguridad son similares a las de los combustibles análogos convencionales.

6.4 Comercialización

Actualmente aún no se ha extendido la comercialización de estos combustibles de segunda generación, aunque dado el impulso que se les está dando últimamente, es probable que se comiencen a comercializar en los próximos años.

6.5 Modificaciones

No son necesarias modificaciones importantes en los vehículos para funcionar con BTL, ya que se trata de un combustible de gran calidad con características muy similares a las de los carburantes convencionales.

A su vez, el etanol producido a partir de biomasa lignocelulósica tampoco presenta grandes diferencias con respecto al bioetanol de primera generación.

6.6 Funcionamiento y mantenimiento

El funcionamiento y mantenimiento de los vehículos que utilicen biocarburantes de segunda generación será previsiblemente el mismo que en el caso de los vehículos que empleen combustibles convencionales. La gran calidad de estos biocombustibles de segunda generación incluso permitiría en teoría reducir el mantenimiento de los vehículos.

6.7 Ventajas [102, 139]

- Permiten el uso de una mayor variedad de materias primas, especialmente desechos vegetales. Esto puede reducir significativamente el coste de la materia prima.
- Los combustibles resultantes tienen una alta calidad y producen una combustión limpia, con unas emisiones de CO₂ potencialmente mucho menores, cuando se tiene en cuenta el ciclo de vida completo, que las emisiones de otros combustibles líquidos.
- El proceso de cultivo (si lo hay) podría ser menos intensivo para el medio ambiente que en el caso de las cosechas agrícolas ordinarias. La baja intensidad del cultivo resultaría en unas emisiones de gases de efecto invernadero incluso menores que para los cultivos tradicionales.
- El proceso de producción de los biocombustibles de segunda generación permite la co-producción simultánea de electricidad.
- La distribución de muchos biocombustibles de segunda generación se puede realizar a través de las redes de servicio existentes.

6.8 Desventajas [102, 139, 145]

- Se trata de tecnologías incipientes muy poco desarrolladas a nivel industrial.
- Coste elevado de los procesos de producción y de las instalaciones.

6.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none">• Necesidad de certificación de los combustibles• Tecnologías poco desarrolladas a nivel industrial• Coste elevado• Cambio complejo de las tecnologías tradicionales a las nuevas tecnologías para la producción de combustibles de segunda generación	<ul style="list-style-type: none">• Desconfianza de las empresas• Reducción del precio en caso de exceso de oferta
<ul style="list-style-type: none">• Menor dependencia de los combustibles fósiles• Mejor comportamiento medioambiental. Reducción de las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero• Excelente imagen• Productos no ligados al mercado alimentario	<ul style="list-style-type: none">• Tecnología disponible• Posible aumento del precio del petróleo• Necesidad de producir un mayor volumen de biocarburantes a partir de menores superficies de terreno

6.10 Balance de emisiones [47, 100, 133, 134, 137-139, 146]

Los combustibles “biomasa a líquido” (BTL) contribuyen a reducir las emisiones en todos los motores, especialmente durante el arranque en frío. La excepción son las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), que no se ven alteradas.

Así, el gasóleo obtenido mediante el proceso Fischer-Tropsch tiene dos ventajas fundamentales: apenas contiene azufre (con lo cual cumple sin dificultad con las duras reglamentaciones en vigor en Europa) y tiene un alto índice de cetano gracias a su bajo contenido en compuestos aromáticos.

Además, la utilización de la biomasa como materia prima en la producción de biocarburantes de segunda generación permite obtener reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero, en algunos casos, incluso mayores que las obtenidas con biocarburantes de primera generación (reducción de emisiones que puede alcanzar incluso el 85%).

Por otro lado, en el caso del etanol producido a partir de material lignocelulósico, la reducción en las emisiones de CO_2 llega al 70%, pudiendo alcanzarse el 100% en el caso de utilizar cogeneración para producir electricidad y evitar la utilización de carbón o gas como fuente de energía para el proceso de producción.

6.11 Potencial tecnológico [111, 148]

El potencial del combustible “biomasa a líquido” (BTL) es mucho mayor que el potencial del etanol o del biodiésel. En una hectárea de terreno se puede producir hasta casi tres veces más de carburante BTL que de biodiésel (en términos de cantidades equivalentes de energía). Esto se debe a que el biodiésel utiliza solamente el aceite

de la semilla, mientras que para producir el combustible “biomasa a líquido” (BTL) se utiliza la planta entera. Por otra parte, el BTL se puede obtener de una mayor variedad de cosechas de crecimiento rápido, ayudando a evitar monocultivos. Si todos los bio-residuos también se utilizan, el BTL puede tener un potencial hasta siete veces superior al potencial del biodiésel.

En términos técnicos, el BTL también es más versátil que el biodiésel. El biodiésel tiene diversas características que sólo son aprovechables en coches diésel. El BTL, por el contrario, se puede utilizar en todos los vehículos. Ello se debe a que el proceso de producción del combustible “biomasa a líquido” (BTL) es igualmente adecuado para la producción de cualquier combustible: gasolina, diésel e incluso queroseno para aviación.

6.12 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación

De acuerdo con algunos estudios, en Europa el volumen potencial de producción del combustible “biomasa a líquido” (BTL) en términos técnicos y sin reducir la producción de los cultivos alimenticios alcanza los 70 millones de toneladas. Esta cantidad equivaldría a cerca de un tercio de la demanda total de combustible de todos los vehículos de los 15 Estados de la Unión Europea en el año 2000, incluyendo tanto los vehículos turismo como los vehículos comerciales, y tanto los impulsados por combustibles diésel como por gasolina.

Con estas perspectivas, queda claro que los carburantes de segunda generación permitirían reducir las emisiones contaminantes, disminuir la emisión de gases del invernadero, reducir la dependencia de las importaciones del petróleo y, al mismo tiempo, crearían nuevas oportunidades para la agricultura y la industria.

6.13 Mercado mundial

6.13.1 Situación actual

Las plantas que actualmente realizan procesos de Fischer Tropsch ya han sido resumidas en el anterior apartado 5.14.1.

6.13.2 Perspectivas de futuro de los biocarburantes de segunda generación

La gasificación y el subsiguiente proceso catalítico de Fischer-Tropsch constituyen dos tecnologías clave para la producción de biocarburantes de segunda generación. Los retos principales que hay que resolver antes de desarrollar comercialmente estas tecnologías se han descrito previamente en el apartado anterior 5.14.2, en donde se han expuesto las perspectivas de futuro de los combustibles sintéticos.

Por otro lado, el potencial de producción de los biocarburantes de segunda generación depende en gran medida de la cantidad de biomasa disponible en cada país o región. Como se ha indicado, la sustitución de los cultivos energéticos utilizados para producir biocarburantes de primera generación por biomasa lignocelulósica posibilitará una mayor producción de biocarburantes de segunda generación por unidad de superficie.

6.14 Mercado español

6.14.1 Situación actual

Actualmente no existen en España plantas de producción a gran escala de biocarburantes de segunda generación que utilicen técnicas de Fischer-Tropsch. Sin embargo, como ya se ha mencionado en el apartado 5.15.1, existe un proyecto de investigación relacionado con la producción de etanol a partir de gas de síntesis denominado proyecto ACES [131]. El proceso de producción que está siendo desarrollado en dicho proyecto permitiría obtener etanol renovable si se utilizara biomasa para la obtención del gas de síntesis.

Además, existen varias experiencias de producción de bioetanol de segunda generación a partir de paja en Salamanca (desarrollada en este caso por Abengoa), y a partir de residuos de frutas y de residuos sólidos urbanos en Valencia. Esta última experiencia está siendo llevada a cabo por IMECAL, el CIEMAT, la Generalitat Valenciana y Ford.

6.14.2 Perspectivas de futuro de los biocarburantes de segunda generación

Para el mercado español son válidas las mismas conclusiones que se acaban de presentar en el marco internacional. También los aspectos analizados en el apartado 3.15.2 sobre las perspectivas de futuro de los biocarburantes en España son aplicables a los biocarburantes de segunda generación.

6.15 Experiencias y vehículos ya en el mercado

Puesto que ya se han realizado con buenos resultados algunas experiencias relativas a la utilización de diésel GTL en vehículos diésel convencionales (véase el apartado 5.16), es de esperar que la utilización del biocombustible “biomasa a líquido” (BTL) también proporcione resultados positivos, puesto que ambos combustibles tienen unas propiedades y características muy similares.

Los biocarburantes de segunda generación más importantes (“gas a líquido” o GTL, “biomasa a líquido” o BTL y etanol lignocelulósico) se podrían utilizar, previsiblemente, en los mismos vehículos en los que ya se utilizan el biodiésel y el bioetanol de primera generación [115, 117].

7 Gas natural

7.1 Definición y características básicas

El gas natural es una mezcla rica de hidrocarburos ligeros. El principal componente es el metano (CH_4), que se encuentra entre un 70-90 %, y, entre cuyas propiedades destaca su alto punto de inflamabilidad (se quema fácil y completamente) y, por su contenido en carbono, sus menores emisiones residuales de hidrocarburos. Además, posee otros hidrocarburos como etano, propano, butano, pentano y pequeñas proporciones de otros gases. De este modo, en la tabla 7 se recoge la composición típica del gas natural.

Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentaje
Metano	CH_4	70-90%
Etano	C_2H_6	0-20%
Propano	C_3H_8	
Butano	C_4H_{10}	
Dióxido de carbono	CO_2	0-8%
Oxígeno	O_2	0-0,2%
Nitrógeno	N_2	0-5%
Sulfuro de hidrógeno	H_2S	0-5%
Otros gases nobles	Ar, He, Ne, Xe...	Trazas

Tabla 7. Composición típica del gas natural

La composición del gas natural nunca es constante y varía en función de la fuente de obtención. Es un gas no corrosivo y no tóxico, con una elevada temperatura de combustión y un estrecho límite de inflamabilidad.

Como la gasolina, el gas natural se puede utilizar en los motores de ciclo Otto, si bien su aplicación no tuvo lugar hasta los años 30; estando actualmente y, en general, los vehículos de gas natural diseñados desde el primer momento para su uso con este combustible. Así, actualmente ya se plantea como una de las alternativas al petróleo por su limpia combustión y tecnología probada.

Como carburante, se usa por su combustión fácilmente regulable, su gran poder calorífico y escasa contaminación. El gas natural ocupa más volumen que los combustibles líquidos tradicionales, por lo que para su aplicación en transporte debe de ser comprimido o licuado. Se puede encontrar en dos formas: Gas natural comprimido (GNC - gas natural comprimido a altas presiones entre 200-220 bar, almacenado en tanques) o Gas Natural licuado (GNL- almacenado a temperaturas criogénicas de aproximadamente $-162\text{ }^\circ\text{C}$ para 1 bar de presión). Si bien el GNC es más utilizado en los vehículos de gas natural debido a su mayor accesibilidad, el uso del GNL se está incrementado en algunas zonas [133, 149, 150].

7.2 Obtención y materias primas

El gas natural se encuentra en la naturaleza en las llamadas “bolsas de gas”, bajo tierra o en los océanos. Éstas se pueden encontrar encima de los depósitos de crudo de petróleo (gas natural asociado) o bien en yacimientos exclusivos de gas natural (gas natural no asociado, en este caso se puede distinguir entre: “gas húmedo”, en caso de contener hidrocarburos líquidos en suspensión, y “gas seco”, si no los contiene).

De este modo, el proceso de obtención del gas natural es muy parecido al del petróleo. En la figura 32 se recogen las etapas desde su exploración hasta su uso.

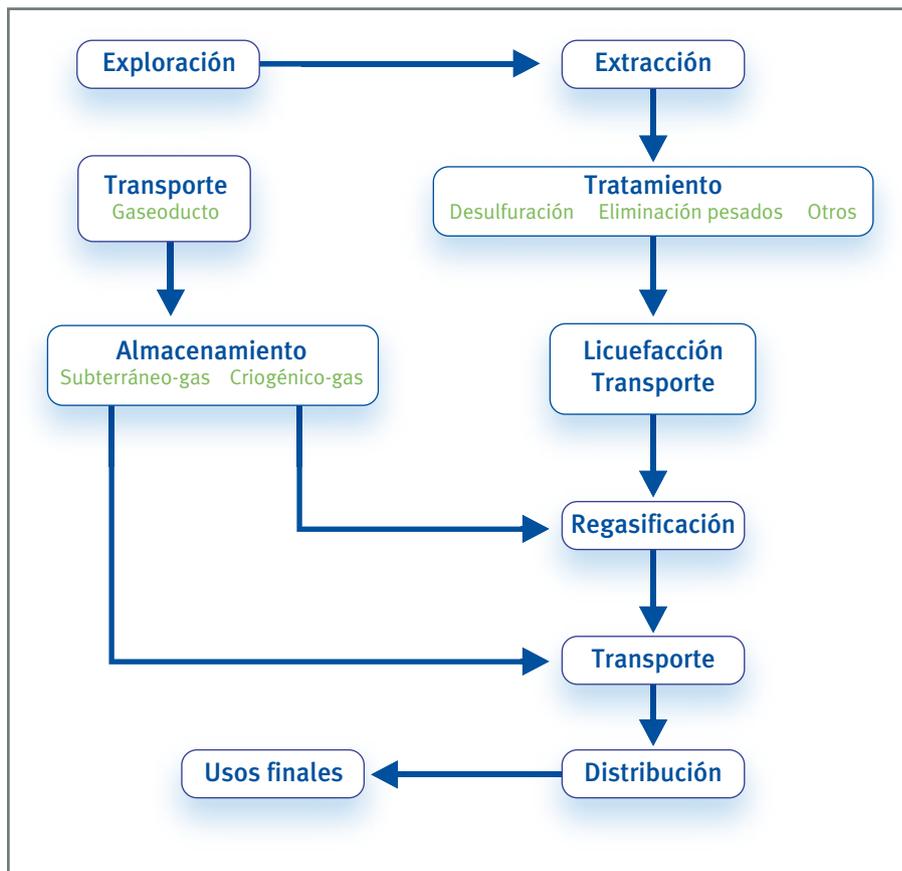


Figura 32. Esquema de las etapas desde exploración-uso del gas natural

En función del contenido de componentes pesados, el gas natural puede ser: de mezcla rica (proporción relativamente alta de otros hidrocarburos distintos al metano, índice de Wobbe alto) o de mezcla pobre (con relativamente pocos hidrocarburos diferentes al metano, índice de Wobbe bajo).

7.3 Almacenamiento. Manipulación

7.3.1 Almacenamiento

El gas natural en los vehículos se puede almacenar como:

- Gas comprimido (GNC), el gas se comprime a 250 bar y se almacena en el vehículo en cilindros instalados en la parte trasera, el chasis, o en el techo, a una presión de unos 200 bar en el caso de España. En este caso, entre los inconvenientes que presenta cabe destacar el tamaño y peso de los cilindros de almacenaje del GNC.
- Gas licuado (GNL), a presiones entre 70-210 kPa a una temperatura de -160°C, si bien en el caso de España esta oscila en 14-24 bar. En este caso, el gas natural licuado se almacena en depósitos de doble pared con aislante intermedio y posteriormente se evapora para su uso en estado gaseoso dentro del motor. En los últimos diseños se requiere de una línea de retorno del vapor para mantener correcta la presión del depósito durante el llenado. Presenta varias ventajas frente al almacenamiento en forma de GNC como son el peso del depósito menor y un notable aumento de la autonomía del vehículo. Sin embargo, su conservación en el depósito es más crítica en caso de no utilizar regularmente el vehículo.

De este modo, actualmente la modalidad GNC continúa siendo la más utilizada en el transporte, existiendo vehículos de gas natural comprimido de todas las categorías: vehículos de pasajeros ligeros, furgonetas, camiones de reparto, autobuses, etc.

Uno de los mayores inconvenientes de los vehículos que utilizan gas natural es el tamaño y peso de los depósitos de combustible. Actualmente se empiezan a utilizar depósitos de materiales compuestos que disminuyen apreciablemente el peso. También se está investigando el sistema de almacenamiento ANG (Adsorbed Natural Gas) que utiliza materiales nanoporosos, para almacenar el gas natural a presiones de 35 bar y con alta densidad.

Por otra parte, las estaciones de repostaje para los vehículos de gas natural son equivalentes a las estaciones de servicio tradicionales. Las estaciones de servicio de gas natural comprimido pueden tener dos diseños [157]:

- De carga rápida: compuesta por una estación de regulación y medición (ERM), sistema de compresión, cilindros de almacenamiento y surtidor. En este diseño el gas natural necesario para rellenar los cilindros de almacenamiento se comprime y, cuando los vehículos repostan, lo hacen por diferencia de presión entre los cilindros y sus propios tanques, lo que reduce el tiempo de llenado.
- De carga lenta: que presenta los mismos elementos que la anterior a excepción de los cilindros de almacenamiento. A diferencia del diseño anterior, en este caso el gas se comprime a medida que se inyecta en el depósito del vehículo.

7.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

Los vehículos de gas natural deben cumplir con exigentes normativas de calidad y seguridad (NCH 2109, NCH 2265, NCH 2272, etc...). En Europa, desde hace varios años, está vigente el Reglamento 110 que define las condiciones que debe cumplir la instalación de GNC de un vehículo, incluidos los depósitos de carburante. Además, su estrecho intervalo de inflamabilidad hace de él un combustible fósil seguro en comparación con otras fuentes de energía y, su densidad de 0,60, inferior a la del aire (1,00), contribuye a que el gas natural tenga tendencia a elevarse y pueda, consecuentemente, dispersarse fácilmente en caso de fugas o derrames [44].

Tanto en el GNC como en el GNL la ventilación de las instalaciones es uno de los aspectos más importantes. Así, en el caso del GNC todos los mecanismos deben diseñarse a prueba de explosiones y es necesario disponer de sensores de metano y de una ventilación para evitar que se alcance la concentración mínima de encendido o ignición [158].

Entre las precauciones de seguridad cabe destacarse las siguientes [44]:

- Cada cierto período, según lo que prescriba el Reglamento 110, es importante realizar una inspección de los cilindros, donde se revisa porcentaje de expansión permanente, pérdida de espesor de las paredes, corrosión o rozamiento, capacidad de recuperación y fatiga del material.
- Verificar que las conexiones eléctricas no estén expuestas para evitar cortos y que las mangueras y los cables estén bien sujetos.
- En caso de que por el tipo de reparación sea necesario vaciar los tanques, lo cuál no suele ser frecuente, éste debe hacerse de forma que no se libere el metano a la atmósfera.
- Puede ser conveniente despresurizar todo el sistema de combustible antes de empezar los trabajos de mantenimiento del motor.

Además, en el caso del GNL debido a la baja temperatura de almacenamiento –aproximadamente -160°C a presión atmosférica y, -132°C en el caso de España (15 bares)–, los contactos entre la piel y los elementos del sistema de combustible o el gas natural licuado (GNL) pueden ocasionar quemaduras criogénicas.

7.4 Comercialización

La demora en la utilización comercial del gas natural se explica básicamente por los importantes problemas técnicos en su transporte y distribución que frenaron su uso hasta bien entrado el siglo actual. En el caso particular de España, desde la promulgación de la Ley 22/2005 el gas natural ya es considerado un combustible para automoción, al igual que el resto de carburantes habituales. Hasta entonces se debía pedir autorización al Ministerio de Economía y Hacienda que definía el impuesto especial para el uso del gas natural en flotas, lo cual circunscribió la entrada del gas natural a las flotas de transporte público y de recogida de residuos sólidos urbanos, principalmente.

En primer lugar, en relación al sistema gasista, éste comprende las instalaciones incluidas en la Red Básica de Transporte (plantas de licuefacción, plantas de regasificación, gaseoductos de transporte primario, almacenamiento subterráneo, conexiones internacionales), la Red de Transporte Secundario, la Red de Distribución y demás instalaciones complementarias. Por otra parte, el gas natural se introduce bien en estado líquido donde es necesaria una infraestructura especial para licuar y regasificar el gas (por barco mediante los buques metaneros) o gaseoso (por gaseoducto). Posteriormente, el gas se transportará a través de las redes de transporte y distribución y se almacenará para su uso posterior.

En el caso de España, con la entrada de la nueva regulación (RD-Ley 6/2000) se ha producido y, se está produciendo, una importante transformación del sector hacia su liberalización. Actualmente, la principal empresa del sector es Gas Natural SDG, de capital privado. Esta empresa distribuye directamente a los consumidores finales o participa en otras empresas distribuidoras locales. Las diferentes empresas se distinguen de acuerdo a su función en el ciclo. Así, se encuentran:

- Empresas transportistas-titulares de instalaciones de regasificación de GNL, de transporte o almacenamiento de gas natural (ENAGÁS S.A., NATURGÁS ENERGÍA TRANSPORTE, S.A.U., TRANSPORTISTA REGIONAL DEL GAS, S.A., INFRAESTRUCTURA GASISTAS DE NAVARRA, S.L., ENDESA GAS TRANSPORTISTA, S.L., BAHÍA BIZKAIA, S.L., GAS NATURAL TRANSPORTE, S.L., GAS EXTREMADURA TRANSPORTISTA, S.L. y REGASIFICADORA DE SAGUNTO, S.A.).
- Empresas distribuidoras-titulares de instalaciones de distribución cuya función consiste en suministrar el gas natural por canalización así como construir, mantener y operar las instalaciones de distribución destinadas a situar el gas en los puntos de consumo (actualmente son 25 si bien destaca el Grupo GAS NATURAL).
- Empresas comercializadoras-sociedades mercantiles que adquieren el gas natural para su venta a los consumidores cualificados o a otros comercializadores (26 empresas).

Finalmente, es importante indicar que ENAGÁS tiene conferidas las funciones de gestión técnica del Sistema; es decir, es responsable de garantizar la continuidad y seguridad del suministro de gas natural así como la correcta coordinación entre los puntos de acceso, los almacenamientos, el transporte y la distribución.

Por otra parte, actualmente en España las estaciones de abastecimiento de gas natural para vehículos son de uso privado de flotas. En 2007, la empresa Gas Natural y la Cooperativa Valenciana de Taxistas (TAXCO) firmaron un acuerdo para instalar un punto de suministro de gas natural para vehículos en Valencia [159]. Esta estación ha sido la primera de uso público que entró en servicio en España: cualquier vehículo particular que utilice el gas natural como combustible puede repostar en esta estación. También conviene señalar el acuerdo firmado por Gas Natural y el Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón.

7.5 Modificaciones en los motores

El gas natural puede utilizarse en los motores actuales siendo necesarias algunas modificaciones. Así, por ejemplo, la oxidación del metano en el catalizador requiere mayores temperaturas que en el caso de usarse gasolina y, por

ello, el control del motor necesita algunas adaptaciones [44]. Para ello, se han desarrollado sistemas específicos de inyección de gas natural comprimido de diferentes tipos: de fase, secuencial, multipunto o indirecta.

Por otro lado, el mayor número de octanos del gas natural, por encima de los 130, reduce el riesgo de picado del motor (la expresión "picado del motor" hace referencia a la detonación espontánea e incontrolada del combustible en el interior de los cilindros). Gracias a ello, el motor puede ser diseñado con un mayor índice de compresión. Además, la combustión estequiométrica del gas natural proporciona muy bajos niveles de emisiones contaminantes, alcanzándose, prácticamente, los niveles de la futura norma Euro 6 que entrará en vigor en Europa en 2014 [44].

Los motores de gas natural en función del dosado pueden ser de: "mezcla pobre" (el motor trabaja con exceso de aire) y/o "mezcla estequiométrica" (el motor trabaja con dosado relativo igual a 1).

Por otra parte, los vehículos alimentados con gas natural pueden ser de varios tipos:

- Mono-fuel, monovalentes o dedicados [10, 150]. Utilizan gas natural como único combustible. Están optimizados para su uso, lo que asegura la máxima eficiencia y unas mínimas emisiones.
- Bi-fuel o bivalentes [160]. Operan indistintamente con gas natural o con gasolina (o cualquier otro combustible válido para el motor de encendido provocado como bioetanol). De este modo, tienen dos depósitos diferenciados. En estos vehículos, suele favorecerse automáticamente el funcionamiento con gas natural para emitir menos emisiones y funcionar más tiempo con carburante alternativo.
- Dual-fuel o, en español, "de combustible dual" [161-163]. Utilizan una mezcla de gas natural y de diésel. El diésel se inyecta directamente en la cámara de combustión, mientras que el gas natural se introduce en el aire de admisión mediante un carburador o mediante un sistema de inyección. Sin embargo, es importante señalar que en este caso el diésel se utiliza únicamente para dar arranque al motor.
- Tri-fuel o, en español, de "tri-combustibles" [164, 165]. Se trata de un desarrollo tecnológico relativamente reciente que combina un vehículo de combustible flexible de gasolina y etanol con uno de gas natural. El motor puede funcionar con gasolina o etanol (o con una mezcla de ambos) y también con gas natural. Su primera introducción ha sido en Brasil en el 2005.
- De inyección directa de alta presión (o, en inglés, High Pressure Direct Injection - HPDI) [166, 167]. Se trata de una tecnología que está siendo desarrollada por Westport Innovations en Canadá. Esta tecnología inyecta a alta presión tanto el diésel como el gas natural directamente en la cámara de combustión. Como los motores dual-fuel, dependen del diésel para que la combustión se produzca. Sin embargo, se diferencia de éste en la forma en la que los diferentes combustibles se mezclan (en este caso la mezcla se lleva a cabo en el interior de los cilindros).

7.6 Funcionamiento y mantenimiento

Para utilizar el gas natural en vehículos, éste se comprime a altas presiones o se licua, como ya se ha indicado anteriormente, con el fin de que sea posible almacenar una cantidad aceptable de gas en los depósitos –generalmente cilindros– y así lograr una buena autonomía del vehículo. Respecto a su funcionamiento, esencialmente es similar al de los motores de gasolina; sólo cambian las temperaturas de trabajo, las relaciones de compresión posible, el rendimiento, las prestaciones y las emisiones.

Los vehículos de gas natural ofrecen un arranque y un funcionamiento mejor que los vehículos de gasolina y diésel incluso bajo condiciones climatológicas severas de calor o frío. Por otro lado, nunca debe olvidarse durante las operaciones de mantenimiento y reparación que se trata de gas presurizado.

Los vehículos de gas natural tienen aproximadamente las mismas prestaciones que sus análogos convencionales. Sin embargo, debido a que el gas natural es un combustible con un octanaje superior al de la gasolina convencional, las configuraciones y características de los motores son hasta cierto punto diferentes [44].

En los motores de gas natural:

- No está permitida la utilización de hierro fundido, plástico, aluminio galvanizado, ni aleaciones de cobre que excedan el 70% de este metal.
- Es muy importante prevenir con un buen mantenimiento del compresor y del filtro de la estación de llenado la entrada en los tanques de combustible de aceite lubricante del compresor.

7.7 Ventajas del gas natural comprimido [133, 149-151, 168, 169]

- Reducción importante de todas las emisiones (PM, NO_x, etc...) incluidas el CO₂ (en este caso entre 10-20%).
- Reducciones de ruido de hasta el 50%.
- Competitivo en precio como combustible.
- Tecnología probada.
- Se puede usar en todo tipo de vehículos.
- Más seguro que la mayoría de combustibles líquidos.

7.8 Desventajas [168, 169]

- Combustible fósil.
- Escasez actual de infraestructuras.
- Menor oferta de vehículos que éstos con gasolina y diésel si bien se ofrecen vehículos con gas natural en toda la gama.
- Espacio adicional requerido para instalar los depósitos de combustible en los vehículos, si bien en los vehículos diseñados desde el principio para funcionamiento con gas natural, el espacio útil no disminuye ya que el diseño está orientado desde el comienzo.
- Mayor peso de los depósitos de combustible.

7.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Escasez de infraestructuras • Menor oferta de los fabricantes de vehículos • Coste del vehículo ligeramente superior 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustible fósil
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Menor precio del combustible - Limpia combustión y tecnología probada • Simplicidad de los talleres • Ventajas medioambientales por su contenido en carbono • Disponibilidad inmediata • Contribución a la diversificación energética 	<ul style="list-style-type: none"> • No depende del petróleo • Normas y reglamentos medioambientales • Desarrollo de políticas de carburantes alternativos

7.10 Balance de emisiones [47, 133, 169, 170]

Los vehículos de gas natural son generalmente muy limpios en términos de emisiones de ahí que sea una alternativa a la reducción de impacto ambiental respecto al petróleo. En concreto, sus emisiones casi nulas de partículas en suspensión constituyen una ventaja añadida cuando un vehículo de gas natural substituye a uno diésel, lo que suele ser el caso en los vehículos pesados de gas natural. A esto hay que añadir que el gas natural por su composición química emite mucho menos CO₂ que los derivados de petróleo (en torno a un 25% menos que la gasolina y un 10-15% que el gasóleo por unidad de masa consumida).

Por otro lado, el gas natural permite una oxidación más completa que la gasolina y gasóleo, debido a una cadena carbonada más corta, por lo que las emisiones de CO y HC (Hidrocarburos) así como las partículas sólidas carbonadas se verán reducidas.

El metano es también un hidrocarburo, pero normalmente es tratado de forma diferente a los demás hidrocarburos ya que, a diferencia de éstos, no es perjudicial para la salud, aunque, eso sí, sigue siendo un gas de efecto invernadero. Por ello, en relación a las emisiones de los vehículos de gas natural, normalmente se utiliza la expresión “hidrocarburos distintos del metano” (o, en inglés, Non-Methane Hydrocarbons - NMHC) en lugar de simplemente hidrocarburos (HC). Además, los vehículos de gas natural normalmente tienen catalizadores de tres vías diseñados específicamente para capturar y neutralizar los niveles de metano emitidos por los motores con lo que se consigue reducir en más del 90% el metano residual. Lamentablemente, estos catalizadores específicos no se pueden adaptar ni a los vehículos de gas natural bi-fuel ni a los vehículos de combustible dual. Debido a ello, en estos casos las emisiones de metano pueden aumentar significativamente el volumen total de gases de efecto invernadero producidos por estos vehículos. Sin embargo, la contribución global de la combustión del gas natural, considerando el CO₂ y los HC, es del 85% respecto a los productos derivados del petróleo.

Como ya se ha indicado, un vehículo de gas natural funcionando a cargas razonablemente altas producirá típicamente ahorros en las emisiones de CO₂ de en torno a un 25% en comparación con un vehículo equivalente de gasolina, y ahorros del 10-15% en comparación con un vehículo equivalente diésel. En condiciones de circulación urbana, el VTT (Technical Research Centre of Finland) obtuvo en 2004 reducciones de emisiones de CO₂ del 8% respecto al vehículo diésel análogo (TTW), si bien en determinadas ocasiones debido a la mayor eficiencia de los motores diésel a baja carga se puede compensar esta ventaja. En estas condiciones los vehículos de gas natural y sus equivalentes diésel producen generalmente niveles similares de CO₂.

En general, y con respecto a las emisiones de CO₂, existen de hecho dos efectos contrarios. Por un lado, los motores diésel suelen tener mayor rendimiento energético que los motores de gas natural (obtienen más energía cinética a partir de la misma energía total del combustible) pero, por otro lado, la combustión del gas natural produce menos CO₂ que el combustible diésel como ya se ha visto, debido al menor contenido en carbono por unidad de hidrógeno que el diésel.

Finalmente y, a modo de resumen, las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos de gas natural haciendo un balance completo “Well to Wheel”, o “del pozo a la rueda”, son inferiores a las emisiones de los vehículos de gasolina, y muy cercanas, incluso en ocasiones similares, a las de los vehículos diésel. La previsión es que en unos años, con el avance de todas las tecnologías, las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos de gas natural comprimido sigan siendo menores que las de los vehículos impulsados por gasolina y en comparación a los diésel también sean menores.

7.11 Balance energético

Los motores Diesel tienen mayor rendimiento energético que los de gas natural comprimido [133], cuyo rendimiento es similar a los motores de gasolina. Además, al realizarse un balance energético completo desde la extracción hasta el uso final del combustible, se concluye que la energía necesaria por kilómetro recorrido es mayor en el caso del gas natural comprimido (GNC) que para los dos principales combustibles convencionales [171]. Es previsible

que gracias a la evolución de las tecnologías en los próximos años aumente el rendimiento de los vehículos de gas natural comprimido aproximándose a la de los vehículos con combustibles convencionales diésel.

7.12 Potencial tecnológico

Gracias a su elevado octanaje, cercano a 130, el gas natural tiene una clara ventaja sobre la gasolina ya que permite incrementar la potencia de los motores, propiciando que trabajen con mayor eficiencia, evitando dejar residuos de la combustión y, por lo tanto, desgastando menos los motores. Por otro lado, el metano permite utilizar mayores ratios de compresión, lo que, a su vez, permite alcanzar en los motores de encendido provocado un mayor rendimiento energético a cargas parciales [44]. Además, actualmente la eficiencia de los motores de gas natural se está aproximando a la eficiencia de los motores de encendido por compresión (motores Diesel).

7.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación [173]

El gas natural es un combustible de disponibilidad inmediata ya que su distribución se realiza a través de la red normal de suministro de este gas. La principal barrera para su utilización como combustible de vehículos es la escasez de infraestructura existente ya que, actualmente, muchos fabricantes ofrecen ya vehículos diseñados desde el inicio para su uso con gas natural. Además, los ahorros en el coste del combustible por kilómetro recorrido pueden llegar al 20% respecto a los vehículos diésel, lo que podría llegar a compensar las ligeras diferencias de coste inicial de inversión respecto a un vehículo de gasolina o diésel, si bien en la mayoría de los casos éste sobrecoste no llega a superar el 10% e, incluso en otros, es similar.

Otra ventaja añadida son las bajas emisiones de los vehículos de gas natural en comparación con los que utilizan combustibles convencionales. Esto podría ayudar a que el gas natural sea apoyado desde las administraciones públicas como una alternativa a corto plazo al petróleo.

De hecho, a nivel europeo, el gas natural ya está contemplado como una de las alternativas reales a los combustibles convencionales. Por su amplia disponibilidad el gas natural se posiciona como uno de los carburantes alternativos clave para servir de puente entre el escenario actual de utilización de carburantes convencionales y el previsible escenario futuro de convivencia de éstos con otros productos. Además, la evolución mundial al alza de los precios de los carburantes de los últimos años, se espera, en el futuro, que haga a los vehículos de gas natural cada vez más competitivos.

El gas natural está regulado por diversos reglamentos y normativas que garantizan la calidad del combustible y la seguridad en su utilización, como el nuevo “Reglamento de Seguridad y Calidad de los Combustibles Gaseosos”, o el Reglamento ECE 110 de equipos para vehículos que utilizan gas natural comprimido (GNC), entre otros.

7.14 Mercado mundial

7.14.1 Situación actual

Según la Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural, en 2008 existían en uso casi 8,5 millones de vehículos de gas natural en el mundo entero, de los cuales casi 1,7 millones estaban en Argentina, 1,6 millones en Pakistán y 1,5 millones en Brasil. La flota italiana con 432.900 vehículos de gas natural es con mucho la mayor de Europa, seguida de la flota alemana con 68.678 vehículos. España tenía, en mayo 2008, un total de 1.526 vehículos de gas natural.

Orden	País	Vehículos de Gas Natural	Estaciones
1	Argentina	1.690.540	1.753
2	Pakistán	1.650.000	1.923

(Continuación)

Orden	País	Vehículos de Gas Natural	Estaciones
3	Brasil	1.511.945	1.609
4	Italia	432.900	609
5	India	821.872	325
6	Irán	611.516	347
7	USA	146.876	1.600
8	Colombia	251.688	313
9	China	200.873	486
10	Ucrania	120.000	224
...			
37	España	1.526	35
...			
	Total	8.428.520	12.796

Tabla 8. Estadísticas de vehículos impulsados por gas natural (vehículos nuevos y vehículos adaptados) y de estaciones de suministro
Fuente: Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural, Mayo 2008 [173]

7.14.2 Perspectivas de futuro del gas natural

El número total de vehículos de gas natural se ha duplicado en los últimos cinco años, y la Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural prevé que llegue a 50 millones de vehículos en el año 2020.

Previsiblemente, los beneficios medioambientales del gas natural comprimido, en concreto la reducción de emisiones contaminantes, contribuirán a que las administraciones promuevan y apoyen a los vehículos de gas natural. Además, el impulso de la UE a la utilización de energía procedente de fuentes renovables como se ha recogido en el borrador final de Directiva COM (2008) 19, con objetivos jurídicamente vinculantes para todos los países miembros, junto con el enorme potencial de obtención del biogás en Europa hace prever un crecimiento muy fuerte de la aplicación del gas natural en el transporte europeo sobre todo en el ámbito urbano, aunque es también predecible un incremento muy importante en el transporte pesado interurbano con el GNL. Cabe considerar también el impulso comunitario al empleo de vehículos limpios, borrador final de Directiva COM (2007) 817, que establecerá la inclusión de los costes operativos del consumo energético y de la emisión de contaminantes durante la vida útil de los vehículos como base para los criterios de selección y adjudicación de los contratos de todas las entidades públicas para la adquisición de vehículos de transporte rodado.

La empresa francesa Gaz de France firmó en 2005 un acuerdo de colaboración con Citroën para instalar en Toulouse pequeños compresores de gas natural en domicilios particulares. Los compresores domésticos se utilizaban para reabastecer una pequeña flota de vehículos Citroën C3 1.4 Gas Natural, el modelo bi-carburante (gasolina y gas natural) seleccionado para la prueba de demostración [174]. Destaca también el acuerdo en 2001 en Alemania que

llevo a la creación del consorcio ERDGAS MOBIL donde se encuentran todos los agentes implicados (Administraciones, sector del gas, petroleras, y fabricantes de automóviles).

El siguiente reto tecnológico será llevar el gas natural a las estaciones de servicio, para hacer de este carburante una alternativa real al petróleo en el horizonte de 2010, según la Asociación Francesa de Gas Natural para Vehículos. Y en esta línea también trabajan Carrefour, Total, Peugeot y Renault, firmantes todos ellos de un protocolo de colaboración entre la administración francesa y el sector privado de este país para el desarrollo de vehículos de gas natural.

7.15 Mercado español

7.15.1 Situación actual

En España, la primera experiencia de utilización de gas natural para el transporte urbano se realizó en 1993 mediante el proyecto ECOBUS en el que participaron la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT), Iveco Pegaso, IDAE y el grupo Gas Natural. Desde entonces, el uso del gas natural ha aumentado en gran medida, entre otros, por la labor de determinadas empresas como IVECO que desarrolla toda la tecnología de gas natural en España o Gas Natural. Así, según los datos de la Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural publicados en el mes de mayo 2008, en España había entonces 1.526 vehículos funcionando con gas natural. En 2005 había únicamente 800 vehículos, según esta misma fuente, lo que implica un incremento del 91% aproximadamente en los últimos dos años. La mayoría de estos vehículos son autobuses o vehículos de recogida de basura, y más de la mitad se encuentran en Madrid. Por otro lado, el número de estaciones de abastecimiento de gas natural en 2008 era de 35 [173].

Según datos de fabricantes, el número de camiones de basura con motor de gas natural comprimido ascendía sólo en Madrid en el año 2007 a 675 vehículos, y el de autobuses urbanos a 360. Además, según las mismas fuentes, hay ya más de 600 camiones pesados en España funcionando con gas natural [47].

Además, en 2007 entró en servicio en Valencia la primera estación de abastecimiento de gas natural de uso público, gracias a un acuerdo entre la empresa Gas Natural y la Cooperativa Valenciana de Taxistas (TAXCO) [159].

Por otro lado, diez taxistas de la ciudad de Madrid fueron escogidos en 2007 por la Asociación Gremial del Auto Taxi y la Federación Profesional del Taxi (FPT) para circular durante doce meses con turismos propulsados con gas natural comprimido (GNC) suministrado por la empresa Gas Natural. Se trataba de una experiencia piloto que, una vez evaluada positivamente, el Ayuntamiento de la capital quiere ampliar, en esta ocasión incluso a vehículos particulares [174]. La prueba piloto forma parte de un convenio marco de colaboración para introducir el gas natural en Madrid firmado entre las citadas asociaciones, el Ayuntamiento madrileño, la Comunidad de Madrid, Gas Natural, General Motors y Fiat [174].

Por su parte, la empresa Gas Natural firmó un acuerdo con General Motors en 2007 para impulsar el uso del gas natural como combustible tanto en el sector público como en el privado. Los modelos de gas natural comercializados por General Motors en España son el Opel Zafira ecoM y el Combo ecoM. Actualmente ya hay 40.000 vehículos de estos modelos circulando en Europa. El acuerdo con Gas Natural implica el compromiso de la empresa automovilística de ofertar su gama de vehículos de gas natural comprimido (GNC) en condiciones de precio y financiación atractivas, y con plazos ajustados a la demanda. Por su parte, la empresa gasista realizará estudios sobre la ubicación de surtidores públicos en estaciones de servicio existentes o en nuevos emplazamientos, aportará los medios técnicos y las inversiones para la explotación y mantenimiento de estas instalaciones, y suministrará el gas natural que se consuma.

Por otra parte, dentro de la Estrategia E4 de Ahorro y Eficiencia Energética en España y de los consiguientes Planes de Acción, se vienen contemplando desde el año 2006 ayudas tanto a la renovación de vehículos como a la implantación de estaciones de carga. Para el ejercicio 2008, la adquisición de un automóvil o vehículo industrial con MMA hasta 3.500 kg se subvenciona con un 15% del valor de mercado, hasta un máximo de 2.000 €. A partir de 3.500 kg la subvención es del 15% del total del coste de adquisición hasta un máximo de 12.000 €. Además, las estaciones

de carga son objeto de una ayuda de entre 30.000 hasta 60.000 euros según sean individuales o colectivas. Como ya se ha comentado, dichas ayudas son gestionadas por las diferentes CC.AA. a través de convenios de colaboración suscritos con IDAE. Estas subvenciones son compatibles con otras ofertas de fabricantes o vendedores de vehículos. También, a nivel nacional, existe una deducción fiscal por adquisición de vehículos ecológicos (cumpliendo normas medioambientales más estrictas que la reglamentación vigente), del 9% del valor total de la inversión en el año fiscal correspondiente a la misma.

7.15.2 Perspectivas de futuro del gas natural

En 2005 se consumieron en España 376.229 GWh (Gigavatios-hora) de gas natural. Esta cifra fue un 18% mayor que la de 2004 y supuso el 17,4% del consumo total de energía primaria en España.

Se espera que ese porcentaje pase en 2010 al 20%, lo que da una idea del aumento del consumo que se prevé en los próximos años.

En 2006 se puso en marcha la planta de regasificación de Sagunto y la conexión de gas entre Irún y la frontera francesa. También se están ampliando las capacidades de almacenamiento y procesado de las plantas de Barcelona, Cartagena y Huelva. A finales del verano del 2007 también estaba previsto que se inaugurara el cuarto tanque de almacenamiento de la planta de Huelva y que a finales de ese año entrara en funcionamiento la planta regasificadora de Mugardos (Galicia) y los correspondientes gasoductos que la conectarán a la red gasista española [175-177].

En cuanto a los vehículos impulsados por gas natural, es previsible que su número se incremente próximamente gracias a las buenas características de combustión de este carburante, en particular a sus bajas emisiones contaminantes. El aumento de la eficiencia previsto en estos vehículos en los años próximos permitirá reducir aún más sus emisiones de CO₂.

Con el impulso que se le viene dando en los últimos años en España al gas natural para vehículos, tanto desde las administraciones públicas como desde diversas empresas privadas, la entrada en el mercado español de vehículos particulares impulsados por este carburante parece inminente.

7.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

En Europa se ofrecen los siguientes modelos de vehículos con funcionamiento dual o monovalente (en este caso, monovalente significa que el gas natural comprimido es la fuente primaria de energía, si bien se suele disponer de algún depósito de gasolina de reserva):

- Citroën: Berlingo y C3 bivalent
- Fiat: Panda-Panda, Punto Van natural Power y Multipla Natural Power
- Ford: Focus C-max CNG, Focus Turnier
- Mercedes: E 200 NGT
- Opel: Combo 1.6 CNG y Zafira 1.6 CNG., Astra Caravan 1.6 CNG
- Peugeot: Partner bivalente, PKW Prémium 75
- Volvo: V70, S60, S80
- Volkswagen: Caddy, Touran, Golf Variant EcoFuel

Para el mercado español a 1 de enero de 2008, en la base de datos de consumos y emisiones de CO₂ de IDAE figuraban 5 modelos de vehículo turismo (categoría M1) a gas natural:

- Fiat Multipla MY 1.6 16v Dynamic 68 CV Metano BiPower
- Opel Combo 1.6 16V 97cv

- Opel Zafira 1.6 16V 94cv
- Volkswagen CADDY 5/7 PLAZAS 2.0
- Volkswagen TOURAN 2.0

También hay disponible una creciente cantidad de furgonetas y camiones que funcionan con gas natural comprimido (GNC):

- Mercedes: Sprinter NTG
- Ford: Transit
- Iveco: 35S14, 35C14, 40C14, 50C14 y 65C14
- Fiat: Ducato Biopower/Natural Power, Doblo Cargo Bipower, Doblo Natural Power
- Citroën: Jumper, Berlingo
- Iveco: Daily, EuroCargo, Stralis
- Peugeot: Boxer LkW 330, Boxer LkW 350, LkW 190C

Por otro lado, algunos autobuses alimentados con gas natural comprimido (GNC) satisfacen ya el estándar de emisiones EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle o, en castellano, VEM Vehículo Ecológico Mejorado):

- NEOMAN
- CBG Bus Breda
- Scania L94UB CB60 Low Floor – CNG
- EKOBUS CNG Buses
- Irisbus / Iveco (Citeles, CityClass, EuroPolis, Daily)
- Iveco: EuroPolis, CityClass, Citelis
- Mercedes
- Volvo

8 Biogás

8.1 Definición y características básicas

Como alternativa al gas natural fósil en muchas aplicaciones actualmente puede destacarse el biogás, producido ya en más de 4.000 puntos distribuidos en toda Europa, principalmente en las inmediaciones de vertederos y plantas de tratamiento de aguas residuales. El biogás normalmente se utiliza para impulsar turbinas de gas y producir electricidad. Sin embargo, si se depura previamente mejorando su calidad, también se pueda usar como combustible en los vehículos [152], en este caso se denomina “biometano”.

El biogás contiene un 50-70% de metano además de monóxido de carbono (CO), hidrógeno, nitrógeno, dióxido de carbono (CO₂) y otros gases. Aunque el poder calorífico del biogás es menor que el del gas natural, puede usarse también en motores de ciclo Otto y de ciclo Diésel. La utilización de biogás en motores diésel debe realizarse mezclado con gasóleo convencional [133, 150, 151, 152].

8.2 Obtención y materias primas

El biogás se produce por la digestión anaerobia de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos [154]. La materia orgánica puede ser: residuos ganaderos, residuos de lodos de depuradoras de aguas residuales (EDAR), residuos de efluentes industriales o fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU). Como se ha indicado anteriormente, está formado principalmente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂), entre otros, variando su concentración en función de la fuente de origen. La digestión anaerobia es una tecnología muy interesante en el caso de tratamiento de los residuos biodegradables de industrias como cervecera, azucarera, alcoholera, láctea, etc... Además, también se puede emplear para tratar residuos producidos en explotaciones ganaderas intensivas de alta concentración (si bien en este caso existe competencia con otras tecnologías como secado térmico de purines) y para tratar los lodos de depuración de las EDAR. En el caso de fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos se puede producir biogás a través de la desgasificación de vertederos o bien mediante la digestión anaerobia en biorreactores.

Cuando se trata de gas procedente de digestores, y dependiendo del tipo de desechos que se utilizan como materia prima y del diseño del sistema de producción, el biogás que se obtiene es típicamente metano (entre un 55 y un 75% de metano).

Si el biogás se obtiene de vertederos, el producto resultante en seco es un gas de bajo contenido energético compuesto por un 57% de metano (gas natural), un 42% de dióxido de carbono, un 0,5% de nitrógeno, un 0,2% de hidrógeno y un 0,2% de oxígeno [156]. Además, en el gas de vertedero se pueden encontrar trazas de un número significativo de otros compuestos. Entre éstos se incluyen alcanos, aromáticos, clorocarburos, compuestos oxigenados, otros hidrocarburos y dióxido de azufre.

Las etapas de formación del biogás son:

- Hidrólisis – generación de cadenas hidrocarbonadas más cortas y ácidos grasos mediante la destrucción de los polímeros.
- Acetogénesis – generación de acetatos, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Metanogénesis – generación de metano por descomposición del ácido acético y absorción de hidrógeno. Esta fase es la que condiciona el tiempo de tratamiento y el caudal de residuos tratados en la unidad de tiempo.

Posteriormente, se realizan diferentes tratamientos con el fin de eliminar distintos componentes en función del uso final del biogás. Así, en el caso de utilizar el biogás como combustible es necesario que éste se encuentre en una alta calidad (CH₄ ≥ 96%, H₂S ≤ 100 mg/Nm³, H₂O_v < 15 mg/Nm³ y tamaño de partícula de 40 micras) con lo que

es necesario eliminar el agua, el sulfuro (H_2S), los compuestos halogenados y el dióxido de carbono para lo cual se emplean diferentes tratamientos químicos.

8.3 Almacenamiento. Manipulación

8.3.1 Almacenamiento

El biogás procedente de vertederos, de instalaciones de tratamientos de aguas residuales (fermentadores) o de la gasificación de la biomasa puede ser purificado e introducido directamente en las redes de gas natural. En estos casos, es importante limitar la presencia de los subproductos que puedan aparecer en el proceso de obtención del biogás. En este sentido, la introducción en redes de alta presión tiene la ventaja de que los subproductos de la gasificación se diluyen mucho y, gracias a ello, es posible aislarlos y separarlos del gas [44].

Otra alternativa de almacenamiento es licuar el combustible. Cuando se almacena biogás en forma líquida los subproductos pueden eliminarse fácilmente durante el enfriamiento del biogás. En cualquier caso, cuando los depósitos de los vehículos se llenan directamente con biogás debe controlarse de cerca la calidad del combustible para evitar daños en los motores [44].

8.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

Véase apartado análogo correspondiente al gas natural (7.3.2).

8.4 Comercialización

El biogás ya ha sido utilizado como combustible para vehículos en Suecia, donde la correspondiente norma técnica nacional de combustible exige que esté constituido por un mínimo de 95% de metano. Más recientemente, el biogás también se ha utilizado como combustible de automoción en Suiza, Francia, Alemania, Austria, Italia e Islandia [133]. Sin embargo, el número total de vehículos que utilizan biogás es aún pequeño, probablemente sin pasar de unos pocos miles de vehículos en todo el mundo.

8.5 Modificaciones en los motores

Véase apartado análogo correspondiente al gas natural (7.5).

8.6 Funcionamiento y mantenimiento

Véase apartado análogo correspondiente al gas natural (7.6).

8.7 Ventajas [133, 149-151, 168, 169]

- Origen renovable, aprovechamiento de un residuo.
- Reducción importante de todas las emisiones (PM, NO_x , etc...) incluidas el CO_2 .
- Reducciones de ruido de hasta el 50%.

8.8 Desventajas [168, 169]

- Escasez de infraestructuras existentes.
- Coste elevado de la tecnología de obtención del biogás.

8.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Escasez actual de infraestructuras • Menor oferta de los fabricantes de vehículos • Coste del vehículo ligeramente superior • Coste elevado de la tecnología de producción de biogas 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede resultar más rentable la utilización del biogás para otras aplicaciones diferentes a la automoción (generar electricidad, etc.)
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Origen renovable, aprovechamiento de un residuo • Reducción de emisiones contaminantes y de GEI • El biogás también puede ser añadido a la red de gas natural comprimido (GNC) 	<ul style="list-style-type: none"> • No depende del petróleo, es un recurso doméstico • Gran potencial de producción en Europa

8.10 Balance de emisiones [47, 133, 169, 170]

Los vehículos que utilizan como combustible biogás son generalmente muy limpios en términos de emisiones en comparación con los carburantes convencionales derivados del petróleo, al igual que ocurría en los vehículos de gas natural.

El biogás es un combustible prácticamente idéntico al gas natural, por lo que sus emisiones son similares a las de los demás vehículos de gas natural. Sin embargo, la utilización de biogás tiene mayores beneficios en términos de emisiones de gases de efecto invernadero: es un combustible renovable, lo que implica que las emisiones netas de dióxido de carbono a la atmósfera serán menores. Además, el uso de biogás implica que el metano (un potente gas de efecto invernadero) producido en los vertederos y en las plantas depuradoras es capturado en lugar de dejarse escapar a la atmósfera.

En la tabla 9 se recogen las emisiones obtenidas en el estudio realizado por Traffic&Public Transport Authority en Suiza en el año 2000.

g/km	CO	HC	NO _x	CO ₂	PM
Diésel	0,2	0,4	9,73	1.053	0,1
Gas natural	0,4	0,6	1,1	524	0,022
Biogás	0,08	0,35	5,44	223	0,015

Tabla 9. Emisiones (Estudio Traffic&Public Transport Authority)

Se observa como el biogás presenta mejores características en relación a emisiones que el gas natural, salvo en las emisiones de NO_x. Sin embargo, conviene señalar que las emisiones dependen y, por lo tanto varían, en función de la fuente de obtención. Por otro lado, el borrador final de Directiva COM (2008) 19 de impulso a la utilización de energías renovables propone una compensación de las emisiones de CO₂ por los vehículos de transporte del 81 al 88% del total, según la procedencia del biogás.

8.11 Balance energético

Véase apartado análogo correspondiente al gas natural (7.11).

El rendimiento en los vehículos puede consultarse en el apartado correspondiente al gas natural. El análisis del consumo energético en el ciclo completo de vida del biogás deberá contemplar también el consumo de energía durante la producción, distribución y transporte del mismo y dependerá de la fuente de la que se obtenga.

8.12 Potencial tecnológico

Como se ha indicado, si bien la utilización de gas procedente de la gasificación de la madera o de procesos de pirólisis es posible, en estos casos sí que resultan precisas ciertas adaptaciones del motor. Quizás las sofisticadas tecnologías multiválvula de inyección directa sean una vía para disponer de motores que puedan funcionar satisfactoriamente con diferentes combustibles gaseosos.

8.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación [173]

Véase apartado análogo correspondiente al gas natural (7.13).

8.14 Mercado mundial

8.14.1 Situación actual

El biogás ya ha sido utilizado como combustible para vehículos en Suecia, donde la correspondiente norma técnica nacional de combustible exige que esté constituido por un mínimo de 95% de metano. Más recientemente, el biogás también se ha utilizado como combustible de automoción en Suiza, Francia, Alemania, Austria, Italia e Islandia [133]. Sin embargo, el número total de vehículos que utilizan biogás es aún pequeño, probablemente, sin pasar de unos pocos miles de vehículos en todo el mundo.

8.14.2 Perspectivas de futuro del biogás

Gracias a los beneficios medioambientales del biogás y al aprovechamiento de residuos en la producción de este combustible, es previsible que las administraciones promuevan y apoyen la utilización de biogás en los vehículos de gas natural, aunque su aplicación en la automoción y el transporte podría estar limitada por la utilización de este combustible para otros fines, como en la generación eléctrica.

8.15 Mercado español

8.15.1 Situación actual

No hay constancia de la utilización de biogás en vehículos en España. Sin embargo, según fuentes de fabricantes la planta de tratamiento de biogás de Valdemingómez podría abastecer a toda la flota de autobuses de Madrid.

8.15.2 Perspectivas de futuro del gas natural

Véase apartado análogo correspondiente al gas natural (7.15.2).

8.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

Véase apartado 7.16 correspondiente a vehículos de gas natural en el mercado.

9 Gas licuado del petróleo

9.1 Definición y características básicas

El GLP, o Gas Licuado del Petróleo es una mezcla de propano (C_3H_8) y de butano (C_4H_{10}). En estado gaseoso en condiciones normales, a una determinada presión (en el entorno de los 10 bares) se transforma en líquido. La proporción de los citados gases (propano y butano) varía en función del país y del tipo de vehículo. Así, por ejemplo, en España el gas licuado del petróleo (GLP) de automoción para los vehículos de turismo que han sido adaptados para utilizar GLP tiene normalmente una composición volumétrica de un 30% de propano y un 70% de butano. Por su parte, el gas licuado del petróleo (GLP) para los vehículos que ya han sido diseñados en origen para funcionar exclusivamente con este combustible, caso de algunos autobuses, tiene un 70% de propano y un 30% de butano, lo cuál hace que en una hipotética estación pública habría que tener las dos composiciones con la consiguiente complicación [178].

9.2 Obtención y materias primas

Los gases licuados del petróleo (GLP) se obtienen en los procesos de refino del petróleo y en los yacimientos de gas natural húmedo [179, 180]. De los citados procesos de refino se ha obtenido el 45% de la producción mundial de gases licuados del petróleo en los últimos 2 años, mientras que de los yacimientos de gas natural húmedo procede el 55% restante. Además, los gases licuados del petróleo (GLP) también pueden encontrarse de modo natural formando parte del crudo y del gas natural.

Existen diversos procesos de refino capaces de producir gases licuados del petróleo [178]:

- Reformado catalítico: proceso que utiliza naftas ligeras para producir compuestos aromáticos y gasolinas.
- “Cracking” catalítico: se utiliza gasóleo o nafta para producir etileno y propileno para usos petroquímicos.
- “Steam Cracking”: al igual que en el caso anterior, se utiliza gasóleo o nafta para producir etileno y propileno.
- Polimerización y alquilación: en este proceso se utilizan compuestos denominados butenos para producir gasolinas.
- “Cracking” térmico: se emplea gasóleo o fuel-oil para producir gasolina.
- “Coking” y “visbreaking”: se utiliza gasóleo pesado y residuo para producir coque.

Por otro lado, el porcentaje de gases licuados del petróleo (GLP) que proviene directamente de pozos de gas natural es previsible que se incremente en el futuro por tres razones principales [179, 180]:

- 1 Reducción de los gases licuados del petróleo (GLP) disponibles en las refinerías a medida que aumenta su uso como aditivo para mejorar el octanaje de las gasolinas.
- 2 Ampliación de la prohibición internacional de quemar los gases licuados del petróleo (GLP) que surgen de los pozos petrolíferos.
- 3 Incremento de los porcentajes de gases licuados del petróleo (GLP) existentes en los yacimientos de crudo actualmente en explotación.

9.3 Almacenamiento. Manipulación

9.3.1 Almacenamiento

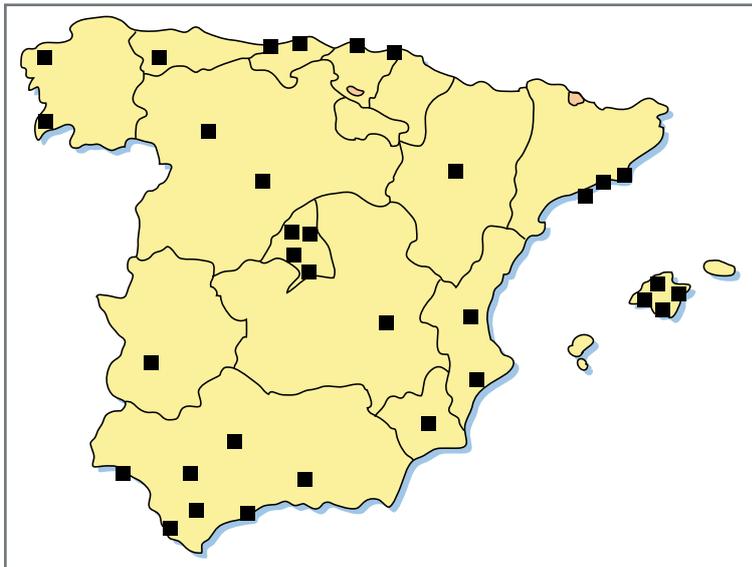
Las estaciones de almacenamiento y suministro de gases licuados del petróleo (GLP) se componen básicamente de los siguientes elementos [181, 182]:

- Depósitos de gases licuados del petróleo (GLP), aéreos o enterrados. Existe la posibilidad de instalaciones portátiles tipo SKID, con las que se minimizan los costes de montaje y las inversiones iniciales.
- Equipo de bombeo y suministro.
- Sistemas de seguridad: equipo de defensa contra incendios consistente en extintores de polvo seco. La cantidad de polvo seco ha de ser suficiente para asegurar los niveles mínimos de materia extintora establecidos por la reglamentación vigente para centros de almacenamiento de gases licuados del petróleo (GLP). Además, al ser el GLP, en estado gaseoso, más pesado que el aire hay que implementar sistemas de seguridad adicionales para evitar y/o reducir el accidente por acumulación de gas en determinadas zonas del suelo con el consiguiente peligro de explosión.

9.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

Los vehículos impulsados por gases licuados del petróleo (GLP) tienen que cumplir con elevados estándares de calidad y seguridad [179]. En particular, el depósito de los gases licuados del petróleo ha de ofrecer la resistencia necesaria para aguantar el impacto del vehículo en caso de accidente; debe disponer de una válvula de escape por si el GLP sufriera un recalentamiento; y todas las conducciones de gases tienen que construirse con materiales apropiados y mantener una distancia mínima de seguridad con los conductos de los gases de escape del motor. Además, en recintos cerrados donde se estacionen vehículos de GLP, se debe disponer de instalaciones de seguridad para impedir que se acumule el gas en determinados lugares como fosos, etc., debido a que el GLP en estado gaseoso es más denso que el aire.

9.4 Comercialización



Las ventas de este producto destinadas a automoción representan en España menos del 1% del consumo total de gases licuados del petróleo (GLP) a nivel estatal. En relación al total de instalaciones de suministro de hidrocarburos líquidos para vehículos, solo un número marginal de 34 instalaciones suministraban gases licuados del petróleo en el año 2005 en España (de éstas, un total de 9 eran instalaciones mixtas) [178-180].

Figura 33. Instalaciones que suministran gases licuados del petróleo (GLP) en España

Fuente: <http://www.motorglp.com> [182]

9.5 Modificaciones

Los vehículos impulsados por gas licuado del petróleo (GLP) son similares a sus equivalentes de gasolina, pero difieren en los sistemas de almacenamiento y alimentación de combustible. Esto es debido a que el GLP es un combustible gaseoso en condiciones normales de presión, pero se licua al someterlo a una presión relativamente baja [178], de alrededor de 10 bares. Gracias a ello y, para aumentar la cantidad de combustible en los depósitos, el almacenamiento del GLP en los vehículos se hace en estado líquido, aunque su combustión en el motor se realiza en estado gaseoso.

La mayoría de los coches impulsados por gases licuados del petróleo (GLP) en Europa son bi-combustible: tienen depósitos de GLP y de gasolina, y pueden cambiar de combustible con sólo apretar un botón. Con ello se aumenta la autonomía de los vehículos y se elimina el riesgo de quedarse sin combustible en caso de no encontrar una estación de servicio que suministre gases licuados del petróleo (GLP). Sin embargo, existen también vehículos mono-combustible impulsados exclusivamente por GLP. Éstos ofrecen la ventaja, frente a los bi-combustible, de tener un mejor rendimiento y menores emisiones contaminantes.

Muchos de los depósitos de los gases licuados del petróleo (GLP) son cilíndricos y se ubican en el maletero de los coches o en el compartimento de carga de las furgonetas, lo que reduce el espacio disponible para la carga. Una alternativa consiste en utilizar depósitos toroidales, diseñados para que quepan en el espacio de la rueda de repuesto, aunque en estos casos la rueda de repuesto se traslada normalmente al maletero con lo que el espacio útil se sigue viendo reducido. Normalmente, la capacidad de los depósitos instalados en los vehículos turismo oscila entre los 40 y 50 litros, aunque los que van en las furgonetas muchas veces superan los 80 litros. Los autobuses impulsados por gases licuados del petróleo (GLP), por otro lado, suelen tener depósitos de mucha más capacidad fijados en el techo.

La mayoría de los vehículos que utilizan gasolina pueden transformarse para funcionar también con gases licuados del petróleo (GLP) [179, 17, 184, 185], mientras que en los diésel dicha transformación no es económicamente viable, debido a las dificultades técnicas que suponen la instalación de bujías o el cambio de la relación de compresión, por citar sólo algunos de los cambios necesarios. La transformación de los motores de gasolina a motores impulsados por gases licuados del petróleo (GLP) puede ocasionar un aumento de las emisiones y problemas generales de funcionamiento si no se realiza correctamente, por lo que dicha transformación siempre debe llevarse a cabo en un taller autorizado.

9.6 Funcionamiento y mantenimiento

La mayoría de los conductores no notarían la diferencia entre un coche que funcione con gasolina y otro que lo haga con gases licuados del petróleo (GLP). El rendimiento y la potencia de los coches que utilizan GLP son parecidos a los de sus equivalentes de gasolina, y en la práctica se aprecian pocas diferencias entre ambos durante la conducción [180].

9.7 Ventajas [180, 181, 187-188]

- Actualmente, el gas licuado del petróleo (GLP) se ha convertido en el carburante más económico del mercado gracias a sus ventajas fiscales.
- Sencilla infraestructura de suministro del combustible (o, en otras palabras, de la estación de almacenamiento y llenado) y tiempos de repostaje mínimos.
- Ventajas medioambientales frente a los combustibles tradicionales. Reducción de los niveles de emisiones y de ruido en caso de motores diseñados y desarrollados para funcionar con GLP.
- Contribuye a la diversificación energética.
- Calidad controlada del combustible.

9.8 Desventajas [180, 181, 187-189]

- No es un combustible renovable. Una alternativa renovable al gas licuado del petróleo (GLP) es el dimetil éter (DME) obtenido a partir de fuentes renovables [137, 189].
- Coste de la inversión inicial requerida para adaptar el vehículo a su uso con gases licuados del petróleo (GLP).

- Escasez de infraestructuras existentes, tanto de estaciones de suministro como de talleres adecuados para adaptar y reparar vehículos impulsados por gases licuados de petróleo.
- Extracoste de inversión de las estaciones de servicio por los sistemas de seguridad adicionales requeridos para evitar la acumulación de gases procedentes de derrames y fugas que implican peligro de explosión.
- En el caso de los vehículos con motores transformados, las emisiones pueden ser superiores a las del vehículo de gasolina inicial.
- Reducción de la autonomía en los vehículos o, para mantenerla, necesidad de un mayor volumen de los depósitos, lo cual puede limitar la capacidad del maletero o del compartimento de carga.

9.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de infraestructuras • Más pesado que el aire • Necesidad de adaptación de los vehículos (conversión de gasolina a GLP) • Falta de garantía de que las emisiones de los vehículos transformados son iguales o inferiores a las de los originales y cumplen en todo caso la legislación vigente de emisiones contaminantes • Escaso interés de los fabricantes de vehículos • Escasa oferta de vehículos de serie a GLP, que obliga a recurrir a talleres de transformación con los consiguientes problemas de garantías • Demanda muy débil o inexistente en España 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de otros carburantes alternativos • Cambios en la política fiscal que pudieran aumentar el precio de este combustible • Combustible fósil
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas medioambientales • Precio del combustible GLP • Disponibilidad inmediata • Contribución a la diversificación energética 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de políticas de carburantes alternativos • Desarrollo de políticas medioambientales

9.10 Balance de emisiones [48, 181, 187-190]

Los vehículos con motores diseñados y desarrollados para su funcionamiento con gas licuado del petróleo (GLP) y homologados de acuerdo a las normas de emisiones contaminantes vigentes presentan unas emisiones contaminantes de NO_x y de partículas inferiores a los de los carburantes convencionales (gasolinas y gasóleos), así como unas emisiones de CO_2 inferiores a los niveles de los vehículos de gasolina y similares a las de los vehículos impulsados por gasóleo.

A continuación se resume el resultado del European Emission Test Programme (EETP), fruto de la colaboración entre las administraciones de UK, Francia, Países Bajos y la industria del GLP. En este estudio, se comparan las emisiones

de los vehículos que cumplen como mínimo la normativa “Euro 3” cuando se utilizan diferentes tipos de combustible en condiciones reales de conducción, si bien actualmente la normativa vigente es la “Euro 4” e incluso, “Euro 5” en vehículos industriales. De este modo, los comentarios recogidos en la tabla podrían cambiar, ya que las diferencias entre el GLP y el diésel y la gasolina probablemente se hayan acortado.

	Diésel	Gasolina	GLP	Comentarios
Óxidos de nitrógeno (NO _x)				Con el GLP son un 96% inferiores al diésel y un 68% respecto a la gasolina.
Partículas				Con el GLP es incluso ligeramente menor que con la gasolina.
Hidrocarburos (HC)				Cercano al límite de detección.
Monóxido de carbono (CO)				Es posible que la calibración y el diseño del motor puedan mejorar los resultados del GLP.
Dióxido de carbono (CO ₂)				El GLP no está en desventaja con el diésel, y futuros desarrollos en I+D podrían mejorar aún más los resultados.
Emisiones contaminantes no reguladas				Reduce significativamente la emisión de aldehídos, hidrocarburos poli-aromáticos, BTX y partículas de pequeño tamaño.
Formación de ozono				Los buenos efectos a nivel regional se ven empañados por los resultados a nivel local (los NO _x no se tienen en cuenta en este punto).
Calentamiento global				Fuertemente ligado a las emisiones de dióxido de carbono (CO ₂).
Acidificación				Sólo las emisiones de NH ₃ son mayores con GLP.

Tabla 10. Comparación de las emisiones de vehículos que utilizan GLP y de los vehículos diésel y gasolina que cumplen con la normativa “Euro 3”

Fuente: European Emission Test Programme (EETP) y Asociación Española de Operadores de Gases Licuados de Petróleo [180]

Conviene indicar que las emisiones de los vehículos de gasolina transformados para utilizar gases licuados del petróleo (GLP) en caso de no haber sido sometidos a las mismas condiciones de desarrollo y ensayos de homologación que los vehículos originales de gasolina, y con respecto a los vehículos ya concebidos en origen para funcionar con GLP, pueden presentar algunas diferencias con respecto a los resultados anteriores, incrementando las emisiones.

9.11 Balance energético [181, 188]

Los gases licuados del petróleo (GLP) siguen siendo una fuente de energía fósil, que tendrá un balance energético diferente dependiendo de si se encuentra de modo natural formando ya parte del crudo o del gas natural, o de si se produce artificialmente mediante procesos de refinado. Los rendimientos (relaciones entre la energía obtenida y la energía utilizada en el proceso) aproximados para cada proceso de refinado son los siguientes:

- Reformado catalítico: el rendimiento del GLP se sitúa entre un 5 y un 10%.
- “Cracking” catalítico: el rendimiento del GLP se sitúa entre un 5 y un 12%.
- “Steam Cracking”: el rendimiento del GLP se sitúa entre un 23 y un 30%.
- Polimerización y alquilación: el rendimiento del GLP se sitúa entre un 10 y un 15%.
- “Cracking” térmico: el rendimiento del GLP se sitúa entre un 10 y un 20%.
- “Coking” y “visbreaking”: el rendimiento del GLP se sitúa entre un 5 y un 10%.

9.12 Potencial tecnológico

El GLP es un combustible ampliamente extendido a nivel mundial y con una tecnología completamente desarrollada [187], por lo que no se prevén grandes avances tecnológicos en su producción y explotación. Actualmente, los gases licuados del petróleo (GLP) se extraen a partir de los procesos de refino (de donde se obtiene el 45% de la producción mundial) y de los yacimientos de gas natural húmedo (de donde procede el 55% restante). El porcentaje de gases licuados del petróleo (GLP) que proviene directamente de pozos de gas natural es previsible que se incremente en el futuro.

La adaptación de los vehículos con motor de encendido provocado para la utilización como combustible de gases licuados del petróleo (GLP) también es una tecnología perfectamente desarrollada, si bien se hace necesario, como ya se ha indicado anteriormente, una homologación, certificación e inspección de los mismos que compruebe sus emisiones. La mayoría de los coches impulsados por gases licuados del petróleo (GLP) en Europa son bi-combustible, lo que aumenta la autonomía de los vehículos. Sin embargo, existen también vehículos mono-combustible impulsados por gases licuados del petróleo (GLP), con la ventaja frente a los bi-combustible de tener mejor rendimiento y menores emisiones contaminantes.

9.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación [180, 181, 188]

La tendencia mundial al alza de los precios de los carburantes de los últimos años está teniendo un impacto más acusado en los destilados medios del petróleo (gasóleos y querosenos) que en las gasolinas y en el gas licuado del petróleo (GLP), si bien hay que tener en cuenta que al ser un producto derivado del petróleo su precio podría aumentar a medida que aumente el precio del barril. En 2007, el coste aproximado de transformación de un vehículo de gasolina a un vehículo bi-combustible de GLP y gasolina era de aproximadamente 1.400 euros (sin IVA) más los gastos de tramitación, que rondaban los 500 euros (igualmente sin IVA). El uso del GLP en automoción genera ahorros económicos netos únicamente a partir de un determinado número de kilómetros recorridos utilizando este combustible. Dicho número de kilómetros es función del apoyo de las administraciones a la inversión inicial que el ciudadano debe realizar.

Desde el punto de vista técnico, existe una tecnología de almacenamiento, distribución y consumo de los gases licuados del petróleo (GLP) de automoción plenamente desarrollada y de disponibilidad inmediata.

El nuevo “Reglamento de Seguridad y Calidad de los Combustibles Gaseosos” obligará al cumplimiento de la norma UNE 60630 [183] sobre construcción de estaciones de servicio que suministren gases licuados del petróleo (GLP). Con ello se reducirán las restricciones técnicas existentes hasta la fecha y se favorecerá una implantación del GLP para automoción en las estaciones de servicio aún más rápida y a menor coste.

Por otro lado, con la reciente introducción en nuestro país de ciertas modificaciones normativas, que incluyen una significativa rebaja del tipo impositivo aplicable a los gases licuados del petróleo (GLP) para vehículos de uso particular y la posibilidad de adaptar los vehículos particulares al uso de este combustible, han desaparecido algunas de las barreras que hasta ahora habían impedido su desarrollo. La normativa fiscal favorece, entre otros combustibles, al GLP.

La normativa técnica relativa a los vehículos ha sido actualizada y unificada con Europa, aunque está pendiente de actualización la normativa de construcción de estaciones de servicio para vehículos impulsados por GLP [179]:

- Producto: Norma UNE/EN 589 de requisitos y métodos de ensayo del GLP para uso en automoción [191].
- Equipamiento y seguridad de los vehículos impulsados por gases licuados del petróleo (GLP): Reglamentos R-67 y R-115 de Naciones Unidas, aceptados por la Unión Europea y ratificados por España.
- Homologación de vehículos que utilizan gases licuados del petróleo (GLP): Real Decreto 2140/85, modificado por la Orden de 17 de abril de 2000, permitiendo la homologación de vehículos impulsados por gases licuados del petróleo para cualquier uso público o privado [185].
- Transformación de vehículos de gasolina a vehículos impulsados por gases licuados de petróleo: Real Decreto 736/1988 sobre “Reformas de importancia de Vehículos de Carretera”, modificado por medio de la Orden Ministerial CTE/3191/2002, permitiendo desde el 17/06/2003 la conversión a GLP de cualquier tipo de vehículo y para cualquier uso [180].
- Estaciones de repostaje: Reglamento de Seguridad en centros de almacenamiento y suministro de gases licuados del petróleo (GLP) a granel para su utilización como carburante de vehículos con motor (Orden de 24/11/1982). Dicho Reglamento se encuentra obsoleto, pero la nueva norma UNE 60630 [183] sobre construcción de estaciones de servicio de gases licuados de petróleo, adaptada a las pautas predominantes en otras normativas europeas del sector, se encuentra ya finalizada, y previsiblemente será de obligado cumplimiento en cuanto se apruebe el nuevo Reglamento de Seguridad y Calidad de los Combustibles Gaseosos.
- Fiscalidad: Ley 38/92 [36] de Impuestos Especiales, que establece en su Artículo 50 los tipos impositivos exigibles a los gases licuados de petróleo. Tras una reducción en 2003 del Impuesto Especial de Hidrocarburos (IEH) de 793 euros cada tonelada, a finales de 2005 se introdujo otra reducción hasta los 57,49 euros cada tonelada, igualando así el tipo impositivo general con el tipo especial para los vehículos de servicio público.
- Talleres: Norma UNE 60635 [192] sobre requisitos de los talleres de reparación y mantenimiento de vehículos que utilizan gases licuados del petróleo (GLP).

9.14 Mercado mundial

9.14.1 Situación actual [180, 193]

Aunque, no hay prácticamente vehículos de serie a GLP, por lo que se tiene que recurrir a talleres de transformación, existen más de 11 millones de vehículos que funcionan con gases licuados del petróleo en todo el mundo. Además, más de 1.450 autobuses urbanos circulan ya en 25 ciudades diferentes, y más de 21.000 estaciones de servicio suministran gases licuados del petróleo para automoción.

En Europa casi 6 millones de vehículos usan gases licuados de petróleo, de los cuales más de 4 millones lo hacen en el ámbito de la UE-25.

	Vehículos a GLP	Puntos de Venta
Polonia	2.000.000	5.900
Turquía	1.500.000	4.500
Italia	1.100.000	2.100
Holanda	320.000	2.050
Lituania	170.000	830
Rep. Checa	170.000	400

(continuación)

	Vehículos a GLP	Puntos de Venta
Francia	160.000	1.830
Gran Bretaña	128.000	1.278
Hungría	75.000	483
Bélgica	71.000	600
Alemania	65.000	1.000
Portugal	34.000	210
Croacia	30.000	93
Rumanía	25.000	100
Letonia	16.000	80
Dinamarca	2.750	8
España	2.500	31
Grecia	2.000	37
Noruega	2.000	39
Irlanda	1.000	130
Austria	550	–
Suecia	300	9
Total	5.875.100	21.708

Tabla 11. Mercado de gases licuados del petróleo (GLP) para automoción en Europa

Fuente: AEGPL Economic Report 2005. Istanbul, June 2006 [193]

A fin de favorecer una mayor penetración de este carburante en el entorno europeo, se están estandarizando procedimientos y aspectos técnicos relacionados con los gases licuados del petróleo (GLP). Así, diversos países europeos como Francia, Italia o Reino Unido han implantado medidas específicas para el fomento del uso del GLP en automoción. Ejemplos de algunas de estas medidas son [180]:

- Aplicación de impuestos especiales reducidos.
- Exención parcial o total del pago del impuesto de matriculación.
- Créditos fiscales para la compra de vehículos propulsados por este combustible.
- Subvenciones para la conversión de este tipo de vehículos.
- Incentivos para la adquisición de vehículos para flotas y para uso profesional, por ejemplo, taxis.

9.14.2 Perspectivas de futuro de los gases licuados del petróleo (GLP) [134, 135, 194]

Las instituciones europeas han venido abogando por el incremento del uso de diversos carburantes alternativos a la gasolina y el gasóleo, entre ellos, se encuentran los gases licuados del petróleo (GLP).

En esta línea, la Comisión Europea incluye a los gases licuados del petróleo en sus políticas de desarrollo de carburantes alternativos para automoción. En el documento “Market development of alternative fuels” publicado en diciembre de 2003 por el “Alternative Fuels Contact Group” (en castellano, Grupo de Contacto para Combustibles Alternativos) de la Comisión Europea, en concreto en el punto 4 del capítulo 7 de conclusiones, se indica que: “El

GLP es una realidad como combustible alternativo para los vehículos y su cuota de mercado tiene todavía un considerable margen de crecimiento, posiblemente hasta alcanzar el 5% de cuota de mercado antes del año 2010”.

9.15 Mercado español

9.15.1 Situación actual

Desde 1990, el consumo total de gas licuado del petróleo (GLP) en España ha permanecido estabilizado en el entorno de entre 2,3 y 2,6 millones de toneladas al año. Dicho consumo incluye, entre otros usos, tanto el combustible dedicado a aplicaciones residenciales (calefacciones y agua caliente) como el utilizado en automoción. En 2005 se consumieron en España 2,29 millones de toneladas de gases licuados del petróleo (GLP), cifra ligeramente inferior a la consumida en 2004. El consumo envasado supuso 1,5 millones de toneladas, mientras que el resto fue consumido en la modalidad de suministro a granel y canalizado [179].

En términos generales, España es, en estos momentos, el país europeo con un mayor consumo de este combustible. Ello se debe a su gran importancia para el sector residencial, como lo prueban sus 13 millones de consumidores, si bien se espera que el consumo de este combustible vaya reduciéndose lentamente en el futuro a medida que vaya siendo sustituido por el gas natural.

En cuanto al GLP de automoción, en España [180, 187] el consumo hasta la fecha ha sido prácticamente residual, con una tendencia descendente en los últimos años (sólo entre los años 2000 y 2002 su uso disminuyó un 25,8%). El uso de los gases licuados del petróleo en España queda reservado a vehículos de servicio público, principalmente taxis y autobuses urbanos, y a flotas de carretillas elevadoras. En este último caso, el GLP se utiliza envasado en botellas de 12 kg de capacidad. Las ventas de este producto representaban menos del 1% del consumo total de gases licuados del petróleo (GLP).

Desde el 17 de julio de 2003 la reglamentación española permite la conversión a GLP de cualquier vehículo de gasolina, con independencia de su uso, eliminando así la restricción que hasta esa fecha limitaba dicha transformación a los vehículos para uso como taxi. Además, el 31 de diciembre de 2002 se publicó una modificación de la Ley de Impuestos Especiales, que redujo el Impuesto Especial de Hidrocarburos (IEH) sobre el GLP para uso en automoción en vehículos privados, pasando éste de 795 euros por tonelada a 125 euros por tonelada. En el caso de los vehículos de servicio público, se mantuvo entonces un IEH reducido de 57,47 euros por tonelada. Pero, posteriormente, la Ley 22/2005 de 18 de noviembre, por la que se incorporan al ordenamiento jurídico español diversas directivas comunitarias en materia de fiscalidad de productos energéticos, ha vuelto a bajar el IEH sobre el GLP para su uso en automoción en vehículos privados, igualándolo al de los vehículos de servicio público, es decir, reduciéndolo hasta los 57,47 euros por tonelada.

Como se ha indicado, el GLP de automoción presenta ciertas ventajas desde el punto de vista medioambiental (principalmente en cuanto a las emisiones contaminantes) frente a los carburantes convencionales (gasóleos y gasolina). Estas ventajas, unidas a sus propiedades físico-químicas y al avance tecnológico de los vehículos que lo utilizan, hacen del GLP para automoción una buena alternativa a dichos carburantes convencionales, sobre todo en entornos urbanos [187].

Todo lo anterior, y fundamentalmente la reciente introducción en nuestro país de ciertas modificaciones normativas que incluyen una significativa rebaja del tipo impositivo aplicable al GLP en los vehículos de uso particular, y la posibilidad de adaptar los vehículos particulares para el uso de gases licuados de petróleo han hecho desaparecer algunas de las barreras que hasta ahora habían impedido el desarrollo en España de este combustible.

En la actualidad, existen en España cinco empresas suministradoras de gases licuados del petróleo (GLP) para uso en automoción, las cuales gestionan un total de 31 estaciones de suministro. Las ventas totales de GLP de automoción en España durante el año 2004 fueron aproximadamente de 18.000 toneladas (equivalentes al 0,8% del total de ventas de GLP en España), y el número de vehículos en circulación que utilizan este combustible asciende a 4.000.

Es de destacar la ciudad de Valladolid, cuya empresa de autobuses urbanos cuenta con 100 autobuses funcionando con GLP.

9.15.2 Perspectivas de futuro de los gases licuados del petróleo (GLP)

La Comisión Nacional de la Energía (CNE) indica que resulta conveniente desarrollar los gases licuados del petróleo (GLP) para su uso en automoción en España. Según el “Informe sobre el GLP Automoción en España” publicado por dicha comisión en enero de 2004 [187]: *“El GLP presenta ciertas ventajas desde el punto de vista medioambiental frente a los carburantes convencionales en los más importantes parámetros de emisiones contaminantes. Estas ventajas (...) hacen del GLP una buena alternativa a dichos carburantes, sobre todo en entornos urbanos”*.

Por otra parte, dentro de la Estrategia E4 de Ahorro y Eficiencia Energética en España y de los consiguientes Planes de Acción, se vienen contemplando desde el año 2006 ayudas tanto a la renovación de vehículos como a la implantación de estaciones de carga. Para el ejercicio 2008 la adquisición de un automóvil o vehículo industrial con MMA hasta 3.500 kg se subvenciona con un 15% del valor de mercado, hasta un máximo de 2.000 € o con 450 € para las transformaciones de un vehículo a GLP. A partir de 3.500 kg la subvención es del 15% del total del coste de adquisición hasta un máximo de 12.000 €. Además, las estaciones de carga son objeto de una ayuda de entre 30.000 hasta 60.000 euros según sean individuales o colectivas. Como ya se ha comentado, dichas ayudas son gestionadas por las diferentes CC.AA. a través de convenios de colaboración suscritos con IDAE. Estas subvenciones son compatibles con otras ofertas de fabricantes o vendedores de vehículos. También, a nivel nacional, existe una deducción fiscal por adquisición de vehículos ecológicos (cumpliendo normas medioambientales más estrictas que la reglamentación vigente), del 9% del valor total de la inversión en el año fiscal correspondiente a la misma.

En España, el uso del GLP de automoción ha estado hasta hace poco limitado a taxis y autobuses urbanos, debido fundamentalmente a [195]:

- Un alto impuesto especial para vehículos particulares de 796 euros por tonelada (en vigor hasta el año 2003).
- La prohibición de la homologación de vehículos impulsados por gases licuados del petróleo (hasta el año 2000).
- La prohibición de la conversión a GLP de vehículos de gasolina privados (vigente hasta 2003).
- La rigidez de la reglamentación técnica relativa a la construcción de estaciones de servicio que suministran gases licuados del petróleo (hasta 2005).
- La ausencia general de apoyos por parte de las distintas administraciones estatales, autonómicas y locales.
- El fuerte apoyo general a la tecnología Diesel (con un Impuesto Especial de Hidrocarburos, por ejemplo, incluso más bajo que el mínimo establecido en la Directiva Europea correspondiente).

La actual coyuntura representa una ventana de oportunidad para el uso del GLP de automoción en España y, en concreto [187]:

- La reglamentación técnica sobre vehículos actualizada y armonizada con el resto de Europa.
- El Impuesto Especial de Hidrocarburos (IEH) reducido de sólo 57,47 euros por tonelada.
- Las Ayudas IDAE del Plan de Acción 2008-2012.
- Las nuevas normativas medioambientales.
- La coyuntura de altos precios de los carburantes convencionales.
- La creciente concienciación medioambiental en la población.

9.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

En Europa existen 18 fabricantes que comercializan en total más de 60 modelos diferentes de automóviles propulsados con gases licuados del petróleo (GLP). En el ámbito europeo, existen además varios fabricantes de equipos para la transformación de vehículos convencionales en vehículos impulsados por gases licuados del petróleo. Los más destacados son: BRC, Landirengo, Motor GLP, Vialle, Teleflex GFI, Tartarini Auto, Vogels Autogas Systemen y E-gas.

Por otro lado, en España existen 26 talleres instaladores autorizados para transformar vehículos para su utilización con gases licuados del petróleo (GLP).

Ya en el año 1988 se inició un plan piloto en España para estudiar la viabilidad del GLP como carburante en el transporte público. En dicho plan colaboraron el, entonces, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU), Repsol Butano, Pegaso y cuatro empresas de transportes públicos municipales (en Badalona, Palma de Mallorca, Barcelona y Valladolid). Cada una de dichas empresas municipales de autobuses dispuso de 4 vehículos marca Pegaso modelo 6038. El propio fabricante de los vehículos fue quien realizó las transformaciones necesarias en los mismos.

En el año 1993, y como consecuencia de los resultados obtenidos en el plan piloto, la empresa municipal de Valladolid, AUVASA, decidió incorporar a su flota autobuses impulsados por gases licuados del petróleo (GLP). Actualmente esta empresa cuenta ya con más de 100 autobuses urbanos que funcionan con GLP. Valladolid es, de hecho, una de las ciudades líderes en Europa en cuanto a la utilización de este combustible en flotas de autobuses, junto con Viena.

10 Vehículos eléctricos

10.1 Definición y características básicas

El concepto de “vehículo eléctrico” que se desarrolla en este capítulo engloba a todos aquellos vehículos que utilizan para su propulsión la energía eléctrica, utilizando para ello un motor eléctrico en lugar de un motor de combustión y un conjunto de baterías en sustitución del depósito de combustible.

A causa de la baja densidad de energía específica de las baterías (principalmente baterías de níquel-hidruros de metal, más abreviadamente conocidas como Ni-MH, o baterías plomo-ácido), la autonomía de este tipo de vehículos suele estar bastante limitada, no sobrepasando en la mayor parte de los casos los 60-100 km de recorrido por recarga. No obstante, los últimos desarrollos de las baterías de litio-ión, o Li-Ion, están relanzando el concepto de los vehículos eléctricos de batería y están abriendo nuevos campos de aplicación.

Por otro lado, existen otras formas de almacenar energía eléctrica a bordo del vehículo, por ejemplo en forma de hidrógeno. El hidrógeno se transforma en electricidad en una pila de combustible. Este concepto se analiza más adelante en el capítulo dedicado a los vehículos de pila de combustible.

Por último, el concepto de vehículo híbrido, que será tratado específicamente en el capítulo 11, se aplica a aquellos vehículos en cuya propulsión se usa un motor térmico convencional combinado de alguna forma con un motor-generador eléctrico.

10.2 Obtención y materias primas

Los vehículos eléctricos de baterías (BEV) obtienen de la red eléctrica la energía que emplean para su propulsión. La fuente original de energía depende, por tanto, de las alternativas disponibles de generación de energía eléctrica en cada país.

10.3 Almacenamiento. Manipulación

10.3.1 Almacenamiento

En los **vehículos eléctricos de baterías (BEV)**, el almacenamiento de energía a bordo del vehículo se realiza, obviamente, mediante baterías, que se recargan mediante carga conductiva a través de un enchufe que se conecta directamente a la red eléctrica.

La distribución de electricidad se puede hacer, en todos los casos, a través de la red doméstica habitual, si bien es cierto que la instalación eléctrica normal de los hogares, por ejemplo los fusibles domésticos, pueden no ser adecuados para recargas rápidas. Ello se debe al alto consumo eléctrico puntual que dichas recargas rápidas exigen, y que pueden hacer saltar los limitadores o fusibles domésticos.

10.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad [44]

Hay que tener en cuenta que las baterías convencionales de plomo-ácido deben recargarse en habitaciones con ventilación. La ventilación es necesaria debido a que durante la recarga de las baterías se forma hidrógeno, el cual no debe acumularse para evitar riesgo de explosión. Por otro lado, el suelo debe resistir salpicaduras de ácidos.

En todos los casos es importante recordar que el agua y el vapor de agua deben permanecer alejados siempre de cualquier aparato eléctrico.

Además, los vehículos deben tener un dispositivo de bloqueo para impedir funcionamientos inadvertidos en caso de fallo eléctrico. Por último, los altos voltajes utilizados actualmente en el tren de potencia de los vehículos requieren un aislamiento adecuado de todos los componentes eléctricos.

10.4 Comercialización

La distribución de electricidad se hace a través de la red ordinaria. Los vehículos eléctricos disponibles ya a la venta se enumeran más adelante en el apartado correspondiente (apartado 10.16).

10.5 Modificaciones

Los componentes principales de un coche eléctrico de batería se muestran en la figura siguiente y fundamentalmente son [199, 200]: baterías, motor eléctrico, sistema de conexión mecánica entre el motor eléctrico y la transmisión, controlador del motor eléctrico, potenciómetro, interruptor principal, interruptor de seguridad, fusible principal, dispositivo de conexión del cableado, interruptor de carga y transformador o convertidor de voltaje de corriente continua a corriente continua (o, inglés, Direct Current/Direct Current - DC/DC).

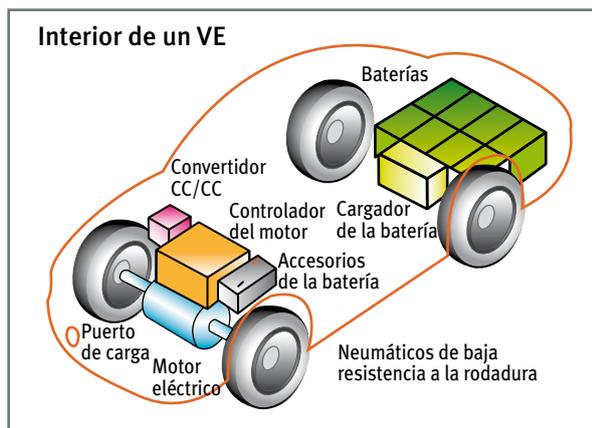


Figura 34. Principales componentes de un vehículo eléctrico
Fuente: http://www.evadc.org/ev_faq.html [200]

La batería ideal para un vehículo eléctrico debería tener una alta energía específica por unidad de peso (vatios-hora por kilogramo, o Wh/kg), una alta densidad de energía por unidad de volumen (vatios-hora por litro, o Wh/l), una alta potencia específica por unidad de peso (W/kg), un largo ciclo de vida útil y un tiempo de recarga corto. También debería ser segura, reciclable y económica. Sin embargo, actualmente todavía no se dispone de ninguna batería que ofrezca todas estas características. Los tipos más comunes de batería son los que se resumen a continuación [200, 202]:

- Las **baterías de plomo-ácido** se usaron por primera vez hace casi un siglo y medio y siguen siendo por ahora las baterías más usadas en los vehículos eléctricos. Son muy económicas y fáciles de reciclar. Sin embargo, ofrecen una baja energía específica (aproximadamente 30 Wh/kg) y una baja densidad de energía, por lo que resultan grandes y pesadas, y proporcionan al vehículo una autonomía limitada.
- Las **baterías de níquel-cadmio** (Ni-Cd o nicad) se han utilizado durante bastantes años. Tienen una mayor energía específica (cerca de 55 Wh/kg) y una mayor densidad de energía que las baterías de plomo-ácido. Sin embargo, debido a que el cadmio es un metal pesado contaminante, en el año 2002 una Directiva europea prohibió la instalación de estas baterías en los vehículos eléctricos nuevos construidos a partir de finales del año 2005.
- Las **baterías de níquel-hidruros metálicos** tienen una energía específica de alrededor de 70-80 Wh/kg y una vida útil muy larga (medida en términos de ciclos de trabajo). Son reciclables y relativamente más respetuosas con el medioambiente, dado que el ánodo está hecho con una aleación de metales no pesados. Las baterías de níquel-hidruros metálicos, en sus versiones de menor tamaño, se están empleando actualmente en la mayoría de los vehículos híbridos.
- Las **baterías de iones de litio** tienen una energía específica muy alta, de aproximadamente 100-120 Wh/kg y un alto número de ciclos de trabajo (en otras palabras, una larga vida útil). Se han fabricado varios prototipos de vehículos eléctricos con baterías de litio, aunque desgraciadamente, por ahora, el precio de las mismas sigue siendo prohibitivo para su uso masivo en vehículos.

10.5.1 El concepto “eCorner” de Siemens [203]

La empresa Siemens VDO está trabajando en los últimos años con el objetivo de integrar la transmisión, la dirección, los amortiguadores y los frenos directamente en las ruedas de los coches del futuro. Este concepto, llamado eCorner, es la base para los futuros automóviles conducidos mediante cables eléctricos o controles electrónicos (o, en inglés, “Drive-by-Wire”). El eCorner sustituye la suspensión convencional de amortiguadores hidráulicos, la dirección mecánica, los frenos hidráulicos y los motores de combustión interna convencionales por dispositivos exclusivamente eléctricos. Esta tecnología persigue un menor consumo y una mayor seguridad. Además, ofrece a los diseñadores completa libertad a la hora de crear nuevos diseños de automóviles.

A medio plazo, Siemens VDO proyecta sustituir la arquitectura tradicional del motor y la transmisión mecánica con motores eléctricos individuales acoplados a cada rueda. Los cuatro motores con funcionamiento independiente en cada rueda ofrecerán una conducción más dinámica.

La empresa cree que el comienzo de la producción en masa de los frenos electrónicos constituye un importante punto de partida en el desarrollo del concepto eCorner. El primer coche con freno electrónico de cuña (o, en inglés, Electronic Wedge Brake - EWB), según Siemens VDO, estará circulando por carretera a finales de esta década y mostrará las ventajas de un sistema de frenos totalmente eléctrico. Ello abrirá la puerta para que otros sistemas igualmente eléctricos sean integrados en la ruedas. Pero el mayor avance hacia el eCorner será el módulo de esquina integrado. Durante la década próxima, este módulo integrará todos los sistemas en la rueda a excepción de los amortiguadores y la dirección electrónicos. Como puede entenderse, el concepto del eCorner no se llevará a la práctica a corto o medio plazo, por lo que habrá que esperar aún cerca de una década hasta que pueda ser producido en grandes series.

10.6 Funcionamiento y mantenimiento

Gracias al alto par de empuje de los motores eléctricos, los vehículos eléctricos son fáciles de conducir tanto en zonas urbanas como en carretera. Como contrapartida, los vehículos puramente eléctricos pueden tener autonomías limitadas, y este hecho se ve agravado normalmente a bajas temperaturas, ya que la capacidad de las baterías en frío es normalmente mucho menor (si bien es cierto que dicha capacidad depende del tipo concreto de batería) [44].

Las características de conducción de los vehículos eléctricos suelen ser, por tanto, muy buenas. Los vehículos disponen de buena aceleración y potencia y en lo relativo a la comodidad es de destacar la ausencia de muchos de los ruidos y vibraciones típicos de los motores de combustión interna.

Por otro lado, los sistemas eléctricos modernos prácticamente no requieren mantenimiento, si bien las baterías deben ser revisadas de vez en cuando y el sistema de refrigeración limpiado regularmente.

10.7 Ventajas

- La electricidad es un vector energético muy flexible, pudiendo obtenerse de numerosas fuentes. Ello reduce los riesgos derivados de una eventual concentración excesiva en una única fuente primaria de energía.
- Los vehículos eléctricos no emiten contaminantes locales, algo particularmente importante en entornos urbanos. Apenas emiten ruido.
- Pueden aprovechar o recuperar parte de la energía cinética generando electricidad durante las frenadas.

10.8 Desventajas

- Autonomía reducida y limitada por la capacidad de las baterías.
- Escasa oferta de vehículos: en el mercado español no hay ofertado ningún vehículo turismo (categoría M1), siendo todos los modelos a la venta del tipo cuadríciclo ligero (L6e) o cuadríciclo pesado (L7e).

- Altos costes iniciales de los vehículos. Una gran parte del coste de los vehículos eléctricos depende de la batería, en particular de su tipo y de su capacidad. El tipo y la capacidad de la batería determinan la autonomía del vehículo, su velocidad máxima, la duración de la vida útil de la batería y su tiempo de recarga.
- Ausencia de infraestructuras de suministro de electricidad en las carreteras.

10.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • La electricidad no es una fuente de energía sino un vector energético, y como tal hay que generarlo y transportarlo. Durante su producción y transporte se consume una cierta energía (mayor o menor dependiendo del proceso y del lugar de generación de la electricidad) • Ausencia de infraestructuras de suministro de electricidad en las carreteras • Necesidad de mejorar y abaratar las baterías • Autonomía reducida del vehículo • Precio muy alto de los vehículos 	<ul style="list-style-type: none"> • Los híbridos, especialmente los del tipo enchufable, prácticamente poseen todas las fortalezas de los vehículos eléctricos y no presentan prácticamente desventajas • El precio de la electricidad es muy dependiente del precio del gas natural o del petróleo
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • El uso de la electricidad en los vehículos no produce emisiones locales ni de gases de efecto invernadero ni de otros contaminantes del aire • El motor eléctrico es muy eficiente a bajas cargas • Se puede producir electricidad a partir de múltiples fuentes, incluidas fuentes energéticas sostenibles y locales 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de emisiones contaminantes locales en las ciudades • Impulso al desarrollo de un sistema optimizado de producción y distribución de electricidad a partir de fuentes renovables • Desarrollo de sistemas de recarga rápida

10.10 Balance de emisiones [44]

Los vehículos eléctricos no emiten contaminantes por el tubo de escape. De hecho, ni siquiera tienen tubo de escape. Ello les hace particularmente atractivos desde el punto de vista medioambiental en las zonas urbanas congestionadas, en donde la deficiente calidad del aire frecuentemente causa problemas de salud.

Un análisis completo de los beneficios medioambientales de los vehículos eléctricos debe, sin embargo, considerar las emisiones asociadas a la producción, suministro y distribución de la electricidad utilizada para recargar los vehículos. En muchos países es fácil calcular el dióxido de carbono (CO₂) atribuible a la propulsión de los vehículos eléctricos, ya que se dispone de cifras promedio de la cantidad de CO₂ que se genera para producir un kilovatio-hora (kWh) de electricidad. En el Reino Unido, por ejemplo, dicho valor es 430 gramos de CO₂ por kilovatio-hora entregado (g CO₂/kWh). En el caso de pequeños coches eléctricos o de furgonetas de reparto, como el Peugeot 106 o el Citroën Berlingo, el valor anterior se traduce en aproximadamente 80-90 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido (g CO₂/km), una cifra comparable a las emisiones del híbrido de dos asientos Honda Insight, y considerablemente menor que la cifra de cualquier vehículo convencional diésel o gasolina. En Francia, donde una gran parte de la electricidad se

produce mediante centrales nucleares, o en Suiza, donde la mayor parte de la electricidad se produce en plantas nucleares o hidráulicas, las emisiones de CO₂ por kilómetro recorrido podrían ser bastante menores.

Por otro lado, las baterías pueden tener un impacto medioambiental elevado debido a la energía requerida para fabricarlas. También es preciso tener en cuenta el riesgo de que al final de su vida útil las baterías contaminen el subsuelo o los fondos marinos. No obstante, las baterías para vehículos eléctricos más utilizadas (las de plomo-ácido y las de níquel-hidruros de metal, o Ni-MH) son totalmente reciclables. Además, la Directiva Europea de Final de Vida de los Vehículos (2000/53/EC) exige que todas las baterías utilizadas en los automóviles sean recicladas.

10.11 Balance energético

Puesto que la electricidad es un vector energético, el balance energético de los vehículos eléctricos dependerá de la eficiencia de la fuente de energía que la produce. También habrá que tener en cuenta a la hora de calcular el balance energético la eficiencia de la transmisión de la electricidad desde el punto de producción hasta el punto de consumo. Y, por último, habrá que considerar en dicho balance la eficiencia del motor eléctrico y del sistema de propulsión del vehículo.

10.12 Potencial tecnológico

La electricidad es un vector energético tan limpio como la fuente de la que se obtiene. Por tanto, el mayor potencial para reducir las emisiones radica en las mejoras tecnológicas de su proceso de generación:

- Fuentes renovables: sin emisión de dióxido de carbono (CO₂).
- Productos biológicos: hay una sustancial rebaja en las emisiones de CO₂ con respecto a la generación con combustibles fósiles (parte del CO₂ que se emite previamente se ha captado de la atmósfera por la planta).
- Fuentes fósiles: con emisión a la atmósfera de CO₂. Estas emisiones también se pueden reducir si se aplican técnicas de captura y confinamiento del CO₂.

10.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación

Los costes generales del vehículo eléctrico tienen dos componentes diferenciadas: el coste del vehículo en sí, y los costes de funcionamiento. El precio del vehículo se ve influenciado por el elevado coste de las baterías, mientras que el coste de operación o funcionamiento (en definitiva, el precio de la electricidad) está influenciado por las decisiones gubernamentales, además de depender de la fuente y del método de generación de electricidad utilizado.

En muchos países de la Unión Europea los vehículos eléctricos gozan de algunos beneficios fiscales, como la supresión del Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) o la exención del impuesto de circulación [44].

En general, los principales mercados potenciales de los vehículos eléctricos son las flotas cautivas de servicios de transporte urbano de viajeros y de recogida de basuras, las flotas cautivas de vehículos ligeros de organismos públicos y, en menor medida, los vehículos para uso particular.

10.14 Mercado mundial

10.14.1 Situación actual

Los principales factores que determinarán el potencial mercado de los VEB son la autonomía, el tiempo y facilidad de recarga y el precio. El desarrollo de baterías con alta densidad de carga que permitan autonomías y prestaciones equivalentes a los vehículos convencionales jugará un papel fundamental para la progresiva penetración de vehículos eléctricos en el mercado.

De hecho, en los últimos años, la no existencia de una tecnología apropiada de baterías ha supuesto que la mayoría de fabricantes de vehículos turismo abandonasen el desarrollo de vehículos eléctricos puros o hayan optado por desarrollos basados en la hibridación o la pila de combustible.

No obstante, en el mercado actual hay una oferta de vehículo eléctrico cada vez mayor, si bien es cierto que la mayoría de los modelos son del tipo cuadríciclo y no vehículos turismo de categoría M1.

Más adelante y en este mismo capítulo, en concreto en el punto 10.16, se ofrece una lista de los principales vehículos eléctricos de batería que se comercializan actualmente.

10.14.2 Perspectivas de futuro de los vehículos eléctricos

A pesar de que los vehículos eléctricos puros no alcanzan el nivel de prestaciones demandadas por la sociedad, aún así, es posible que los vehículos eléctricos de baterías se introduzcan en el mercado como vehículos para zonas urbanas y congestionadas. En estos escenarios algunas marcas ya los están comercializando. También es probable, hasta que se desarrolle una infraestructura de carga adecuada, que la penetración sea mayor en los vehículos de flota, a lo que hay que sumar la favorable imagen que tienen asociada este tipo de vehículos por sus ventajas medioambientales, aspecto éste cada vez más valorado por determinado tipo de empresas y organismos.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los vehículos híbridos tienen muchas de las ventajas de los vehículos eléctricos, tienen prestaciones similares a las de los vehículos convencionales y no tienen problemas de autonomía. Por todo ello serán probablemente la opción que más se desarrolle en los próximos años.

10.15 Mercado español

10.15.1 Situación actual

Su introducción en el mercado público español se ha iniciado ya con el modelo Reva i. Además, se espera la incorporación de nuevos modelos próximamente, ya que es un modo de transporte que por sus cualidades es objeto de apoyos públicos. En todo caso, es previsible que por su pequeño tamaño y nulas emisiones locales este vehículo eléctrico resulte especialmente apto para uso en el interior de núcleos urbanos o congestionados.

Como ejemplo de medidas incentivadoras, la Junta de Castilla y León, a través de su Ente Regional de la Energía (EREN), subvencionaba ya en el año 2005 la compra de automóviles, furgonetas y motocicletas de propulsión eléctrica por empresas, particulares, asociaciones sin ánimo de lucro y entidades locales de Castilla y León, con un importe máximo de 5.700 euros por cada automóvil y de 1.050 euros por cada motocicleta.

Por otra parte, dentro de la Estrategia E4 de Ahorro y Eficiencia Energética en España y de los consiguientes Planes de Acción, se vienen contemplando desde el año 2006 ayudas tanto a la renovación de vehículos como a la implantación de estaciones de carga. Para el ejercicio 2008, la adquisición de un automóvil o vehículo industrial con MMA hasta 3.500 kg se subvenciona con un 15% del valor de mercado, hasta un máximo de 6.000 €. A partir de 3.500 kg la subvención es del 15% del total del coste de adquisición hasta un máximo de 50.000 €.

10.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

Los vehículos eléctricos para uso en carretera normalmente no se venden a minoristas o propietarios particulares. Sin embargo, en el mercado hay ya algunos vehículos a la venta, como por ejemplo:

- Citroën Berlingo 500E Electricque.
- Veturi Vetish, Ariana Ev IEV 797.
- Vehículos de dos asientos: como Kewett Buddy, Maranello y Reva.

Además de algunos vehículos para utilización en áreas muy concretas, también hay ya a la venta varios modelos de vehículos ligeros de carga, como el YDEA Micro Vett eléctrico o el Piaggio Porter Van.

También hay disponibles diversos modelos de autobuses eléctricos:

- Battery Mini Bus Breda.
- Gepebus.
- Iveco Europolis.
- Micro Vett Schoolbus, un microbús basado en el Iveco Daily.
- Tecnobus Gulliver.

Los siguientes vehículos eléctricos de baterías de pequeño tamaño pueden utilizarse en zonas restringidas o en cascos históricos o urbanos:

- Graf Carello Transporter.
- Aixam Mega.
- Alke' ATX.
- Tasso Domino.
- H2 Truck, un pequeño vehículo de carga especialmente adaptado para su uso en hospitales y aeropuertos.

En 2007, se puso a la venta al público en España el primer vehículo eléctrico, el Reva i, un pequeño vehículo del tamaño de un microcoche (aunque hace falta carné B para conducirlo). El Reva i dispone de autonomía para recorrer 60 kilómetros y puede recargar el 80% de sus baterías en dos horas y media en cualquier enchufe de 220V. Para una recarga completa de sus baterías se requieren cerca de 8 horas. Saldrá a la venta por 12.000 euros y debe pasar revisiones cada seis meses ó 7.000 km.

Otros modelos de vehículos eléctricos que actualmente se comercializan en España son:

- GEM cars: E2, E4, E6, EL, ELXD, ES.
- Microcar.
- Reva.
- Aixam: City.

11 Vehículos eléctricos híbridos

11.1 Definición y características básicas [10, 205-207]

Un vehículo eléctrico híbrido es aquél que combina un motor eléctrico, normalmente alimentado con baterías, y un Motor de Combustión Interna (MCI) convencional.

Los vehículos híbridos eléctricos se clasifican en tres tipos diferentes, atendiendo a su principio de funcionamiento:

- **Híbridos en serie.** En este caso no existe ninguna conexión mecánica directa entre el motor de combustión interna y las ruedas. El vehículo es impulsado enteramente por el motor eléctrico gracias a la electricidad generada por el motor de combustión que acciona un generador eléctrico. La batería actúa por lo tanto como acumulador de la electricidad (de la energía) sobrante y, cuando está totalmente cargada, permite la desconexión temporal del motor de combustión, de forma que el vehículo puede impulsarse momentáneamente de manera totalmente eléctrica.
- **Híbridos en paralelo.** En estos vehículos tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico trabajan simultáneamente para impulsar al vehículo. El sistema mecánico de tracción no es excesivamente complejo en esta arquitectura, puesto que el motor eléctrico simplemente trabaja “en paralelo” con el motor de combustión. Esto supone una notable simplificación a la hora de desarrollar una hibridación por parte de cualquier fabricante.
- **Configuración combinada.** En esta configuración el motor de combustión interna es capaz al mismo tiempo de cargar las baterías y de contribuir a la propulsión actuando sobre las ruedas. Ello hace posible que se pueda propulsar al vehículo únicamente mediante el motor de combustión, exclusivamente mediante el motor eléctrico o mediante una combinación de ambos motores. El concepto de un vehículo mixto es el de un vehículo híbrido con arquitectura en serie en el que también se ha conectado el motor de combustión directamente a las ruedas. Así, tanto el motor de combustión como el generador y el motor eléctrico están todos ellos interconectados y, a su vez, están directamente conectados a la transmisión del vehículo.

Los híbridos en serie ofrecen ventajas únicamente durante las operaciones de arranque y parada. Los híbridos en paralelo, por su parte, requieren algoritmos de control sofisticados pero tienen mejores eficiencias durante el funcionamiento a plena carga.

Algunos conceptos de vehículos, muy simples pero relativamente poco eficientes, poseen cuatro ruedas motrices: un eje (por ejemplo, el eje delantero) está propulsado por el motor de combustión y el otro por el motor eléctrico.

Existe otra clasificación alternativa, según la cual los vehículos eléctricos híbridos se pueden clasificar en semihíbridos, híbridos puros o híbridos enchufables [206, 208-210]:

- Se denomina **semihíbrido** “mild hybrid” cuando el motor eléctrico se utiliza para ayudar al motor de combustión a traccionar el vehículo y, además, el vehículo es capaz de recuperar parte de la energía cinética durante las frenadas mediante un freno eléctrico que actúa como generador de electricidad. Un semihíbrido no podría propulsarse con el motor térmico apagado. Un ejemplo de este tipo de vehículos es el Honda Civic Hybrid. Con este sistema se alcanzan ahorros del 15 al 25% de combustible. A pesar de tratarse ya de un ahorro considerable, Honda sigue desarrollando, en estos momentos, otros avances en los equipos de transmisión y motor.
- Si, además, el vehículo es capaz de circular en determinadas condiciones o de forma voluntaria usando sólo el motor eléctrico (y con el motor térmico apagado) se llama **híbrido puro** “full hybrid”. El Toyota Prius y los Lexus RX-400h y GS450h pertenecen a esta categoría.
- Y cuando los vehículos están preparados para recargar las baterías enchufándolos a la red eléctrica, entonces se denominan **híbridos enchufables** “plug-in hybrid”. Este tipo de vehículos se está desarrollando principalmente en Estados Unidos y permiten un funcionamiento más prolongado en modo exclusivamente eléctrico.

Ese vehículo es un...				
Si...	Vehículo Convencional	Semihíbrido	Híbrido puro	Híbrido enchufable
Detiene automáticamente el motor de combustión en paradas				
Utiliza frenado regenerativo y funciona por encima de 60 voltios				
Utiliza un motor eléctrico para ayudar al motor convencional				
Puede funcionar a veces utilizando sólo el motor eléctrico				
Recarga las baterías utilizando electricidad de la red y tiene una autonomía de al menos 32 km con electricidad				

Tabla 12. Clasificación de los vehículos según su funcionamiento híbrido

Fuente: <http://www.hybridcenter.org/hybrid-center-how-hybrid-cars-work-under-the-hood.html> [210]

Al margen de las categorías anteriores, también se pueden mencionar los vehículos **microhíbridos** [211]. Estos vehículos están impulsados principalmente por el motor de gasolina pero disponen de un motor de arranque eléctrico alimentado con un pequeño conjunto de ultracondensadores. Los microhíbridos paran automáticamente el motor de combustión interna convencional cuando el vehículo se detiene, y los ultracondensadores almacenan la energía necesaria para ponerlo en marcha de nuevo en cuanto se levanta el pie del freno. Además, los microhíbridos también pueden disponer de frenado regenerativo, consiguiendo en total ahorros de combustible que oscilan entre el 5 y el 15%.

Otra variante de los vehículos eléctricos híbridos son los denominados **vehículos eléctricos con autonomía aumentada** o, en inglés, “Electric Vehicles with Range-Extenders” [212]. Éstos son vehículos eléctricos que utilizan un motor térmico girando a un número constante de revoluciones por minuto para generar electricidad y recargar la batería cuando su nivel de carga cae por debajo de un cierto umbral mínimo. El desafío tecnológico necesario para hacer realidad este concepto es una batería de ión-litio de gran tamaño. Se estima que este tipo de coche requerirá un paquete de baterías que pesará unos 180 kg. Algunos expertos predicen que estas baterías se podrán fabricar a partir del año 2010 ó 2012.

En sentido estricto, se entiende que un vehículo es híbrido cuando consta de dos sistemas de almacenaje de energía (depósito de combustible y baterías eléctricas) y de una doble motorización térmica y eléctrica, de tal forma que ambas, de forma individual o conjunta, traccionan o participan en algún momento en la propulsión de dicho vehículo (no sólo en el arranque). Teniendo en cuenta esto, los microhíbridos y los vehículos eléctricos con autonomía aumentada no deberían considerarse híbridos.

11.2 Obtención y materias primas

El combustible utilizado actualmente por el motor de combustión es gasolina convencional obtenida en las refinerías de petróleo. Los híbridos enchufables además captan energía de la red eléctrica.

11.3 Almacenamiento. Manipulación

11.3.1 Almacenamiento

El almacenamiento del combustible utilizado por el motor térmico no presenta ninguna novedad, por tratarse de gasolina convencional.

11.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

En el caso de recargar los vehículos desde la red (vehículos enchufables), las estaciones de recarga deben estar aisladas, y los cables y los equipos de recarga no deben cruzar zonas de paso o peatonales [44].

Por otro lado, las baterías de plomo-ácido requieren que su recarga se efectúe en locales con ventilación debido a la formación de hidrógeno durante dicha operación. Por su parte, el suelo del local donde se realiza la recarga de las baterías o el mantenimiento del vehículo eléctrico híbrido debe resistir salpicaduras de ácidos [44].

En cualquier caso, es importante recordar que el agua y el vapor de agua deben permanecer siempre alejados de cualquier aparato eléctrico. Además, los vehículos deben disponer de un dispositivo de bloqueo para impedir funcionamientos inadvertidos en caso de producirse cualquier tipo de fallo eléctrico. Por su parte, los altos voltajes utilizados actualmente en el tren de potencia requieren que todas las partes electrificadas estén suficientemente aisladas.

11.4 Comercialización

Véase más adelante el apartado 11.16 referente a los vehículos híbridos comercializados actualmente.

11.5 Modificaciones

Las modificaciones necesarias para convertir un vehículo con motor de combustión interna convencional en un vehículo eléctrico híbrido son numerosas.

El motor térmico, bien sea de encendido provocado o de encendido por compresión, no requiere ser modificado, aunque siempre pueden optimizarse su diseño y sus parámetros de funcionamiento dependiendo de la velocidad de giro del motor (régimen) y del nivel de carga con los que vaya a funcionar normalmente.

Por otro lado, en el vehículo es necesario instalar un sistema híbrido adicional, el cual consta como elementos principales de un motor eléctrico, un generador y baterías. Normalmente no hacen falta grandes adaptaciones en la caja de cambios, aunque el alcance exacto de éstas depende de si se utiliza una configuración en serie, en paralelo o mixta.

11.6 Funcionamiento y mantenimiento

El motor térmico no presenta diferencias de funcionamiento o mantenimiento respecto a los vehículos convencionales. Por su parte, los sistemas eléctricos modernos prácticamente no requieren mantenimiento mecánico, si bien las baterías deben ser comprobadas periódicamente, y el sistema de refrigeración tiene que limpiarse a intervalos adecuados.

11.7 Ventajas [213]

- Menos ruido que un vehículo convencional cuando el vehículo es propulsado por el motor eléctrico.
- Más par a la rueda y mayor elasticidad que un motor convencional.
- Respuesta más inmediata.

- Recuperación de parte de la energía durante las deceleraciones (frenado regenerativo).
- Mayor autonomía que la de un vehículo eléctrico simple.
- Mayor suavidad y facilidad de uso.
- Recarga más rápida que en el caso de un vehículo eléctrico. Excepto en los vehículos eléctricos híbridos del tipo enchufable, básicamente el mismo tiempo necesario para llenar el depósito de gasolina o diésel.
- Mejor funcionamiento en recorridos cortos que un vehículo convencional. Consumo muy inferior. Con el motor en frío un automóvil con motor convencional puede llegar a consumir 20 litros de combustible a los 100 kilómetros. En recorridos cortos, en el caso de un vehículo híbrido, es posible que no haga falta encender el motor térmico, evitando que éste trabaje en frío y disminuyendo su desgaste.
- El motor térmico tiene una potencia más ajustada al uso habitual. No se necesita disponer de un motor muy potente por si eventualmente resultara necesaria una potencia adicional en situaciones puntuales. En caso de necesitarse una mayor potencia, el motor eléctrico se encarga de aportar la potencia adicional requerida.
- Instalación eléctrica más potente y versátil. Ello hace que sea muy difícil que el vehículo se quede sin batería, por ejemplo, si el conductor se olvida encendida alguna luz. La potencia eléctrica adicional también se puede utilizar para alimentar algunos equipamientos, como el aire acondicionado, con el motor térmico parado.

11.8 Desventajas [213]

- Mayor peso que un coche convencional debido fundamentalmente al peso añadido por el motor eléctrico y las baterías.
- Más complejidad, más posibilidad de averías.
- Precio de adquisición elevado en comparación con los vehículos convencionales.
- Disponibilidad limitada de ciertos componentes (baterías, trenes de propulsión, electrónica, etc.).

11.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor precio de los vehículos híbridos en comparación con sus homólogos convencionales • Oferta limitada de vehículos en España 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de otros carburantes alternativos • Cambios en la política fiscal
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas medioambientales • Disponibilidad inmediata • Se puede utilizar la misma infraestructura actual de reabastecimiento • Subvenciones para la adquisición de vehículos híbridos en algunas comunidades autónomas 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de nuevas políticas de subvenciones para la adquisición de vehículos de propulsión alternativa • Desarrollo de políticas medioambientales

11.10 Balance de emisiones [44, 206, 212]

Los vehículos híbridos más pequeños como el Honda *Insight* tienen emisiones de 80 gramos de dióxido de carbono (CO₂) por kilómetro recorrido (g/km). Dichas emisiones son menores que las de cualquier coche con motor de combustión interna alternativo disponible actualmente en el mercado. El Toyota *Prius*, con 104 g/km, es el turismo berlina de cinco plazas fabricado en serie con menores emisiones. La introducción en el mercado de este tipo de vehículos ayudaría a cumplir los acuerdos europeos para reducir las emisiones medias de CO₂ de los vehículos vendidos en la Unión Europea. A la vista de lo anterior, es fácil entender porqué los vehículos híbridos han generado una expectación tan considerable tanto en los ámbitos ecologistas como en el mundo del motor en los últimos años.

En cuanto a las demás emisiones reguladas (CO, HC, NO_x y partículas en suspensión), los vehículos híbridos también resultan muy atractivos para su empleo en el espacio urbano. Su popularización podría representar una importante reducción de la contaminación en dicho ámbito.

11.11 Balance energético [172, 212]

La eficiencia energética de los modelos eléctricos híbridos es siempre considerablemente mayor que la de sus homólogos no híbridos, ya que el sistema híbrido permite recuperar y almacenar parte de la energía cinética durante las frenadas, energía que de otro modo se disiparía en forma de calor en los frenos.

Además, algunas configuraciones de vehículos híbridos permiten al motor de combustión interna funcionar a un régimen de giro constante, al no estar el motor térmico conectado directamente a las ruedas. Así, en condiciones normales, el motor de combustión puede trabajar a su régimen de mayor rendimiento, y sólo sería necesario abandonar dicho régimen óptimo cuando la demanda de potencia fuera máxima. Cuando se demandara la máxima potencia el motor giraría a su régimen de potencia máxima (un régimen cercano al máximo de revoluciones).

Otro aspecto que mejora la eficiencia del vehículo híbrido es la modificación del ciclo termodinámico del motor. Así, los motores de algunos de estos vehículos funcionan siguiendo el ciclo Atkinson, ligeramente más eficiente que el ciclo Otto.

El Toyota Prius es el modelo de gasolina con mayor eficiencia energética de los que se venden en España. El Honda Civic Hybrid, por su parte, ocupa la tercera posición en la lista de vehículos actualmente a la venta en España que menos consumen, con unos valores similares a los de otros vehículos mucho más pequeños.

Es previsible que esta eficiencia sea aún mayor cuando aparezcan en el mercado modelos eléctricos híbridos con motor de combustión interna diésel, ya que su rendimiento es superior al del motor de gasolina.

11.12 Potencial tecnológico [44, 213]

En los vehículos eléctricos híbridos el motor de combustión interna no está sujeto a los requerimientos habituales de elevada potencia máxima y elasticidad a bajo y medio régimen, ya que también cuenta con la capacidad de empuje del motor eléctrico. La recuperación y el almacenamiento de energía eléctrica durante las operaciones de parada y arranque evitan, en gran medida, el funcionamiento ineficiente del motor de combustión a bajo régimen. En términos globales, el aspecto más importante es la reducción del tamaño del motor de combustión, algo que le permite operar en zonas de mayor eficiencia termodinámica. Además, el ciclo Atkinson o Miller de algunos motores de combustión interna reduce, aún más, el uso de combustibles convencionales y las emisiones asociadas.

La propulsión híbrida puede verse como una nueva forma más eficiente de gestionar la energía en los vehículos: reintroduciendo en el sistema la energía eléctrica recuperada durante las frenadas y que es almacenada en las baterías. Desafortunadamente, este potencial no se puede utilizar en aquellos viajes de larga distancia que se desarrollen a máxima potencia (como es el caso de la mayor parte de los desplazamientos realizados por los camiones). En el caso de los vehículos de pasajeros la combinación de motores de combustión interna con ligeros equipos

eléctricos permite, en teoría, construir vehículos híbridos eléctricos versátiles con un menor consumo de combustible en autopista. La reducción de consumo de estos vehículos en autopista se puede conseguir mediante la utilización de sistemas auxiliares eléctricos más eficientes (sistemas como, por ejemplo, la dirección asistida eléctrica, la refrigeración o los frenos eléctricos).

El concepto de vehículo híbrido se prevé que también entre pronto en el sector de las vehículos de dos ruedas, de hecho, ya hay al menos un modelo de moto híbrida: MOTO HÍBRIDA ECOLIFE 125cc/1.500W.

11.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación

Los vehículos híbridos tienen precios superiores a sus equivalentes convencionales, si bien ofrecen a cambio un importante ahorro de combustible. En la mayoría de los países de la Unión Europea, al igual que en muchos estados y ciudades de EE.UU., estos vehículos cuentan con subvenciones a su compra o con reducciones de determinados impuestos.

Actualmente, los costes de producción de los vehículos híbridos son considerablemente altos, sobre todo por el coste de las baterías y los motores eléctricos. Se espera que dichos costes se reduzcan a medida que los niveles de venta y fabricación de estos vehículos aumenten.

11.14 Mercado mundial

11.14.1 Situación actual

Por su elevado coste, las ventas de vehículos híbridos siguen siendo escasas en comparación con las ventas de vehículos convencionales. Aunque actualmente dichas ventas están limitadas más por la parte de la oferta que por la parte de la demanda. Así, tanto en EE.UU. como en los mercados europeos, hay listas de espera para la mayoría de los modelos. A corto y medio plazo se espera que estas tecnologías vayan ganando cada vez más cuota de mercado, con lo que los precios de venta previsiblemente se reducirán.

La venta de vehículos híbridos en Estados Unidos creció un 28% entre el año 2005 y el año 2006. En 2006 se vendieron en EE.UU. más de 250.000 vehículos híbridos, frente a los apenas 200.000 del año 2005. Estas ventas representaron el 1,5% de las ventas totales de vehículos en ese país [214]. En los últimos meses el ritmo de crecimiento de las ventas de vehículos eléctricos híbridos está comenzando a aminorar.

Toyota ha vendido ya a nivel mundial más de 500.000 vehículos de su modelo Prius desde que comenzara su comercialización en el año 1997 [215].

Las ventas en Europa de la segunda generación del Toyota Prius, lanzada en 2004, superan ya las 50.000 unidades. Sólo en 2006 se vendieron 22.800 Prius en Europa, 1.050 de ellos en España [216].

Lexus ha superado en 2006 las 50.000 unidades de vehículos vendidas en Europa, de las que 13.200 son vehículos con tecnología híbrida (un 26% de las ventas totales). De este fabricante japonés se puede destacar el modelo RX: el 85% de todas las unidades vendidas de este modelo se corresponde con la versión híbrida 400h [217].

11.14.2 Perspectivas de futuro de los vehículos híbridos

Actualmente, las ventas de vehículos híbridos en Europa y EE.UU. están limitadas principalmente por la oferta disponible de vehículos. Por otro lado, los principales fabricantes de automóviles prevén que la demanda de vehículos híbridos aumente significativamente en los próximos años. Por tanto, es previsible un aumento en el número de vehículos híbridos ofertados por los fabricantes a corto y medio plazo.

El apartado siguiente 11.15.2 repasa la lista de vehículos híbridos que llegarán al mercado europeo en los próximos años.

11.15 Mercado español

11.15.1 Situación actual

El número de vehículos híbridos vendidos en España durante el año 2005 alcanzó el millar. Todos ellos habían sido contruidos por fabricantes japoneses. En cuanto a los incentivos a su compra se pueden citar los siguientes:

- La Junta de Castilla y León, a través del Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN), subvenciona la diferencia de precio de automóviles, furgonetas y motocicletas de propulsión híbrida con un importe máximo para el año 2005 de 4.800 euros por cada automóvil o furgoneta, y de 1.050 euros por cada motocicleta. Los beneficiarios de dichas ayudas pueden ser empresas, particulares, asociaciones sin ánimo de lucro y entidades locales de Castilla y León.
- En 2005, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) también proporcionaba ayudas dentro de su línea de financiación ICO-IDAE para la adquisición de vehículos limpios o alternativos, incluidos los híbridos, con destino a flotas de administraciones o servicios públicos.
- Por otra parte, dentro de la Estrategia E4 de Ahorro y Eficiencia Energética en España y de los consiguientes Planes de Acción, se vienen contemplando desde el año 2006 ayudas a la renovación de vehículos. Para el ejercicio 2008, la adquisición de un automóvil o vehículo híbrido industrial con MMA hasta 3.500 kg se subvenciona con un 15% del valor de mercado, hasta un máximo de 2.000 €. A partir de 3.500 kg, la subvención es del 15% del total del coste de adquisición, hasta un máximo de 50.000 €.

11.15.2 Perspectivas de futuro de los vehículos híbridos

Aunque actualmente en España sólo existen cuatro modelos de vehículos híbridos a la venta, esta cifra se va a incrementar significativamente en los próximos años con la incorporación de nuevos modelos de diferentes marcas.

El nuevo buque insignia de la marca Lexus es el LS 600h. Este modelo se presentó en el año 2007 como el híbrido más potente fabricado en serie hasta la fecha. Lexus, la división de automóviles de lujo de Toyota, ha apostado por la tecnología híbrida como elemento diferencial de su gama. Esta apuesta le permitirá utilizar el protagonismo medioambiental como imagen de marca y posicionamiento de producto. Lexus ha establecido como objetivo para los próximos años que todos los vehículos de su gama sean híbridos.

Por otro lado, otros grupos automovilísticos como Ford o General Motors (GM) también comercializan actualmente modelos de vehículos híbridos en EE.UU. Estos modelos se podrían incorporar en los próximos años al mercado europeo. Además, las principales marcas europeas disponen ya de avanzados prototipos híbridos impulsados por gasolina y diésel, incluyendo prototipos de vehículos híbridos con motores de combustible flexible (o, en inglés, Flexible Fuel Vehicles - FFV) [218]. Así, pueden destacarse los siguientes:

- El grupo Peugeot-Citroën está trabajando en los modelos 307 y C4 Hybride HDi, que combinan un motor diésel HDi, de 1,6 litros de capacidad y 90 CV de potencia, con un motor eléctrico alimentado por una batería. Al utilizarse motores diésel el ahorro de combustible es aún mayor. Sin embargo, no se prevé su comercialización antes de 2010.
- Volkswagen lanzará próximamente el Volkswagen Touran Highbrid, probablemente en 2009. Se prevé que para entonces Volkswagen cuente con versiones gasolina-eléctrica y diésel-eléctrica, ambas con baterías de hidruro de níquel de última generación y con cambio DSG. La anterior combinación de tecnologías permitirá reducir todavía más el consumo y conseguirse y alcanzar hasta un 7% adicional.
- Porsche ha presentado el Porsche Cayenne Hybrid Concept, el cual reduciría el consumo normal de combustible en un 15%. Podría lanzarse dentro de dos años con un motor de gasolina combinado con otro eléctrico.

- Saab apuesta por el Saab 9-3 BioPower Hybrid Concept. Se trata del primer vehículo que combina el bioetanol puro E100 de su motor de aluminio BioPower 2.0 Turbo con un conjunto de tres motores eléctricos. El vehículo rinde una potencia combinada máxima de 260 CV.

En general, y como conclusión final, puede esperarse un despliegue de nuevos modelos para dar respuesta al aumento de la demanda de vehículos híbridos previsto por los principales fabricantes de automóviles en los próximos años.

11.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

La comercialización de vehículos híbridos está muy ligada a la demanda del mercado y a los precios de venta que los consumidores están dispuestos a pagar [219]. En estos momentos existen varias tendencias en los vehículos híbridos:

- Vehículos pequeños de uso urbano y poca potencia como el Honda Insight o el Smart.
- Berlinas de tamaño medio y uso mixto urbano y extraurbano como el Toyota Prius y el Honda Civic.
- Grandes vehículos todo-terreno o del tipo “pick-up” como el Lexus RX400h. En este tipo de vehículos la propulsión híbrida permite incrementar la potencia máxima disponible, al mismo tiempo que se contiene en la medida de lo posible el consumo de combustible.
- Vehículos deportivos en los que se trata también de incrementar la potencia sin penalizar demasiado el consumo. Este segmento aún no está representado en el mercado.
- Vehículos de lujo híbridos como el Lexus GS450h. En este segmento también se podrían englobar algunos vehículos todo-terreno.

Actualmente sólo existen tres fabricantes que ofrecen entre sus modelos en España vehículos híbridos, aunque es previsible que este número aumente en los próximos años:

- Honda con su modelo Civic Hybrid.
- Toyota con su modelo Prius.
- Lexus con sus modelos RX400h y GS450h.

Como ya se ha comentado, Citroën y Peugeot comercializarán próximamente un vehículo híbrido de configuración paralela con motor diésel. También, en los próximos años, Nissan lanzará al mercado vehículos híbridos que emplearán la tecnología Synergy Drive System de Toyota.

Además, en el sector del transporte público europeo se pueden ya adquirir minibuses híbridos basados en los chasis de Iveco Daily o Mercedes Sprinter. También Solaris Poland ofrece autobuses con el sistema híbrido paralelo de Allison fabricado en Estados Unidos. Wrightbus ya provee autobuses híbridos eléctricos para el transporte público en Londres.

Por otro lado, existen algunas experiencias en España relacionadas con la utilización de vehículos eléctricos híbridos para diferentes usos:

- La Empresa Municipal de Transportes de Madrid cuenta con 20 autobuses híbridos del fabricante Mercedes con motor eléctrico y motor de combustión interna diésel. En estos vehículos la tracción es eléctrica y la generación de electricidad corre a cargo del motor diésel [46].
- La empresa Fomento de Construcciones y Contratas (FCC) ha puesto en funcionamiento en Madrid 15 camiones eléctricos-diésel para la recogida de basura. Los camiones no producen durante la recogida de basura ni emisiones de gases contaminantes ni ruidos. Saft Baterías ha proporcionado el equipamiento híbrido de estos vehículos, incluidas las baterías de níquel-hidruros metálicos de 540V. Los chasis son Iveco de la gama EuroCargo.

- El Parque Móvil del Estado (PME) adquirió el pasado año (2007) 8 vehículos Toyota Prius destinados a servicios con alta visibilidad institucional.
- La Empresa Municipal de Transportes de Valencia, a través del “Proyecto Valencia” subvencionado por el Instituto de la Mediana y Pequeña Industria Valenciana (IMPIVA), adjudicó en 1999 al fabricante de vehículos Irisbus la construcción de 3 vehículos de un nuevo modelo de autobús, el ALTROBUS, de 6 metros de longitud con funcionamiento híbrido. Los vehículos dispondrían de tracción eléctrica y autogeneración de energía eléctrica a través de un motor diésel. Según fuentes de Iveco, actualmente Valencia dispone de vehículos híbridos de dicho fabricante que, si bien son todavía muy pesados, cuentan con el mismo concepto de hibridación en serie. Se trata de vehículos mucho más sofisticados y potentes, correspondientes a una segunda generación de autobuses del grupo Iveco [46].

12 Hidrógeno en vehículos con pila de combustible [220]

12.1 Definición y características básicas

El hidrógeno como combustible en la automoción tiene dos aplicaciones fundamentales: las **pilas de combustible** y los **motores de combustión interna alternativos**. En ambas aplicaciones este combustible se combina con el oxígeno del aire, generando electricidad en el caso de las pilas de combustible y energía mecánica en el caso de los motores térmicos.

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte el hidrógeno y el oxígeno en agua, generando electricidad en dicha combinación química. En el vehículo, el hidrógeno se puede almacenar en un depósito, o se puede obtener a partir de otro combustible en un reformador instalado a bordo. El oxígeno se obtiene generalmente del aire. Si se utiliza hidrógeno puro esta tecnología emite a la atmósfera únicamente vapor de agua, lo que supone grandes beneficios medioambientales.

Sin embargo, para que se produzca una utilización a nivel comercial de la pila de combustible es todavía necesaria una reducción de sus costes, por ejemplo disminuyéndose la cantidad de metales preciosos (como platino o paladio) utilizados como catalizadores de la combinación química del hidrógeno con el oxígeno.

La opinión general del sector es que a largo plazo se impondrán las pilas de combustible frente a los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno, básicamente porque los primeros son más eficientes que los segundos.

12.2 Obtención y materias primas

El proceso de obtención de hidrógeno no está exento de emisiones contaminantes. La obtención puede realizarse mediante diversas técnicas, como son la electrolisis del agua, el reformado de hidrocarburos, la gasificación de biomasa o hidrocarburos, u otras tecnologías aún en fase de investigación. De todas ellas, la única tecnología totalmente sostenible y respetuosa con el medio ambiente es la electrolisis del agua a partir de electricidad generada mediante fuentes renovables.

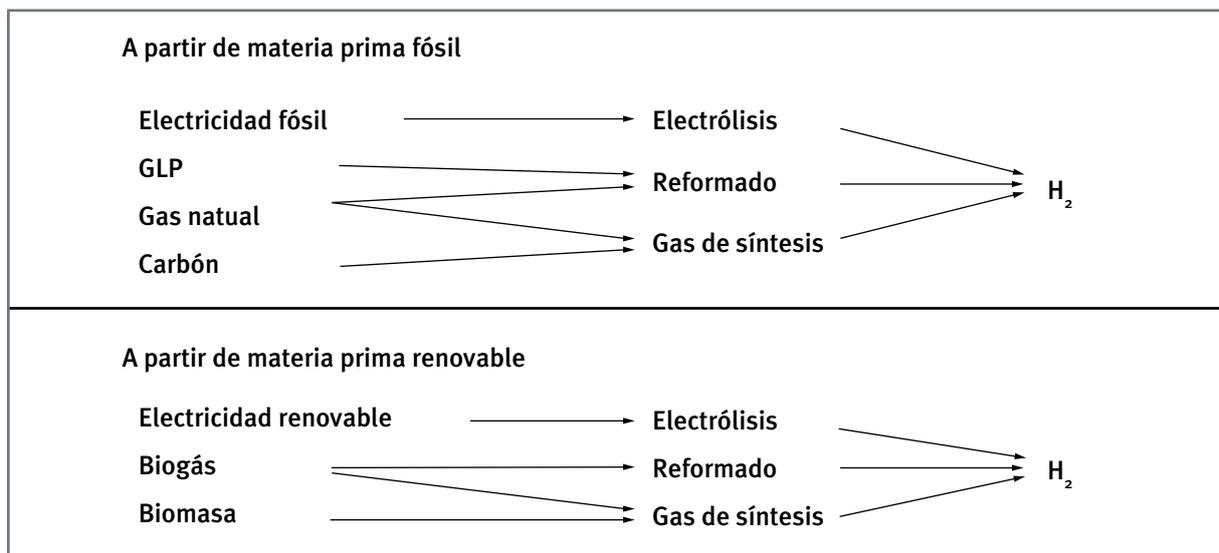


Figura 35. Vías de obtención de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al reformado de hidrocarburos, en la actualidad se está investigando la utilización como fuente de hidrógeno del etanol en sustitución del metanol. Ello se debe a que la toxicidad del etanol es menor que la del metanol.

12.3 Almacenamiento. Manipulación

12.3.1 Almacenamiento

Uno de los aspectos clave en el desarrollo de los vehículos de pila de combustible y de los vehículos con motor de combustión interna alternativo alimentado con hidrógeno es el almacenamiento y transporte del hidrógeno en los vehículos. Para ello, existen diversas tecnologías, todas ellas con sus ventajas e inconvenientes. Entre todas las opciones disponibles se pueden destacar las siguientes:

- Repostar y almacenar en el vehículo un compuesto que contenga una alta proporción de hidrógeno, como por ejemplo metanol, etanol o gas natural, para ser reformado a bordo. El inconveniente que tiene esta tecnología es que el hidrógeno así generado puede contener impurezas que hagan necesaria una limpieza del gas antes de ser utilizado en la pila de combustible. Esta limpieza o depuración es en todo caso imprescindible en aquellos tipos de pilas de combustible que requieran hidrógeno de alta pureza.
- Empleo del hidrógeno como gas comprimido a 200 bares de presión. En este caso la densidad energética es muy baja y los recipientes a presión son voluminosos y pesados. El almacenamiento a muy alta presión (700 bares) está aún en fase de desarrollo.
- Almacenamiento del hidrógeno en forma de líquido criogénico a una temperatura de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. El hidrógeno líquido tiene una buena densidad energética, aunque todavía menor que la de los combustibles fósiles líquidos como la gasolina o el gasóleo. Esta solución tiene, actualmente, un coste bastante elevado por la cantidad de energía necesaria para licuar el gas y por las características especiales de los depósitos de almacenamiento. Los depósitos deben estar perfectamente aislados mecánica y térmicamente y han de soportar la presión de la fase gaseosa del hidrógeno.
- Empleo de hidruros metálicos, de manera que el hidrógeno queda retenido en la estructura sólida del hidruro metálico y puede liberarse a medida que la pila de combustible lo demande. El principal problema que tiene esta tecnología es su elevado peso.

Además de estas tecnologías existen otras, como el empleo de hidruros químicos, o la utilización de estructuras de tubos microscópicos de carbono o de microesferas de vidrio. En estos últimos dos casos se trata de tecnologías que están todavía en fase de investigación.

12.3.2 Manipulación. Precauciones de seguridad

La principal característica del hidrógeno es su alto grado de inflamabilidad, debido a su tendencia a reaccionar violentamente con el oxígeno. El producto de la combustión del hidrógeno con el oxígeno es simplemente agua. En cualquier caso, su peligro potencial no es mayor que el de otros combustibles como la gasolina o el gas natural, por lo que las precauciones y las normas respecto a su seguridad no deberían ser muy diferentes a las ya existentes para otros gases inflamables. Así, su manipulación, observando las precauciones adecuadas, garantiza que el hidrógeno sea tan seguro como cualquier otro combustible utilizado en la actualidad, al menos respecto a los riesgos de incendio, explosión o asfixia. Es por ello que en Alemania las precauciones de seguridad y las normas técnicas en el caso del hidrógeno son similares a las de otros gases inflamables.

En el caso de producirse un accidente de un vehículo impulsado por hidrógeno, este combustible tendría una cierta ventaja respecto a la gasolina, ya que el hidrógeno se diluiría rápidamente en el aire al ser más ligero que éste sin dar tiempo a que se produjera su combustión. Sin embargo, sí que existiría riesgo de explosión si el hidrógeno se liberara en un recinto cerrado, como un garaje o un túnel, y para evitarlo, en dichos recintos serían necesarias instalaciones de ventilación y precauciones adicionales de seguridad.

Además, es importante evitar el contacto con la piel con el hidrógeno líquido, ya que se podrían producir quemaduras criogénicas debido a la baja temperatura de almacenamiento de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Finalmente, en los vehículos de pila de combustible los altos voltajes utilizados actualmente en el tren de potencia requieren un aislamiento adecuado de todos los componentes electrificados.

12.4 Comercialización

En estos momentos existe todavía un número muy limitado de estaciones de repostaje de hidrógeno, y la mayoría de éstas son de carácter privado. Es común que en estas instalaciones se realice la producción de hidrógeno “in situ”, ya sea a partir de fuentes de energía renovables (eólica, solar, etc.) y electrólisis del agua, a partir del reformado de hidrocarburos (gas natural, por ejemplo) o utilizando otras tecnologías.

El mercado de vehículos impulsados por hidrógeno se describe más adelante, en el apartado 12.16.

12.5 Modificaciones

Uno de los aspectos más importantes, como se ha indicado anteriormente, es el almacenamiento del hidrógeno en el vehículo. Si en vez de almacenarse hidrógeno puro, se almacena un hidrocarburo líquido o un alcohol del cual se obtiene posteriormente el hidrógeno mediante un proceso de reformado, resulta necesario también disponer de un reformador a bordo del vehículo.

En los vehículos con pila de combustible es necesario, además de dicho sistema de almacenamiento a bordo, disponer de un motor eléctrico que impulse el vehículo y suministre potencia al resto de elementos auxiliares. El motor y los elementos auxiliares, por otra parte, son similares a los que se instalan en los vehículos eléctricos o híbridos.

12.6 Funcionamiento y mantenimiento

Los sistemas eléctricos de los vehículos con pila de combustible apenas requieren mantenimiento periódico.

12.7 Ventajas

- Emisiones locales nulas de la pila de combustible, aunque en el caso de que el vehículo incorpore un reformador para la generación in situ del hidrógeno, estos producen como subproducto CO_2 .
- Diversas opciones para producir hidrógeno.
- Alta densidad energética para una cierta cantidad (en masa) de combustible.
- Combustible no tóxico.
- Alto límite de inflamabilidad y de detonación.
- Alta temperatura de combustión espontánea.
- Combustible muy seguro en espacios abiertos.

12.8 Desventajas

- Poca eficiencia de los procesos de obtención de hidrógeno.
- Oferta de vehículos prácticamente inexistente. En este momento, sólo existen algunos prototipos destinados a clientes especiales.
- Escasez de estaciones de reabastecimiento.
- Precio de las pilas de combustible.

- Tecnología compleja de almacenamiento.
- Al tratarse de un combustible gaseoso en estado natural, la densidad energética por unidad de volumen es baja.
- Baja temperatura de licuefacción.
- Combustible menos seguro en espacios confinados.

12.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • No se trata de una fuente de energía sino de un vector energético, y como tal hay que consumir cierta energía para fabricarlo • Su transporte es costoso por tener una baja densidad energética por unidad de volumen y por ser un gas muy volátil • No existe en la actualidad una infraestructura de suministro de hidrógeno para su uso como vector energético comercial • El almacenamiento en el vehículo de la cantidad de hidrógeno suficiente para asegurar una autonomía media no está resuelto • Las pilas de combustible están en fase de desarrollo • En la actualidad se produce en el mundo una veintea parte de todo el hidrógeno que sería preciso para sustituir a los combustibles alternativos 	<ul style="list-style-type: none"> • Que el precio del hidrógeno no llegue a ser competitivo en comparación con los combustibles alternativos • El precio del hidrógeno puede ser muy dependiente del precio del gas natural o de la electricidad renovable • La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles (especialmente el carbón) necesita del desarrollo de nuevas técnicas de captura y almacenamiento de CO₂ para reducir las emisiones de este gas de efecto invernadero • Un aumento del precio del platino usado como catalizador de la combinación química del hidrógeno con el oxígeno encarecería considerablemente las pilas de combustible • Inexistencia de una normativa sobre su uso
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Se puede producir hidrógeno a partir de múltiples fuentes, incluidas fuentes energéticas sostenibles y locales • El hidrógeno se puede almacenar, pudiendo servir como método de almacenamiento de la energía procedente de fuentes alternativas, las cuales son muy estacionales o cíclicas en el tiempo • El uso del hidrógeno en pilas de combustible puede aumentar el rendimiento global del sistema, al no estar limitado a ciclos termodinámicos • El uso del hidrógeno no produce CO₂ ni contaminantes del aire 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la dependencia energética • Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero • Desarrollo de un sistema optimizado de producción y distribución de hidrógeno

12.10 Balance de emisiones

Los vehículos de pila de combustible alimentados con hidrógeno únicamente emiten en el punto de utilización vapor de agua, lo que supone grandes ventajas medioambientales.

La mayor parte del hidrógeno que se utiliza en la actualidad se produce a partir de gas natural mediante un proceso de reformado que genera como subproducto CO_2 . Este proceso es mucho más eficiente que el proceso de electrolisis del agua, proceso en el que normalmente se utiliza electricidad que ha sido generada a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, a largo plazo se espera y se desea que la producción de hidrógeno se base fundamentalmente en el uso y aprovechamiento de energías renovables.

Con la actual estructura europea de generación de electricidad, la producción de hidrógeno utilizando electricidad mediante electrolisis genera mayores emisiones de gases de efecto invernadero que la producción de hidrógeno a partir de gas natural. El hidrógeno obtenido a partir de fuentes de energía no fósiles (renovables, nuclear, etc.) reduce notablemente las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por su parte, el hidrógeno obtenido indirectamente en reformadores instalados a bordo de los vehículos aporta pocos beneficios desde el punto de vista de las emisiones de efecto invernadero, al menos cuando se compara con otros modernos sistemas de propulsión o con los vehículos híbridos.

12.11 Balance energético

Puesto que el hidrógeno no es una fuente de energía, sino un vector energético que puede ser obtenido mediante diversas tecnologías (la electrolisis del agua, el reformado de hidrocarburos, la gasificación de biomasa o de hidrocarburos u otras tecnologías todavía en fase de investigación), el balance energético depende en gran medida de la tecnología en cuestión utilizada para su fabricación.

Los vehículos con pila de combustible siempre tendrán un balance energético más positivo que los vehículos con motores de combustión interna impulsados por hidrógeno, ya que la eficiencia de los primeros es siempre mayor. Por este motivo, los expertos consideran que a largo plazo la pila de combustible se acabará imponiendo a los motores de combustión interna que emplean hidrógeno como combustible.

12.12 Potencial tecnológico

Las pilas de combustible están todavía en desarrollo. Aunque tienen una gran eficiencia y no generan emisiones locales, aún no está absolutamente claro que sean necesariamente la solución definitiva para toda Europa. Así, los desarrollos futuros tienen que considerar cuidadosamente la posibilidad de producir hidrógeno a partir de fuentes renovables.

Los criterios que han de ser considerados a la hora de desarrollar las pilas de combustible son:

- Dinámica de la entrega de potencia (potencia total y ritmo de entrega de ésta).
- Tiempo para arrancar en frío.
- Vida útil.
- Rango de humedad y de temperatura operacional.
- Eficiencia total incluyendo los elementos auxiliares.
- Precio (euros por cada kilovatio de potencia).
- Peso (kilogramos por cada kilovatio de potencia).
- Área requerida para enfriar la pila de combustible (m^2 necesarios).
- Comportamiento para aplicaciones no estacionarias (vibraciones, cambios de temperatura, etc.).
- Resistencia a impactos.

12.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación

Casi todos los fabricantes de vehículos cuentan con programas de investigación y desarrollo para poner a punto la tecnología de las pilas de combustible. Esto se debe a que en el medio y largo plazo esta tecnología se configura como una de las mejores alternativas a los motores de combustión interna.

La viabilidad económica de estos vehículos está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora de los sistemas de almacenamiento del hidrógeno en los vehículos y, sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje.

12.14 Mercado mundial

12.14.1 Situación actual

En la actualidad, no existe aún a nivel mundial un mercado consolidado del hidrógeno, y el desarrollo de vehículos con pila de combustible está limitado a prototipos.

Los principales proyectos europeos de demostración relacionados con el hidrógeno en los que participa España se revisan más adelante en el apartado 12.15.1.

12.14.2 Perspectivas de futuro de los vehículos impulsados por hidrógeno

- Hasta aproximadamente el año 2030 se espera que los combustibles fósiles, sobre todo combinados con técnicas de captura y el almacenamiento del carbono, sigan siendo la fuente dominante de energía para la producción del hidrógeno en Europa. Paulatinamente, y hasta dicho año, el hidrógeno obtenido a partir de fuentes renovables irá penetrando en el mercado.
- La infraestructura de suministro del hidrógeno es probable que incluya tanto el aprovisionamiento de hidrógeno en grandes centrales de suministro, como su obtención local en los puntos de consumo.
- La introducción de los vehículos de pila de combustible en el mercado depende en gran medida de los éxitos que se consigan en la reducción de los costes del sistema de propulsión. En menor medida, el precio de la producción y del suministro, el coste de almacenamiento del hidrógeno, el precio del petróleo y la internalización de los costes ambientales también determinarán el ritmo de penetración del hidrógeno en el sistema europeo de energía.
- Todavía hay una gran incertidumbre sobre el ritmo de incorporación al mercado del hidrógeno, así como sobre las inversiones totales requeridas para la introducción de las tecnologías del hidrógeno.
- La introducción del hidrógeno en el sistema europeo de energía provocará cambios sustanciales en la estructura del empleo, particularmente en el sector de la automoción. El impacto total puede ser positivo o negativo, dependiendo fuertemente de los esfuerzos de Europa por consolidar o mejorar su posición actual en el mercado del automóvil.
- Para determinar el papel futuro del hidrógeno es importante desarrollar una visión final del sistema energético en cada país. Dicha visión ayudaría a diseñar incentivos sociopolíticos para la introducción del hidrógeno.

12.14.3 Factores clave

Producción de hidrógeno

- El reformado y la electrólisis para la producción de hidrógeno constituyen procesos que ya están disponibles comercialmente y, gracias a ello, pueden desempeñar un papel clave a la hora de satisfacer la demanda energética del hidrógeno a corto y medio plazo. El hidrógeno se produce en estos momentos en cantidades significativas, y es probable que ya se disponga de suficiente capacidad como para apoyar la introducción inicial del hidrógeno como combustible, aunque todavía no sea suficiente para abastecer una demanda masiva.

- El hidrógeno es hoy más costoso que los combustibles convencionales. Sin embargo, se confía en que en el futuro, el hidrógeno se podrá producir en Europa con costes por kilómetro recorrido competitivos, en comparación con los costes de la gasolina y del combustible diésel. La fiscalidad de cada combustible puede jugar un papel clave en la competitividad del hidrógeno frente a los combustibles convencionales. Por otro lado, el citado abaratamiento asume que, gracias a la producción en serie del hidrógeno, se puedan alcanzar con celeridad curvas de aprendizaje de la tecnología y notables ahorros de escala. Los ahorros han de obtenerse tanto en la producción del hidrógeno y las pilas de combustible como en el almacenamiento del primero.
- La seguridad de suministro de la energía, el agotamiento de los recursos fósiles y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a medio y largo plazo impulsarán, en cualquier caso, la transición hacia tecnologías con emisiones de CO₂ bajas o neutras. Esta transición se apoyará en el hidrógeno obtenido a partir de fuentes renovables, incluyendo la biomasa, así como en la energía nuclear y en el uso de combustibles fósiles. En este último caso, y para luchar contra el cambio climático, se deberán considerar técnicas de captura o secuestro del carbono.
- A largo plazo, a medida que se desarrollen estas tecnologías, se deberán evaluar continuamente parámetros tales como el impacto de las curvas de aprendizaje de la tecnología, los beneficios económicos de la producción en masa y, de manera cada vez más importante, el análisis del ciclo de vida completo de todo el sistema. Los Estados miembros de la Unión Europea y la Comisión Europea tendrán un papel importante a la hora de estimular la I+D de las tecnologías del futuro. El desarrollo de posturas comunes respecto a las políticas de introducción en el mercado de las tecnologías ya maduras será igualmente otro aspecto clave en este contexto.
- En el período de transición se deberán considerar medidas políticas que mejoren la viabilidad económica de la producción del hidrógeno a partir de tecnologías con emisiones de CO₂ bajas o neutras. Tales medidas deberán ser coherentes con las metas políticas fijadas por la Comisión Europea y los Estados miembros: diversidad e independencia energética, y reducción de la generación de gases de efecto invernadero; ello sin descuidar en ningún momento sus posibles efectos sobre el mercado de trabajo y la competitividad tecnológica.

Infraestructura de distribución del hidrógeno

- Actualmente existe ya una limitada infraestructura industrial para la distribución del hidrógeno en forma de líquido criogénico o gas comprimido. Esta distribución se realiza principalmente mediante camiones cisterna aunque también hay redes de tuberías que abastecen a grandes consumidores industriales.
- Los costes asociados al transporte y almacenamiento del hidrógeno son uno de los principales obstáculos que impiden que el hidrógeno sea competitivo en coste con los combustibles convencionales. En el futuro cercano se necesitarán soluciones innovadoras como la producción descentralizada del hidrógeno en el mismo punto de venta o en sus cercanías.
- Para las aplicaciones en el transporte, los costes de las estaciones de reabastecimiento de combustible suponen también un obstáculo importante y requerirán el desarrollo de normativas, códigos técnicos, estándares de normalización y leyes que consideren al hidrógeno como un combustible convencional y no como un material industrial peligroso.
- También se necesitarán iniciativas importantes para promover la aceptación pública del hidrógeno, principalmente en todo lo referido a la seguridad de la infraestructura de suministro y almacenamiento.
- Los costes de inversión que requiere la infraestructura del hidrógeno son masivos y el riesgo es alto por la incertidumbre que rodea a las nuevas tecnologías, y a la fecha y al ritmo de su introducción en el mercado. Superar esta incertidumbre requerirá la cooperación de actores importantes: gobiernos, investigadores, proveedores de tecnología y suministradores de hidrógeno.

- Los gobiernos tendrán un papel particularmente importante a la hora de estimular la innovación a través de la I+D, de apoyar una temprana introducción de las tecnologías en el mercado y de minimizar el riesgo de la inversión privada o industrial.

Uso final del hidrógeno

- En los próximos 2-3 años se espera que se incorporen al mercado pequeñas aplicaciones portátiles que ayudarán a difundir entre el público en general las ventajas de las pilas de combustible y del hidrógeno.
- Se espera que las pilas de combustible para aplicaciones fijas o estacionarias sean comercializadas a finales de esta década o principios de la siguiente. Se prevé que éstas utilicen predominantemente combustibles fósiles tales como el gas natural.
- Las aplicaciones en el transporte constituirán el principal impulso para la demanda del hidrógeno, pero la producción en masa de vehículos de pasajeros impulsados por hidrógeno no ocurrirá antes de 2012-2020.
- En cualquier caso, hay una incertidumbre significativa en relación con los pronósticos de la demanda futura de hidrógeno, puesto que la pila de combustible y otras tecnologías tales como los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno todavía no están listas para su introducción a gran escala en el mercado.

Almacenamiento del hidrógeno

- El almacenamiento del hidrógeno es otra de las tecnologías críticas, particularmente para las aplicaciones móviles en vehículos.
- Los desafíos son significativos y requerirán un extenso esfuerzo en I+D para desarrollar soluciones innovadoras.

Reglamentos, códigos y estándares del hidrógeno

- Los requisitos técnicos y los reglamentos son documentos legalmente vinculantes que emanan de los gobiernos. Los estándares o normas en general son acuerdos voluntarios elaborados por los comités de estandarización o normalización a nivel global, regional o nacional. Los estándares son documentos establecidos por consenso y aprobados por un cuerpo técnico reconocido.
- Los estándares o normas son importantes para el desarrollo de cualquier industria. La armonización técnica en Europa y en el resto del mundo ayudará a la introducción de las pilas de combustible y el hidrógeno.
- Es por lo tanto muy importante garantizar que en los comités de normalización se cuente con toda la experiencia necesaria para el desarrollo de normas relevantes y técnicamente viables.
- Son deseables reglamentos europeos que puedan ser traspuestos uniformemente a las leyes de todos los Estados miembros. Disponer de los mismos requisitos reguladores en todos los Estados miembros de la Unión Europea permitiría una difusión regional y local más rápida de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible.
- El desarrollo de normas técnicas puede facilitar la entrada de nuevas tecnologías, aunque la publicación prematura de normas, por otro lado, podría conducir a resultados o soluciones apresurados que no fueran suficientemente satisfactorios. Por ello, será importante encontrar un cierto equilibrio entre una publicación temprana de las normas y su adecuado nivel de madurez.
- La financiación pública puede facilitar notablemente el desarrollo de áreas tecnológicas como éstas, en donde el mercado a corto plazo sea pequeño o inexistente.
- La recogida de datos relevantes y la armonización de los métodos de análisis de los riesgos asociados al hidrógeno son vitales para asegurar niveles aceptables de seguridad. Los citados métodos tendrán que ser desarrollados pensando en la necesidad de compartir en formato estandarizado información relevante sobre la seguridad y los riesgos del hidrógeno.

- Para alcanzar un proceso eficaz de aprobación de normas técnicas que consideren todos los aspectos relevantes de la seguridad del hidrógeno será esencial contar con la experiencia y capacidad de todas las organizaciones clave en este campo.
- Para asegurar que los resultados de la investigación sobre la seguridad del hidrógeno se traducen en soluciones técnicas, reglamentos y normas técnicas eficaces se debe articular una colaboración eficaz entre las instituciones de I+D y la industria.

Aspectos socioeconómicos y políticos claves en el despliegue de la infraestructura de suministro de hidrógeno

- Los desafíos a los que se enfrenta el hidrógeno no son simplemente técnicos sino también socioeconómicos.
- Para asegurar el éxito del despliegue de las tecnologías del hidrógeno, los gobiernos tendrán que asumir un papel activo en la promoción de la investigación, el desarrollo y la demostración a gran escala.
- Para estimular la introducción temprana de las tecnologías del hidrógeno, la ayuda política sostenida y los instrumentos fiscales serán esenciales.
- Estas ayudas deberán mantenerse todo el tiempo preciso para que se tienda un puente sólido entre los primeros mercados tempranos e inmaduros y el momento en que la economía del hidrógeno sea robusta, autofinanciable y competitiva en un mercado libre.

Difusión y concienciación pública

- Se necesita urgentemente educación del público para alcanzar el nivel mínimo de información y conocimiento sobre las pilas de combustible y el hidrógeno que facilite su aceptación en el mercado y su comercialización.
- Es necesario desarrollar programas académicos de formación en todos los Estados miembros para ayudar a desarrollar las capacidades necesarias para sostener esta nueva industria, y para asegurar su competitividad industrial a nivel internacional.
- Dentro de Europa, los gobiernos nacionales, regionales y locales deben desarrollar estrategias y políticas encaminadas a la promoción de sistemas de energía y transporte sostenibles que incluyan el hidrógeno. Tales estrategias deberían incluir como uno de los actores clave a la administración pública, quien indudablemente puede desempeñar un importante papel a la hora de promover los primeros mercados.

12.15 Mercado español

12.15.1 Situación actual

Madrid y Barcelona, junto a otras ocho ciudades europeas (Amsterdam, Estocolmo, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Stuttgart, Reykjavik y Oporto), fueron pioneras en el año 2003 en el empleo de autobuses urbanos equipados con pilas de combustible. Esta iniciativa forma parte del proyecto “Clean Urban Transport for Europe - CUTE”, auspiciado por la UE y liderado por la empresa Daimler-Chrysler (Mercedes). El proyecto contemplaba la demostración en estas 10 ciudades europeas de 30 autobuses propulsados por pila de combustible. Los 30 autobuses estaban equipados con pilas Ballard de 205 kW de potencia con tecnología de membrana de intercambio protónico (también conocida por su nombre en inglés Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC).

La ciudad de Madrid inició en el año 2003 su participación en el proyecto CITYCELL liderado por Iveco-Irisbus. El proyecto contemplaba la demostración de cuatro autobuses propulsados por pila de combustible en cuatro ciudades europeas: Madrid, París, Turín y Berlín. En el caso de Madrid y Turín, los vehículos empleados eran autobuses Iveco dotados de pila de combustible UTC de 62 kW con tecnología de membrana de intercambio protónico (PEMFC). A mediados de 2003 únicamente quedaba en funcionamiento el autobús de Madrid compartiendo la estación de

abastecimiento de hidrógeno con los autobuses del proyecto CUTE. Hay que mencionar que los dos proyectos anteriores, CUTE y CITYCELL, ya han finalizado.

Más reciente es el proyecto europeo HYCHAIN MINI-TRANS, que desplegará varias flotas de vehículos accionados mediante innovadoras pilas de combustible en cuatro países europeos: Francia, España, Alemania e Italia. Las flotas están basadas en plataformas de tecnología modular pensadas para diferentes aplicaciones. El objetivo principal de este proyecto es movilizar el volumen suficiente de vehículos (por encima de los 158 vehículos) como para obtener en términos industriales reducciones de costes y superar las principales barreras sectoriales y regionales.

Por otra parte, dentro de la Estrategia E4 de Ahorro y Eficiencia Energética en España y de los consiguientes Planes de Acción, se vienen contemplando desde el año 2006 ayudas tanto a la renovación de vehículos como a la implantación de estaciones de carga. Para el ejercicio 2008, la adquisición de un automóvil o vehículo industrial con MMA hasta 3.500 kg se subvenciona con un 15% del valor de mercado, hasta un máximo de 6.000 €. A partir de 3.500 kg, la subvención es del 15% del total del coste de adquisición hasta un máximo de 50.000 €. Además, las estaciones de carga son objeto de una ayuda de entre 30.000 hasta 60.000 euros según sean individuales o colectivas. Como ya se ha comentado, dichas ayudas son gestionadas por las diferentes CC.AA. a través de convenios de colaboración suscritos con IDAE. Estas subvenciones son compatibles con otras ofertas de fabricantes o vendedores de vehículos. También, a nivel nacional, existe una deducción fiscal por adquisición de vehículos ecológicos (cumpliendo normas medioambientales más estrictas que la reglamentación vigente), del 9% del valor total de la inversión en el año fiscal correspondiente a la misma.

12.15.2 Perspectivas de futuro de los vehículos impulsados por hidrógeno

Véase el anterior apartado 12.14.2.

12.15.3 Factores clave

Véase el anterior apartado 12.14.3.

12.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

Los vehículos de pila de combustible aún no se encuentran a la venta, aunque sí es posible alquilarlos. En cualquier caso siguen sin estar al alcance de todos los posibles usuarios interesados en esta tecnología. Hay tres modelos de automóviles de turismo propulsados por pilas de combustible:

- Honda FCX.
- Mercedes F-cell.
- Ford FWD.

Existen también otras marcas de automóviles trabajando activamente en el desarrollo de modelos de hidrógeno, bien con pila de combustible o bien con motores de combustión interna. Entre ellas están General Motors con el Hy-wire y el HydroGen3, Honda con el Honda EV Plus, Hyundai con el Santa Fe FCEV basado en la tecnología UTC Power, Mazda con el RX-8 con un motor rotativo de combustible dual (hidrógeno y gasolina), Nissan con el X-TRAIL FCV basado también en UTC Power, Toyota con un vehículo híbrido bivalente (con gasolina e hidrógeno) y Volkswagen con sus propios modelos.

13 Hidrógeno en vehículos con motor de combustión interna [220]

13.1 Definición y características básicas

El hidrógeno también puede emplearse como carburante en motores de combustión interna alternativos de encendido provocado (categoría de motores a la cual pertenecen los motores de gasolina convencionales). Aunque esta alternativa es menos eficiente energéticamente que las pilas de combustible, tiene la ventaja de tratarse de una tecnología sobradamente probada.

Algunos fabricantes de vehículos piensan que los motores térmicos alternativos alimentados con hidrógeno ayudarán a dar el salto hacia el futuro, el cual, sin embargo, estará dominado por las pilas de combustible. Dicho salto se produciría al aumentar la demanda de hidrógeno para su uso como combustible y, como consecuencia, al desarrollarse una infraestructura de estaciones de suministro.

13.2 Obtención y materias primas

Véase el apartado 12.2 del capítulo anterior.

13.3 Almacenamiento. Manipulación

Véase el apartado 12.3 del capítulo anterior.

13.4 Comercialización

Existe un número muy limitado de estaciones de suministro de hidrógeno, y la mayoría de éstas son de carácter privado. Es habitual que en estas instalaciones se produzca el hidrógeno “in situ”, ya sea a partir de fuentes de energía renovables (eólica, solar, etc.) mediante electrólisis del agua, a partir del reformado de hidrocarburos (como, por ejemplo, gas natural) o utilizando otras tecnologías.

Para consultar el mercado de vehículos con motor de combustión interna impulsados por hidrógeno existente en estos momentos, véase más adelante el apartado 13.16.

13.5 Modificaciones

En este caso, uno de los aspectos más importantes, como se ha visto anteriormente en el apartado 12.3, es el almacenamiento del hidrógeno en el vehículo.

Aparte de la necesidad de disponer de un depósito especial para el almacenamiento del hidrógeno, en los vehículos con motor de encendido provocado diseñados para funcionar con hidrógeno, la combustión se produce esencialmente del mismo modo que cuando se utiliza gasolina como combustible, por lo que no son necesarios cambios significativos en el motor.

13.6 Funcionamiento y mantenimiento

Los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno en lugar de gasolina tampoco presentan diferencias importantes en cuanto a funcionamiento o mantenimiento.

13.7 Ventajas

- Los motores de combustión interna que funcionan con hidrógeno no producen prácticamente emisiones locales. La única excepción son ligeras emisiones de NO_x que se generan debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan durante la combustión.
- Tecnología probada y mucho más económica que la de pila de combustible.
- Diversas opciones para producir hidrógeno.
- Alta densidad energética del hidrógeno por unidad de masa.
- Combustible no tóxico.
- Alto límite de inflamabilidad y de detonación.
- Alta temperatura de combustión espontánea.
- Combustible muy seguro en espacios abiertos.

13.8 Desventajas

- Limitada oferta de vehículos. Aquellos disponibles sólo se comercializan, de momento, a determinados clientes.
- Escasez de estaciones de reabastecimiento.
- Tecnología de almacenamiento compleja.
- Baja densidad energética por unidad de volumen de gas.
- Baja temperatura de licuefacción.
- Combustible menos seguro en espacios confinados.

13.9 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none">• No se trata de una fuente de energía sino de un vector energético, y como tal es preciso consumir cierta energía para fabricarlo• Su transporte es costoso por tener una densidad energética por unidad de volumen baja y por ser un gas muy volátil• No existe en la actualidad una infraestructura de suministro de hidrógeno• El almacenamiento en el vehículo de una cantidad de hidrógeno suficiente para asegurar una autonomía media no está resuelto• Los motores de combustión interna tienen un rendimiento bajo en comparación con la pila de combustible• Escasa producción actual de H_2	<ul style="list-style-type: none">• Que no se alcance un precio competitivo del hidrógeno con respecto a los demás combustibles alternativos• El precio del hidrógeno depende fuertemente del precio del gas natural o de la electricidad renovable• La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles (especialmente el carbón) exige el desarrollo de nuevas técnicas de captura y almacenamiento de CO_2 para reducir las emisiones de este gas de efecto invernadero• Un aumento del precio del platino usado como catalizador encarecería las pilas de combustible• Inexistencia de normativa sobre su uso

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Se puede producir hidrógeno a partir de múltiples fuentes, incluidas fuentes energéticas sostenibles y locales • El hidrógeno se puede almacenar, pudiendo servir como método de almacenamiento de la energía procedente de fuentes alternativas muy estacionales o cíclicas en el tiempo • El uso del hidrógeno en motores de combustión interna es una tecnología perfectamente probada • El uso de hidrógeno en motores de combustión interna no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes del aire (salvo ligeras emisiones de NO_x) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la dependencia energética • Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero • Desarrollo de un sistema optimizado de producción y distribución de hidrógeno

13.10 Balance de emisiones

Los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno únicamente producen en el punto de utilización vapor de agua, lo que conlleva grandes ventajas medioambientales. En realidad, estos vehículos sí que producen mínimas emisiones contaminantes originadas por la combustión de pequeñas cantidades de aceite lubricante del motor que se introduce en los cilindros. Por otro lado, hay que tener en cuenta que también se producen pequeñas emisiones de NO_x debido al elevado exceso de aire con el que se produce la combustión y a las elevadas temperaturas que se alcanzan en el interior de los cilindros.

Actualmente, la mayor parte del hidrógeno se produce a partir de gas natural mediante un proceso de reformado con vapor de agua que genera CO₂. Este proceso es mucho más eficiente que el proceso de electrolisis del agua a partir de electricidad generada con combustibles fósiles. Sin embargo, a largo plazo, se espera y se desea que la producción del hidrógeno se base fundamentalmente en el uso y aprovechamiento de energías renovables.

Si el hidrógeno se produce a partir de gas natural, sólo se pueden alcanzar reducciones netas en las emisiones de gases de efecto invernadero si dicho hidrógeno se utiliza en pilas de combustible. Globalmente, tanto el gasto de energía como las emisiones de gases de efecto invernadero en los vehículos con motor de combustión interna, impulsado por hidrógeno que haya sido obtenido del gas natural, son mayores que en el caso de los vehículos que utilizan directamente gas natural comprimido.

Por otro lado, y con el actual esquema europeo de producción eléctrica, la producción del hidrógeno mediante electrolisis genera mayores emisiones de gases de efecto invernadero que la producción del hidrógeno a partir de gas natural. El hidrógeno obtenido a partir de fuentes de energía no fósiles (como las energías renovables, la energía nuclear, etc.), suele producir, sin embargo, emisiones muy reducidas de gases de efecto invernadero.

13.11 Balance energético

Dado que el hidrógeno no es una fuente de energía propiamente dicha, sino un vector energético que puede ser obtenido mediante diversas tecnologías (la electrolisis del agua, el reformado de hidrocarburos, la gasificación de biomasa o hidrocarburos, u otras tecnologías todavía en fase de investigación), el balance energético final dependerá en gran medida de la tecnología concreta utilizada para su fabricación.

El motor de combustión interna alternativo tiene un rendimiento mucho menor que la pila de combustible, por lo que el balance energético global es peor cuando se utiliza el hidrógeno en vehículos con motor de combustión interna que cuando se emplea en vehículos dotados de pilas de combustible.

13.12 Potencial tecnológico

El motor de combustión interna es un mecanismo tecnológicamente muy desarrollado pero con un potencial tecnológico mucho menor que el de las pilas de combustible.

La utilización de hidrógeno como combustible es compatible con ratios de compresión mucho mayores que los habituales en los motores de combustión interna, debido a la alta resistencia a la detonación espontánea exhibida por este combustible. Gracias a ello en los motores de inyección directa de combustible se obtiene una mayor eficiencia con carga parcial. El hidrógeno se puede utilizar igualmente en los motores adaptados para la utilización de gas natural. Además, el tratamiento de los gases de escape es también más sencillo gracias a las ya de por sí bajas emisiones que genera el uso de hidrógeno como combustible.

13.13 Viabilidad económica, disponibilidad y legislación

Existen algunos fabricantes de vehículos que ya están desarrollando modelos dotados de motor de combustión interna alimentado con hidrógeno.

La viabilidad económica de estos vehículos está ligada a la mejora de los sistemas de almacenamiento del hidrógeno en los vehículos y, sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje.

13.14 Mercado mundial

13.14.1 Situación actual

No existe aún un mercado consolidado del hidrógeno como combustible a nivel mundial. En cuanto a los vehículos con motor de combustión interna alimentado con hidrógeno, ya se encuentra disponible para determinados clientes el primer modelo fabricado en serie que funciona con hidrógeno: el BMW Hydrogen 7. Se trata de un modelo bivalente que puede funcionar con hidrógeno y con gasolina. Por el momento, muy pocos clientes pueden disfrutar de este modelo de vehículo, y principalmente se trata de administraciones públicas.

En 1999, BMW abrió la primera estación de servicio de hidrógeno líquido pública y totalmente automática en el aeropuerto de Munich. Posteriormente, en otoño de 2004, se inauguró la mayor estación de servicio de hidrógeno del mundo en Berlín, por iniciativa de la Asociación para la Energía Limpia en Alemania. Además, BMW ha llegado a un acuerdo con la empresa de combustibles Total mediante el cual ésta pondría en funcionamiento tres estaciones de servicio de hidrógeno en Europa antes de finales de 2007.

13.14.2 Perspectivas de futuro de los vehículos impulsados por hidrógeno

Véase el apartado 12.14.2 en el capítulo anterior.

13.14.3 Factores clave

Véase el apartado 12.14.3 en el capítulo anterior.

13.15 Mercado español

13.15.1 Situación actual

Los ayuntamientos de Málaga, Madrid, Barcelona, Valencia, Tenerife y San Sebastián han creado una Agrupación de Operadores cuyos objetivos son la promoción de los autobuses con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno y la construcción de plantas para obtener dicho combustible.

Por otro lado, dentro de la Estrategia E4 de Ahorro y Eficiencia Energética en España y de los consiguientes Planes de Acción, se vienen contemplando desde el año 2006 ayudas para la adquisición de vehículos de propulsión eléctrica, de hidrógeno y de pila de combustible así como a la implantación de estaciones de carga. Para el ejercicio 2008, la adquisición de un automóvil o vehículo industrial con MMA hasta 3.500 kg se subvenciona con un 15% del valor de mercado, hasta un máximo de 2.000 €. A partir de 3.500 kg, la subvención es del 15% del total del coste de adquisición hasta un máximo de 12.000 €. Además, las estaciones de carga son objeto de una ayuda de entre 30.000 hasta 60.000 euros según sean individuales o colectivas. Como ya se ha comentado, dichas ayudas son gestionadas por las diferentes CC.AA. a través de convenios de colaboración suscritos con IDAE. Estas subvenciones son compatibles con otras ofertas de fabricantes o vendedores de vehículos. También, a nivel nacional, existe una deducción fiscal por adquisición de vehículos ecológicos (cumpliendo normas medioambientales más estrictas que la reglamentación vigente), del 9% del valor total de la inversión en el año fiscal correspondiente a la misma.

13.15.2 Perspectivas de futuro de los vehículos impulsados por hidrógeno

Véase el apartado 12.14.2 en el capítulo anterior.

13.15.3 Factores clave

Véase el apartado 12.14.3 en el capítulo anterior.

13.16 Experiencias y vehículos ya en el mercado

Algunos fabricantes como BMW y Mazda están trabajando desde hace años en vehículos con motor de combustión interna que funcionan con hidrógeno como combustible. Concretamente, a corto plazo estará a la venta el primer modelo fabricado en serie que funciona con hidrógeno, el BMW Hydrogen 7.

Pero las dos citadas no son las únicas marcas de automóviles que están trabajando en el desarrollo de modelos impulsados por hidrógeno. Aunque no todos se decantan por la misma solución: algunos fabricantes optan por usar el hidrógeno para alimentar pilas de combustible, mientras que otros lo utilizan como combustible en motores de combustión interna. Entre las marcas que están investigando actualmente las tecnologías del hidrógeno están General Motors con el Hy-wire y el HydroGen3, Honda con el Honda EV Plus, Hyundai con el Santa Fe FCEV basado en la tecnología UTC Power, Mazda con el RX-8 con un motor de rotación de combustible dual (alimentado con hidrógeno o con gasolina), Nissan con el X-TRAIL FCV basado también en UTC Power, Toyota con un vehículo híbrido bivalente (gasolina e hidrógeno) y Volkswagen con varios modelos.



**Resumen
comparado de
los diferentes
combustibles y
tecnologías de
propulsión**

14 Comparación de tecnologías

14.1 Introducción

A lo largo de este documento, y hasta este punto, se han puesto de manifiesto las diferentes oportunidades existentes de búsqueda de alternativas a los sistemas de propulsión y los combustibles convencionales. La búsqueda de alternativas es en estos momentos ineludible ante el encarecimiento de los precios del petróleo, la necesidad de cumplir con los objetivos de Kioto de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la creciente conciencia medioambiental sobre la necesidad de reducir las emisiones contaminantes de los vehículos, principalmente en los núcleos urbanos.

Las diferentes tecnologías, sistemas de propulsión y combustibles alternativos recogidos en este informe se resumen en el cuadro que se muestra a continuación. Además, en los siguientes apartados se dará una visión global de los diferentes factores considerados en relación con las modificaciones en los sistemas tradicionales, los nuevos sistemas de propulsión y los combustibles alternativos.

Modificaciones en los sistemas de propulsión tradicionales:

- Disminución y reducción del peso de los vehículos.
- Incremento de la eficiencia del motor.
- Catalizadores.
- Recirculación de los gases de escape (EGR).
- Reducción catalítica selectiva (SCR).
- Filtros de partículas diésel (DPF).
- Sistema eléctrico de 42 voltios.
- Encendido por compresión de carga homogénea (HCCI).
- Autoencendido controlado (CAI).
- Sistemas “paro y arranque” o, en inglés, “Stop and Start”.
- Sistemas de control de la presión de los neumáticos.
- Otras modificaciones para reducir las emisiones de CO₂.

Combustibles alternativos:

- Biodiésel.
- Bioetanol.
- Combustibles sintéticos.
- Biocarburantes de segunda generación.
- Gas natural.
- Gas licuado del petróleo.
- Hidrógeno en vehículos con motor de combustión interna.

Nuevos sistemas de propulsión:

- Vehículos eléctricos.

- Vehículos eléctricos híbridos.
- Hidrógeno en vehículos con pila de combustible.

14.2 Ventajas e inconvenientes

A continuación se recogen las principales ventajas e inconvenientes de cada una de las modificaciones en los sistemas tradicionales que ha sido tratadas en este informe:

Modificaciones en los sistemas tradicionales de propulsión	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Disminución y reducción del peso de los vehículos	<ul style="list-style-type: none"> + Disminuye el consumo y las emisiones de CO₂ + No requiere modificaciones importantes - Límites en las reducciones de peso que puedan alcanzarse - Coste elevado de determinados materiales
Incremento de la eficiencia del motor	<ul style="list-style-type: none"> + Menor consumo y menores emisiones de CO₂ + Diversidad de tecnologías - Mayores solicitaciones mecánicas para los motores
Catalizadores	<ul style="list-style-type: none"> + Reducción de los contaminantes HC, CO y NO_x + Tecnología ampliamente desarrollada + Bajo coste por su implantación a gran escala - Requiere utilizar dosado estequiométrico - Puede que no funcione correctamente en recorridos cortos
Recirculación de los gases de escape (EGR)	<ul style="list-style-type: none"> + Reducción importante de los óxidos de nitrógeno + Bajo coste por su implantación a gran escala - Ligero incremento del consumo de combustible - Ligero incremento de las partículas en motores diésel
Reducción catalítica selectiva (SCR)	<ul style="list-style-type: none"> + Alta eficiencia a la hora de reducir los óxidos de nitrógeno + No requiere modificaciones en la combustión - Necesidad de recargar el agente reductor periódicamente - Es más caro que el sistema de recirculación de gases de escape (EGR)
Filtros de partículas diésel (DPF)	<ul style="list-style-type: none"> + Reducción de las emisiones de partículas hasta en un 90% - Encarecimiento de los vehículos - No eliminan las partículas más pequeñas
Sistema eléctrico de 42 voltios	<ul style="list-style-type: none"> + Permiten abastecer a un mayor número de sistemas eléctricos + Reduce el consumo y las emisiones de CO₂ - Dificultades técnicas y económicas
Encendido por compresión de carga homogénea (HCCI)	<ul style="list-style-type: none"> + Mejor rendimiento indicado + Menores emisiones de NO_x y de hollín - Presiones de combustión elevadas - Funcionamiento sólo a baja carga - Poco control sobre el proceso de combustión - Elevadas emisiones de CO y HC

Modificaciones en los sistemas tradicionales de propulsión	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Autoencendido controlado (CAI)	<ul style="list-style-type: none"> + Mejor rendimiento + Menores emisiones de NO_x – Presiones de combustión elevadas – Funcionamiento solo a baja carga – Poco control sobre el proceso de combustión
Sistemas “paro y arranque” o, en inglés, “Stop and Start”	<ul style="list-style-type: none"> + Reducción del consumo y las emisiones de CO₂ + Ausencia de ruido cuando el vehículo está parado – Ligero encarecimiento del coste de los vehículos
Sistemas de control de la presión de los neumáticos	<ul style="list-style-type: none"> + Disminución del riesgo de accidente + Aumento de la vida útil de los neumáticos + Disminución del consumo y de las emisiones de CO₂ – Incremento del coste del vehículo

Tabla 13. Ventajas e inconvenientes de las diferentes modificaciones en los sistemas tradicionales de propulsión
Fuente: Elaboración propia

Análogamente, a continuación se resumen las principales ventajas e inconvenientes de los diferentes combustibles alternativos analizados en este estudio:

Combustibles alternativos	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Biodiésel	<ul style="list-style-type: none"> + Fuente de energía renovable + Aumenta la seguridad del abastecimiento energético + Ahorra energía primaria y energía fósil + Reducción de las emisiones de CO₂ + Reducción de otras emisiones contaminantes: dióxido de azufre, partículas, metales pesados, monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) + Creación de empleo en la industria y la agricultura – Grandes extensiones de terreno requeridas – Pueden interferir en el mercado de la alimentación – Baja rentabilidad – Menor energía por unidad de volumen y de masa
Bioetanol	<ul style="list-style-type: none"> + Fuente de energía renovable + Aumenta la seguridad del abastecimiento energético + Ahorra energía primaria y energía fósil + Reducción de las emisiones de CO₂ + Reducción de las emisiones de CO y HC + Creación de empleo en la industria y la agricultura – Grandes extensiones de terreno requeridas – Pueden interferir en el mercado de la alimentación – Baja rentabilidad – Baja densidad y bajo contenido energético, lo que se traduce en una menor autonomía de los vehículos

Combustibles alternativos	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Combustibles sintéticos	<ul style="list-style-type: none"> + Multitud de materias primas y fuentes de energía + El proceso GTL es una forma de rentabilizar el gas disponible + La conversión CTL es una vía de independencia energética para los países con abundante carbón + El BTL facilita el crecimiento sostenible y produce uno de los biocarburantes de segunda generación promovidos en Europa - Tecnologías incipientes poco desarrolladas a nivel industrial - Coste elevado de los procesos de síntesis y de las instalaciones
Biocarburantes de segunda generación	<ul style="list-style-type: none"> + Variedad de materias primas, especialmente desechos + Alta calidad de los combustibles + Emisiones de CO₂ potencialmente mucho menores que en el caso de otros combustibles líquidos + Baja intensidad de cultivo: son necesarias menores extensiones de tierra que con cosechas agrícolas tradicionales + Durante su proceso de producción se puede cogenerar electricidad - Tecnologías incipientes muy poco desarrolladas a nivel industrial - Coste elevado de los procesos de producción e instalaciones
Gas natural	<ul style="list-style-type: none"> + Reducción de las emisiones de partículas, de NO_x, gases de efecto invernadero y ruido + Contribuye a la diversificación energética + Disponibilidad extensa e inmediata de gas natural + Bajo coste + Puede obtenerse de energías renovables (biogás) + Tecnológicamente probado - Combustible fósil no renovable - Ligero incremento del precio de venta del vehículo - Espacio adicional requerido en el vehículo - Escasez de infraestructuras existentes
Gas licuado del petróleo (GLP)	<ul style="list-style-type: none"> + Reducción de los niveles de emisiones y de ruido + Bajo coste + Una alternativa renovable al GLP es el dimetil éter (DME) obtenido a partir de fuentes renovables, si bien éste es un combustible distinto al GLP + Calidad controlada del combustible - No es un combustible renovable - Coste de inversión de adaptación del vehículo para funcionar con gas licuado del petróleo (GLP) - Escasez de infraestructuras y oferta de fabricantes - Espacio adicional requerido en el vehículo

Combustibles alternativos	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Hidrógeno en vehículos con motor de combustión interna	<ul style="list-style-type: none"> + Emisiones locales prácticamente nulas (salvo emisiones de NO_x), siempre y cuando el H₂ no se obtenga mediante un reformador “in situ” + Tecnología más sencilla y económica que la pila de combustible - Oferta de vehículos limitada a prototipos - Escasez de estaciones de reabastecimiento - Tecnología de almacenamiento compleja

Tabla 14. Ventajas e inconvenientes de los diferentes combustibles alternativos

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la tabla siguiente se resumen las principales ventajas e inconvenientes de los nuevos sistemas de propulsión analizados en este informe:

Nuevos sistemas de propulsión	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Sistemas convencionales (motores de combustión interna)	<ul style="list-style-type: none"> + Coste muy competitivo + Desarrollo tecnológico muy elevado: alta fiabilidad + Amplia red de suministro + Autonomía y prestaciones - Necesidad de modificaciones para utilizar combustibles alternativos - Menor eficiencia que otros sistemas de propulsión (como híbridos, eléctricos, pila de combustible...)
Vehículos híbridos	<ul style="list-style-type: none"> + Reducción del consumo, de las emisiones contaminantes y de las emisiones de CO₂ + Recuperación de energía en retenciones y frenadas + Mayor autonomía que un vehículo eléctrico simple + Mejor funcionamiento en recorridos cortos que un vehículo convencional. Consumo muy inferior en recorridos cortos + El motor térmico tiene una potencia más ajustada al uso habitual del vehículo - Mayor peso que un coche convencional - Mayor complejidad - Escasa oferta de fabricantes - Precio de adquisición elevado
Vehículos eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> + Emisiones locales nulas + Apenas emiten ruido + Pueden recuperar parte de la energía cinética en retenciones y frenadas - Autonomía reducida limitada por la capacidad de la batería - Escasa oferta de vehículos - Altos costes iniciales de los vehículos - Se requiere una infraestructura de suministro de electricidad

Nuevos sistemas de propulsión	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Vehículos impulsados por pila de combustible	+ Emisiones locales nulas + Gran eficiencia de las pilas de combustible - Oferta de vehículos limitada a prototipos - Necesidad de estaciones de reabastecimiento - Precio elevado de las pilas de combustible - Tecnología de almacenamiento del hidrógeno compleja

Tabla 15. Ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas de propulsión alternativos

Fuente: Elaboración propia

14.3 Balance de emisiones

En este apartado se resume el análisis de las emisiones de CO₂ de los diferentes combustibles alternativos y sistemas de propulsión. El análisis se lleva a cabo sobre el ciclo completo del pozo a la rueda o, en inglés, “Well to Wheel”. La referencia de partida para este análisis son las emisiones medias típicas producidas por los vehículos de gasolina en 2002.

En la siguiente figura se muestran las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo completo del pozo a la rueda en el caso de los vehículos de gasolina, diésel, los vehículos híbridos, los biocarburantes de primera y segunda generación y los vehículos de pila de combustible:

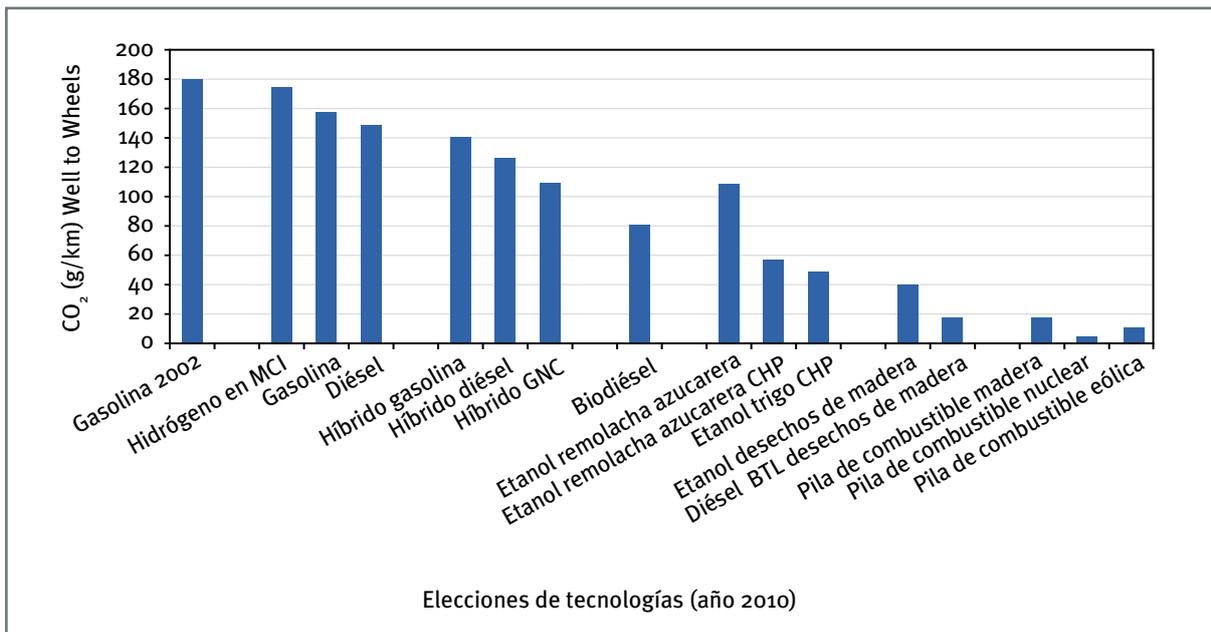


Figura 36. Emisiones de CO₂ de las diferentes combinaciones de combustible y sistemas de propulsión (g/km)

Fuente: JRC/EUCARr/CONCAWE (2006) [49]

Las principales conclusiones a nivel medioambiental que pueden obtenerse del análisis de las emisiones de CO₂ son las siguientes:

- Los vehículos actuales de **gasolina y diésel** son mucho más limpios, medioambientalmente hablando, que sus antecesores de hace tan sólo unos años, y seguirán reduciendo sus emisiones con la incorporación de nuevas

tecnologías y con la entrada en vigor de las futuras normativas anticontaminación. Las emisiones de gases de efecto invernadero también disminuirán en los próximos años al aumentar la eficiencia de los vehículos.

- La utilización de **biodiésel** puro reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 eq) entre un 57% (si el biodiésel se produce a partir de aceites vegetales crudos) y un 88% (si es fabricado a partir de aceites vegetales usados) respecto al diésel convencional, teniendo en cuenta el ciclo de vida completo del biodiésel. El biodiésel puro utilizado en motores de encendido por compresión reduciría también las emisiones de monóxido de carbono (CO), y las de hidrocarburos (HC). Además, el biodiésel puro, gracias a su bajo contenido de impurezas, es igualmente un combustible muy adecuado para ser utilizado en vehículos dotados de sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR), lo que permitiría reducir considerablemente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). Por otro lado, conviene recordar que cuando no se dispone de dicha tecnología de reducción catalítica selectiva (SCR) las emisiones de NO_x producidas por el biodiésel pueden ser mayores que las producidas por el diésel convencional.
- El empleo de **bioetanol** al 85% (E85) fabricado a partir de cereales reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 eq) en un 70% sobre la base de su “ciclo de vida útil” respecto a la gasolina. La utilización de etanol reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO), partículas en suspensión y otros contaminantes precursores de ozono.
- El **gasóleo sintético** contribuye a reducir las emisiones de los motores, especialmente durante el arranque en frío. La excepción son las emisiones de NO_x , que no se ven alteradas. Comparado con los combustibles diésel europeos libres de azufre, el uso de diésel sintético “gas a líquido” o **GTL** en vehículos sin modificar se traduce en reducciones significativas de las emisiones de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), y partículas en suspensión. Durante la fase de arranque en frío también se observan reducciones de las emisiones de hidrocarburos (HC) y de monóxido de carbono (CO). Los GTL permiten mayores índices de recirculación de los gases de escape (EGR), lo que puede utilizarse para reducir, aún más, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). Sin embargo, como se puede comprobar en el apartado siguiente, las emisiones globales de gases de efecto invernadero para el GTL son ligeramente superiores a las del combustible diésel convencional. La emisión total de CO_2 para el combustible obtenido a partir del carbón mediante el proceso Fischer-Tropsch (combustible denominado “carbón a líquido”, o **CTL**) es aproximadamente dos veces superior a la del mismo tipo de combustible obtenido mediante refino de petróleo.
- Sólo si se utiliza biomasa como materia prima (“biomasa a líquido”, o **BTL**) el proceso Fischer-Tropsch puede reducir su nivel de emisiones de gases de efecto invernadero por debajo de las emisiones derivadas del refino del petróleo. La utilización de biomasa como materia prima en la producción de biocarburantes de segunda generación ofrece reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero, en algunos casos, notablemente mayores que las obtenidas con los biocarburantes de primera generación. Con el empleo de biomasa se pueden alcanzar porcentajes de reducción cercanos al 85%. Así, para el **etanol** producido a partir de material **ligno-lulósico**, la reducción en las emisiones del CO_2 llega al 70%, pudiendo alcanzarse el 100% en el caso de utilizar cogeneración para producir también la electricidad empleada en el proceso de obtención del bioetanol.
- Los vehículos de **gas natural** producen emisiones mucho menores que los vehículos alimentados con combustibles convencionales. Sus emisiones casi nulas de partículas en suspensión suponen una clara ventaja respecto a los vehículos que utilizan combustible diésel convencional. Cuando se hace un balance completo desde el pozo hasta la rueda o, en inglés, “Well to Wheel”, de los vehículos de gas natural comprimido (GNC) se obtiene que las emisiones de gases de efecto invernadero son inferiores a las de los vehículos de gasolina, y que se encuentran muy próximas y, en algunos casos, son inferiores a las de los vehículos diésel. La previsión es que en unos años, con el avance de las tecnologías, las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos de GNC sean aún más bajas. De hecho, según fuentes de fabricantes, los vehículos equipados con motores de gas natural que cumplen el nivel europeo EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle o, en castellano, Vehículo Ecológico Mejorado) emiten ya menos CO_2 que los vehículos diésel que cumplen la normativa “Euro 4”.

- Por su parte, la utilización de **biogás** tiene aún mayores beneficios en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, al tratarse de un combustible renovable. Así, el dióxido de carbono emitido durante su combustión habría sido previamente capturado de la atmósfera. Además, el uso de biogás asegura que el metano, un potente gas de efecto invernadero que se genera en los vertederos y en las plantas depuradoras, sea capturado y utilizado como combustible en lugar de dejarse escapar a la atmósfera. En el borrador final de la Directiva COM(2008)19 de impulso a la utilización de energía procedente de fuentes renovables, se establecen factores de reducción de las emisiones de CO₂ de los vehículos que funcionen con biogás desde el 81 al 88% según la fuente de biogas de que se trate. Así, por ejemplo, un vehículo pesado urbano de GNC actual consumiendo biometano, emitiendo típicamente 1 kg/km de CO₂, con esta compensación emitiría solamente 120 g/km, valor inferior al objetivo de 125 g/km impuesto por la UE a la industria del automóvil para el 2015.
- Los vehículos impulsados por combustible “gas licuado del petróleo”, o **GLP**, presentan unas emisiones contaminantes de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas en suspensión inferiores a las emisiones de los carburantes convencionales (gasolinas y gasóleos). Estos vehículos producen unas emisiones de CO₂ inferiores a las de los vehículos de gasolina y similares a las de los vehículos de gasóleo. Por otra parte, en comparación a los vehículos de gas natural las emisiones de CO₂ locales son superiores.
- Los **vehículos eléctricos** producen emisiones nulas en el tubo de escape. Sin embargo, el análisis completo de los beneficios medioambientales de los vehículos eléctricos también debe considerar las emisiones asociadas a la producción y suministro de la electricidad utilizada para recargar las baterías.
- Los **vehículos híbridos** producen menos emisiones de CO₂ que la mayoría de los automóviles con motor de combustión interna disponibles en el mercado. En cuanto a las demás emisiones reguladas (CO, HC, NO_x y partículas), los vehículos híbridos también reducen significativamente estas emisiones.
- Los vehículos alimentados con **hidrógeno** producen en el punto de utilización emisiones nulas (en el caso de los vehículos de **pila de combustible**) o muy bajas (en el caso de los vehículos con motor de combustión interna alimentado con hidrógeno). En este segundo caso, las únicas emisiones que se producen son óxidos de nitrógeno (NO_x), aunque lo habitual es que se trate de cantidades mínimas. A largo plazo, se espera y desea que la producción de hidrógeno se base fundamentalmente en el uso y aprovechamiento de energías renovables. Como se puede observar en la figura anterior, si se utiliza una fuente de energía renovable como la eólica, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es muy importante. Cuando se utiliza en pilas de combustible el hidrógeno obtenido por reformado del gas natural, la reducción en las emisiones de CO₂ ya no es tan significativa. Aunque, en este último caso, las emisiones de CO₂ siguen siendo inferiores en el caso de la pila de combustible a las que se producirían con la utilización directa del gas natural en motores convencionales (ello se debe a que la pila de combustible es, en general, un sistema más eficiente que el motor convencional de combustión).

Los resultados anteriores se resumen en la siguiente tabla. Se ha utilizado una flecha hacia arriba cuando las emisiones de un cierto combustible o de un sistema de propulsión alternativa determinado sean mayores que las emisiones del combustible convencional al que sustituye; se ha empleado una flecha horizontal cuando ambas emisiones sean similares (aunque no lleguen a ser totalmente iguales); y se ha usado una flecha hacia abajo cuando las emisiones de los combustibles o sistemas alternativos sean menores. Se ha utilizado un signo de interrogación “?” cuando no se disponga de datos fiables. Por último, en la tabla se ha introducido un asterisco “*” en aquellos casos en los que las emisiones de CO₂ de los vehículos eléctricos y de los vehículos impulsados por hidrógeno dependan fuertemente de la materia prima o de la fuente primaria de energía utilizada. Se entiende, por ejemplo, que cuando la fuente de energía primaria sea renovable, las emisiones de CO₂ serán muy reducidas, sobre todo en los vehículos eléctricos y de pila de combustible. Las emisiones de CO₂ son las correspondientes al análisis completo del pozo a la rueda o, en inglés, análisis “Well to Wheel”.

Emisiones	CO ₂	NO _x	CO	HC	PM
Biodiésel	↘	↗	↘	↓	↘
Bioetanol	↘	↗	↓	↗	↘
Gas a líquido (GTL)	↗	↗	↓	↘	↘
Biomasa a líquido (BTL)	↓	?	?	?	?
Etanol lignocelulósico	↓	?	?	?	?
Gas natural*	*	↘	↘	↘	↓
Gas licuado del petróleo (GLP)	↗	↓	↗	↗	↘
Vehículos eléctricos	*	↓	↓	↓	↓
Vehículos híbridos	↘	↘	↘	↘	↘
Pila de combustible	*	↓	↓	↓	↓
Hidrógeno en motores de combustión interna	*	↘	↓	↓	↓

* En formulación estequiométrica

Tabla 16. Emisiones comparativas de los nuevos sistemas de propulsión y combustibles alternativos en comparación con los combustibles convencionales a los que sustituyen

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en esta tabla, algunas de las tecnologías anteriores podrían contribuir al cumplimiento de los requerimientos de las futuras normativas anticontaminantes europeas que, progresivamente, van siendo cada vez más restrictivas. Los límites de emisiones impuestos por las diferentes normativas de homologación de vehículos nuevos de gasolina y diésel han sido presentados en el capítulo 1.

14.4 Balance energético

A continuación se realiza una comparación del consumo de energía asociado a los diferentes carburantes y sistemas de propulsión. Al consumo de energía de los vehículos de gasolina en 2002 se le ha asignado el valor de referencia “100”. En este análisis del pozo a la rueda o, en inglés, “Well to Wheel”, se tiene en cuenta la energía consumida en la fase de obtención de la materia prima, en su transformación en combustible, en la distribución y venta del mismo y, por último, en el uso final de la energía o el combustible en los vehículos.

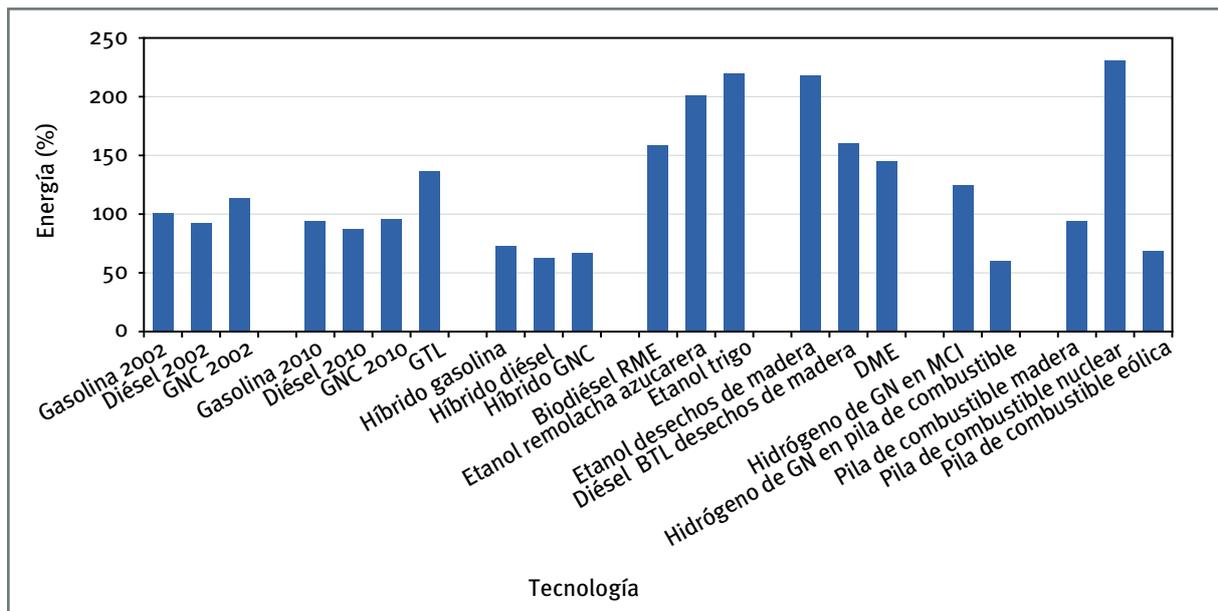


Figura 37. Energía consumida en el caso de los diferentes combustibles y sistemas de propulsión (en porcentaje y con respecto a la energía asociada a los vehículos convencionales de gasolina en el año 2002)

Fuente: JRC/Eucar/Concawe (2005) [49]

Las principales conclusiones relativas al balance energético de las tecnologías, combustibles y sistemas de propulsión estudiados en este trabajo, tal y como se refleja en la figura anterior, se resumen a continuación:

- Las nuevas **modificaciones en los vehículos** van a permitir aumentar la eficiencia energética de los mismos, por lo que se prevé que el consumo de energía disminuya en los vehículos de gasolina del año 2010. Los vehículos diésel, que ya tienen un menor consumo energético que los vehículos de gasolina, también mejorarán su eficiencia entre 2002 y 2010, aunque previsiblemente en menor medida.
- El consumo energético de los vehículos impulsados por **gas natural comprimido (GNC)** disminuirá considerablemente en el año 2010 respecto a 2002, alcanzándose balances energéticos similares a los de los vehículos diésel y gasolina.
- Los **vehículos híbridos** permiten reducir aún más el consumo energético, ya que su eficiencia energética global es considerablemente mayor. Éstos vehículos permiten alcanzar disminuciones en el consumo medio de energía del orden del 35%, pudiendo ser dicha reducción aún mayor en utilización urbana.
- El balance energético de los **combustibles sintéticos** dependerá del combustible de que se trate y del proceso de síntesis utilizado en su fabricación. Así, por ejemplo, el proceso de obtención del combustible diésel conocido como “gas a líquido”, o **GTL**, es menos eficiente desde el punto de vista energético que el uso directo del gas natural en los motores. De hecho, la eficiencia del proceso GTL puede quedarse en torno al 60%.
- En cuanto a los **biocarburantes**, la energía total consumida en su producción es superior a la correspondiente a la obtención de la gasolina. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la mayor parte de esta energía procede de la biomasa y es renovable, por lo que la energía “no renovable” consumida es considerablemente menor que la correspondiente a la gasolina.
- En el caso del **hidrógeno**, el análisis es completamente diferente dependiendo de la fuente de energía utilizada en su producción, y del tipo de vehículo en el que se utiliza finalmente dicho combustible: vehículo propulsado por motor de combustión interna o vehículo dotado de pila de combustible. Si se utiliza el hidrógeno obtenido por reformado de gas natural en vehículos con motor de combustión interna, el consumo de energía fósil es sólo ligeramente superior al correspondiente a la utilización directa del gas natural. Si el hidrógeno se utiliza

en vehículos con pila de combustible, el consumo energético es entonces mucho menor, gracias a la mayor eficiencia de este sistema de propulsión. El objetivo futuro es utilizar en vehículos de pila de combustible hidrógeno obtenido mediante electrolisis a partir de energías renovables como la biomasa o la energía eólica. Tampoco se descarta el uso de energía nuclear como fuente de la electricidad utilizada en la electrolisis. En todos estos casos también se producen importantes reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Otras posibilidades analizadas en este estudio son el gas licuado del petróleo (GLP) y los vehículos eléctricos:

- Los vehículos impulsados por gas licuado del petróleo, o **GLP**, también requieren energía fósil, pero al menos contribuyen a la diversificación energética, ya que es posible obtener dicho combustible tanto de refinerías como de yacimientos de gas natural húmedo. El balance energético global depende de varios aspectos, entre ellos si el combustible se obtiene de yacimientos de gas natural húmedo o mediante procesos de refinado del petróleo. Cuando el GLP se obtiene de un proceso de refinado, el balance depende también del proceso concreto que se utiliza, ya que cada proceso tiene un rendimiento diferente.
- La **electricidad** es un vector energético, y no una fuente de energía, por lo que siempre se necesita una fuente de energía primaria para su producción. Una de las principales ventajas de la electricidad es que puede obtenerse de fuentes de energía muy diversas. El balance energético de los vehículos eléctricos dependerá de la eficiencia de la fuente de energía que la produzca, del rendimiento durante el transporte desde su lugar de producción hasta el punto de consumo y de la eficiencia del sistema de propulsión del vehículo. En general, la eficiencia global es más elevada en el caso de los vehículos eléctricos que en el caso de los vehículos con motor de combustión interna.

14.5 Balance del grado de desarrollo tecnológico y de las infraestructuras

A continuación se indica el grado de desarrollo tecnológico y el nivel de madurez de las infraestructuras en España para cada uno de los sistemas de propulsión y para cada uno de los combustibles alternativos:

Combustible / sistema de propulsión	Grado de desarrollo de la tecnología	Grado de desarrollo de la infraestructura
Biodiésel	Muy alto	Alto
Bioetanol	Muy alto	Bajo
Gas a líquido (GTL)	Medio	Muy bajo
Biomasa a líquido (BTL)	Medio	Muy bajo
Etanol lignocelulósico	Medio	Muy bajo
Gas natural	Muy alto	Bajo
Gas licuado del petróleo (GLP)	Muy alto	Bajo
Vehículos eléctricos	Alto	Bajo
Vehículos híbridos	Muy alto	Muy alto
Pila de combustible	Bajo	Muy bajo
Hidrógeno en MCI	Alto	Muy bajo

Tabla 17. Grado de desarrollo tecnológico y madurez de las infraestructuras en España para los diferentes sistemas de propulsión y combustibles alternativos

Fuente: Elaboración propia

En la actualidad, el grado de desarrollo tecnológico y el nivel de madurez de las infraestructuras de aprovisionamiento de cada uno de los combustibles y sistemas de propulsión estudiados en este trabajo son los siguientes:

- El **biodiésel** y el **bioetanol** tienen un grado de desarrollo tecnológico muy elevado. En cuanto a su infraestructura de reabastecimiento, en España existe un número muy reducido de estaciones de bioetanol. La situación con respecto al biodiésel es muy distinta, existiendo un gran número de estaciones que abastecen de biodiesel, si bien es importante mencionar el tema de definir la calidad de los mismos algo fundamental para su uso en el vehículo. Ambos biocarburantes pueden utilizarse mezclados hasta el 5% con carburantes convencionales sin que sea necesario anunciarlo en las gasolineras. Esta posibilidad justifica que se haya indicado un grado de desarrollo de la infraestructura “alto” en la tabla anterior.
- Los **combustibles sintéticos** y los **biocarburantes de segunda generación** están aún en fase de desarrollo industrial.
- El **gas natural** tiene un elevado grado de desarrollo tecnológico, además los vehículos ya están diseñados desde el principio para utilizar gas natural, ofertándose vehículos en todas las categorías. Sin embargo, las infraestructuras existentes son aún escasas en España.
- El “gas licuado del petróleo” (**GLP**) tiene también un grado elevado de desarrollo tecnológico. Sin embargo, los vehículos existentes son, en su mayoría, adaptados y, las estaciones de servicio que ofrecen GLP en España se limitan normalmente a abastecer a flotas privadas de vehículos.
- La popularización de los **vehículos eléctricos** depende todavía de que se alcance un mayor grado de desarrollo de las baterías. Aunque se ha indicado en la tabla anterior un grado de desarrollo de la infraestructura de abastecimiento “bajo”, conviene recordar que algunos vehículos eléctricos pueden recargarse conectándose directamente a la red eléctrica, lo que elimina la necesidad de infraestructuras específicas.
- Los **vehículos híbridos** están siendo desarrollados por la mayoría de marcas de automóviles. Estos vehículos utilizan infraestructuras convencionales de abastecimiento de combustible.
- Por último, aún no existe una red consolidada de suministro de hidrógeno. Las **pilas de combustible** están aún en fase de desarrollo, mientras que los vehículos que utilizan **hidrógeno en motores de combustión interna** tienen una tecnología más sencilla y desarrollada. En el caso de los vehículos con motor de combustión interna, su desarrollo tecnológico está limitado por la complejidad del almacenamiento del hidrógeno a bordo del vehículo. En cualquier caso, es importante tener en cuenta los aspectos de seguridad y normativas en estos vehículos.

15 Legislación vigente. Políticas actuales y emergentes

15.1 Legislación y políticas europeas

La mayoría de los avances en la reducción de las emisiones contaminantes en Europa son consecuencia de las sucesivas **normativas europeas anticontaminantes “Euro”** y de su progresiva evolución hacia límites de contaminación cada vez más restrictivos.

A principio de la década de los 2000, la Comisión Europea y los fabricantes europeos de automóviles llegaron a un acuerdo por el que los vehículos vendidos en Europa a partir del año 2008 no debían superar de media los 140 gramos de CO₂ emitidos por cada kilómetro recorrido (g/km). Tras las previsiones de incumplimiento de dicho acuerdo voluntario, la Comisión Europea propuso el pasado mes de febrero de 2007 una nueva estrategia para la reducción de las emisiones de CO₂ de los automóviles. Esta estrategia abandonaba los acuerdos voluntarios y optaba por imponer la obligación de alcanzar determinados objetivos numéricos. La idea inicial de la Comisión era alcanzar un objetivo de 120 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido en el año 2012, incluyendo en dicha reducción una cierta reducción derivada de la mejora en la eficiencia de los neumáticos y del sistema de aire acondicionado. Estas dos mejoras, en los neumáticos y el aire acondicionado, deberían contribuir según las estimaciones de la Comisión Europea con una reducción de 10 gramos de CO₂ por kilómetro. Sin embargo, una resolución del Parlamento Europeo de octubre de 2007 planteó simplificar el objetivo anterior fijándolo en 125 gramos de CO₂ por kilómetro en el año 2015. Recientemente, con el fin de impulsar el empleo de vehículos limpios a nivel comunitario se ha publicado el borrador final de Directiva COM(2007)817 que establecerá la inclusión de costes operativos del consumo energético y de la emisión de contaminantes durante la vida útil de los vehículos como base para los criterios de selección y adjudicación de contratos de todas las entidades públicas para la adquisición de vehículos de transporte rodados.

En cuanto a las políticas europeas sobre combustibles alternativos, el **plan de acción** de la Unión Europea **para el fomento de los combustibles alternativos y los biocarburantes en el transporte por carretera** concentra sus medidas en la promoción de aquellas tres opciones que, en el año 2000, parecían poseer un mayor potencial:

- A corto plazo, los biocarburantes.
- A medio plazo, el gas natural.
- A largo plazo, el hidrógeno y las pilas de combustible.

Según la Comisión Europea, la combinación de las tres opciones anteriores permitiría en 2020 sustituir el 20% de todos los combustibles tradicionales utilizados en el sector del transporte por carretera en Europa. En realidad, este objetivo no supuso en su momento ninguna novedad, puesto que ya había sido introducido anteriormente en el Libro Verde de la Comisión “Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético” que fue publicado en el año 2000. Por otro lado, la Directiva COM (2008) 19 impulsa la utilización de energía procedente de fuentes renovables con objetivos jurídicamente vinculantes para todos los países miembros.

En la siguiente tabla se recogen los **objetivos** de uso de combustibles alternativos fijados por la **Comisión Europea** en una de sus comunicaciones del año 2001:

	2005	2010	2015	2020
Biocarburantes	2%	6%	7%	8%
Gas Natural		2%	5%	10%
Hidrógeno			2%	5%

(continuación)

	2005	2010	2015	2020
Total	2%	8%	14%	23%

Tabla 18. Objetivos de uso de combustibles alternativos propuestos por la Comisión Europea en 2001

Fuente: Elaboración propia

Según algunas fuentes, en estos momentos sería más realista hablar en el año 2020 de un 15% de biocarburantes, de un 10% de utilización de gas natural, de un 5% de empleo de GLP y de un número todavía muy reducido de vehículos de hidrógeno.

Respecto a la utilización de biocarburantes, la Unión Europea publicó en 2003 la **Directiva 2003/30/CE** que establece como obligatorio un cierto porcentaje de uso de biocarburantes: el 2% en 2005 y el 5,75% en 2010. La citada directiva permite desviaciones con respecto a dichos valores siempre que estén justificados. La producción europea de biocarburantes experimentó un aumento durante 2005 de más del 60% con respecto al año anterior, con un total de 3.904.927 toneladas de biocarburantes producidas en el año 2005. El objetivo del 2% de cuota de biocarburantes establecido para 2005 se alcanzó en varios países europeos, aunque no en todos.

Adicionalmente, el objetivo del **Libro Blanco de las Energías Renovables** de la Comisión Europea es alcanzar antes de 2010 una producción de biocombustibles de 18 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Esta cantidad se corresponde aproximadamente con los valores fijados por la Directiva 2003/30/CE relativa al fomento del uso de biocarburantes, la cual, como se acaba de indicar, establece para la misma fecha una sustitución del 5,75% de todo el combustible fósil utilizado por el sector del transporte. Este objetivo del Libro Blanco se alcanzará principalmente mediante la utilización de biodiésel y bioetanol. A más largo plazo se espera que los biocarburantes de segunda generación también ayuden a cumplir con los objetivos marcados para la siguiente década.

Finalmente, y aunque no se encuentre incluido en los objetivos anteriores, el gas licuado del petróleo (GLP) también ha sido considerado por la Comisión Europea como otra de las posibles alternativas a los carburantes convencionales. La Comisión Europea otorga al GLP un potencial para aumentar su cuota de mercado, posiblemente hasta alcanzar un 5% del consumo total en el año 2010. De todos modos, con respecto al gas licuado del petróleo la Comisión Europea no fija ningún objetivo específico. A fin de favorecer una mayor penetración de este carburante en el entorno europeo se están estandarizando procedimientos y aspectos técnicos relacionados con el GLP. Diversos países europeos como Francia, Italia o Reino Unido han implantado medidas específicas para el fomento del uso del gas licuado del petróleo en automoción.

15.2 Legislación y políticas españolas

En España, el Plan de Energías Renovables 2005-2010 (**PER**) elevó el objetivo del anterior Plan de Fomento de Energías Renovables (**PFER**) relativo a la utilización de biocarburantes para 2010, pasándose de las iniciales 500.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep) a las 2.200.000 toneladas en el año 2010. De alcanzarse dicho objetivo se evitaría la emisión a la atmósfera de 5.905.270 toneladas de CO₂ en el año 2010. Además, el plan estima una creación de empleo de 46.227 puestos de trabajo al año gracias tanto a la inversión prevista en los proyectos de desarrollo de biocarburantes como a la explotación comercial de los mismos.

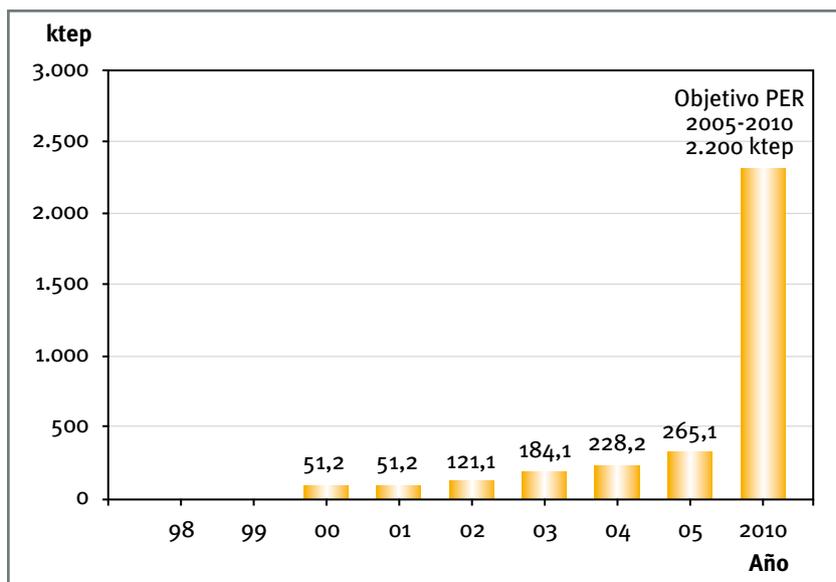


Figura 38. Evolución y previsión del consumo de biocarburantes en España (los datos del año 2005 son provisionales)
Fuente: IDAE

Con objeto de alcanzar el objetivo anterior, el Plan de Energías Renovables (PER) propone además una serie de medidas para superar las barreras a las que se enfrentan los biocarburantes en España. Entre las medidas propuestas destacan la continuación de la fiscalidad actual (tipo cero en el Impuesto Especial de Hidrocarburos) durante al menos 10 años; el desarrollo de todas las posibilidades que ofrece la Política Agraria Común europea (PAC) [62], en especial las ayudas europeas y nacionales a los cultivos energéticos; y un paquete de medidas para abaratar el coste final de los aceites para biodiésel. Entre estas medidas de abaratamiento se pueden citar el desarrollo de una logística de recogida de aceites usados, o la investigación y selección de nuevas especies de plantas oleaginosas.

Para ayudar a conseguir los citados objetivos de cuota de biocarburantes, se ha aprobado recientemente la reforma de la Ley 34/1998 del Sector de Hidrocarburos (LSH). La reforma incluye **cuotas obligatorias de biocarburantes**. En concreto, los biocarburantes deberán alcanzar en el año 2008, de un modo indicativo, el 1,9% del total del mercado de combustibles; mientras que en 2009 y en 2010, y entonces ya con carácter obligatorio, tendrán que representar el 3,4% y el 5,8%, respectivamente.

Entre las políticas utilizadas para fomentar el uso de combustibles alternativos destaca la **reducción o exención del Impuesto Especial de Hidrocarburos (IEH)**. Algunos combustibles alternativos como, por ejemplo, el biodiésel o el bioetanol gozan de una tasa impositiva nula, mientras que otros como el gas licuado del petróleo (GLP) se benefician de importantes reducciones en el IEH.

Por otro lado, el plan de acción de la **Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4)** incluye igualmente diversas medidas dirigidas al sector del transporte. Las medidas del sector transporte se integran en tres bloques diferenciados: medidas de cambio modal, medidas de mejor uso de los medios de transporte y medidas de mejora tecnológica y promoción de tecnologías y combustibles alternativos, incluyéndose ayudas para la compra de vehículos con tecnologías eficientes y combustibles alternativos.

En julio de 2008 se aprobó el Plan de Activación 2008-2011 en el que se definen medidas dentro de tres líneas estratégicas: movilidad sostenible, edificación sostenible y sostenibilidad energética. Estas medidas suponen, por una parte, una aceleración e intensificación de algunas de las medidas ya recogidas en el Plan de Acción 2008-2012; otras, en cambio, constituyen una novedad con respecto a lo ya aprobado y en ejecución. Dentro de las medidas que se proponen, la Administración General del Estado asumirá el papel ejemplarizante que le corresponde en el fomento del ahorro y la eficiencia, incluyéndose actuaciones de promoción del uso de combustibles alternativos y vehículos más eficientes.

También conviene señalar que para alcanzar el objetivo propuesto por el Parlamento Europeo de reducir en 2015 las emisiones medias de los automóviles hasta los 125 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido (g/km), en España entró en vigor el 1 de enero de 2008 una nueva fiscalidad sobre los automóviles. La nueva fiscalidad fue introducida mediante una enmienda a la Ley de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera. Esta enmienda altera el criterio para determinar el **impuesto de matriculación**, que ya no se determina a partir de la cilindrada o el combustible que se utiliza sino a partir de la mayor o menor emisión de dióxido de carbono a la atmósfera. De esta forma, los automóviles con una emisión de CO₂ igual o inferior a 120 g/km quedarán exentos del pago del impuesto de matriculación; mientras que el impuesto se sitúa en el 4,75% para los automóviles que emitan entre 121 y 160 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido; en el 9,75% para los vehículos que emitan entre 161 y 200 gramos; y en el 14,75% para los vehículos que emitan más de 200 gramos de CO₂ por cada kilómetro recorrido. Los quads y las motos acuáticas también estarán gravados con este último porcentaje del 14,75%.

De forma complementaria a la medida anterior, recientemente se ha aprobado un nuevo plan con medidas urgentes que se enmarca dentro de la **Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia** (EECCCL). La estrategia, entre otros aspectos, incluye en relación con el uso de los combustibles alternativos en el transporte:

- La modificación del impuesto de matriculación explicada anteriormente.
- El porcentaje mínimo de biocarburantes ya comentado.
- Una revisión del RD 61/2006 mediante la cual el biogás, el biometanol, el bioETBE, los biocarburantes sintéticos, el biohidrógeno y el aceite vegetal puro serán considerados biocarburantes a efectos de la Directiva 2003/30/CE. Así, con esta modificación normativa todos estos carburantes se suman a los tradicionalmente considerados como biocombustibles (el biodiésel y el bioetanol).
- La evaluación de una posible modificación del impuesto de circulación consistente en utilizar las emisiones de CO₂ como base para fijar los porcentajes impositivos aplicables, en lugar de utilizar para ello la potencia y la clase del vehículo como sucede en la actualidad.

16 Análisis económico y social

El desarrollo de combustibles alternativos en España se encuentra en una situación de desventaja competitiva en comparación con el resto de Europa debido a que el **Impuesto de Hidrocarburos** español incentiva menos el uso de combustibles alternativos que la fiscalidad de otros países. Ello provoca que la exportación de biocarburantes a otros países de la UE pueda resultar más rentable que su venta dentro de España, lo que podría constituir una amenaza para el cumplimiento de los objetivos relativos al consumo de biocombustibles en España.

De todos modos, el desarrollo de la producción de biocarburantes en España ha supuesto ya un impulso considerable en la **creación de empleo**, principalmente en el sector agrario. Así, el Plan de Fomento de las Energías Renovables (PFER) estimó que el sector de los biocarburantes crearía unos 15.000 nuevos empleos en el periodo 1999-2006. Se trataría de empleos dedicados a actividades de diseño, construcción, operación, mantenimiento, producción y consumo de biocombustibles. Además, la creación de empleo asociada al desarrollo de los biocarburantes se realiza, en buena medida, en zonas rurales y dispersas, que es donde normalmente se localiza el recurso energético. Por lo tanto, el beneficio socioeconómico asociado a la creación de empleo se incrementa aún más al contribuir los biocarburantes al desarrollo rural y a evitar la despoblación de zonas rurales.

Por otra parte, uno de los factores más importantes para el desarrollo de los diferentes sistemas de propulsión y combustibles alternativos son los **costes** asociados a cada uno de ellos:

- De acuerdo con el Plan de Energías Renovables (PER), los costes de producción de los **biocarburantes** son más elevados que los costes de los carburantes fósiles de referencia. El factor que tiene una mayor influencia en los costes de producción es siempre el precio de la materia prima utilizada.
- Los **combustibles sintéticos y los biocarburantes de segunda generación** están lastrados por los elevados costes de sus procesos de producción. La utilización de biomasa procedente de residuos podría abaratar significativamente los costes, al reducir el precio de la materia prima.
- En cuanto al uso del **gas natural** como combustible en vehículos, la principal barrera actual es la escasez de infraestructuras existentes. Como contrapartida, los ahorros en el coste del combustible por kilómetro recorrido pueden llegar al 20% respecto a los vehículos diésel. Estos ahorros incluso podrían llegar a compensar los costes de inversión que en algunos casos son ligeramente superiores al vehículo de gasolina o diésel.
- En cuanto al uso del GLP como combustible en vehículo, las principales barreras son la escasez de infraestructuras existentes y la escasez de oferta de vehículos, siendo la mayoría adaptados. Sin embargo, se presenta como una alternativa a la gasolina y diésel gracias a sus ventajas medioambientales y al posterior ahorro en mantenimiento.
- Los **vehículos eléctricos** tienen unos costes muy elevados, sobre todo teniendo en cuenta las prestaciones que ofrecen. Del mismo modo, los **vehículos híbridos** tienen también unos costes superiores a los vehículos convencionales. Cuando se desarrolla un vehículo eléctrico híbrido, los fabricantes pueden optar entre una configuración del tipo semihíbrido o una del tipo híbrido puro, siendo la opción semihíbrido la solución más económica. Los factores económicos clave en el coste de un vehículo híbrido son:
 - El coste del motor eléctrico.
 - El coste de la tecnología de la batería.
 - El coste del sistema eléctrico y de la electrónica de potencia.

Actualmente, estas diferencias de costes se trasladan directamente al usuario, quien tiene que pagar un importante sobreprecio al adquirir un vehículo híbrido en lugar de otro equivalente convencional. En la actualidad, dicho sobreprecio no llega a ser totalmente compensando ni por las subvenciones públicas ni por los ahorros que se obtienen en el consumo de combustible. Uno de los desafíos clave de la industria del automóvil es, por tanto, ofrecer vehículos híbridos a un precio de venta más asequible. Ello se conseguirá en parte cuando se reduzcan los costes de fabricación gracias a la comercialización a gran escala de estos modelos.

- La viabilidad económica de los vehículos de **hidrógeno** está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora del sistema de almacenamiento del hidrógeno en los vehículos y, sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje.
- Los costes asociados a cada tecnología se trasladan al usuario, quien soporta incrementos del precio de venta final de los vehículos. A continuación se muestra una estimación del incremento en el precio de venta de los vehículos atribuible a diversas tecnologías, como la inyección directa de gasolina (o, en inglés, Direct Injection in Spark Ignition - DISI), la inyección directa de diésel (o, en inglés, Direct Injection in Compression Ignition - DICI), los filtros de partículas diésel (o, en inglés, Diesel Particulate Filter - DPF), las hibridaciones, las adaptaciones para funcionar con gases licuados de petróleo (GLP), con gas natural comprimido (GNC), o con hidrógeno (H₂) comprimido o licuado bien en motores de combustión interna (PISI - Port Injection Spark Ignition) o bien en pilas de combustible (PC). Todos los aumentos en el precio se expresan en porcentaje con respecto a los vehículos convencionales impulsados por gasolina en el año 2002.

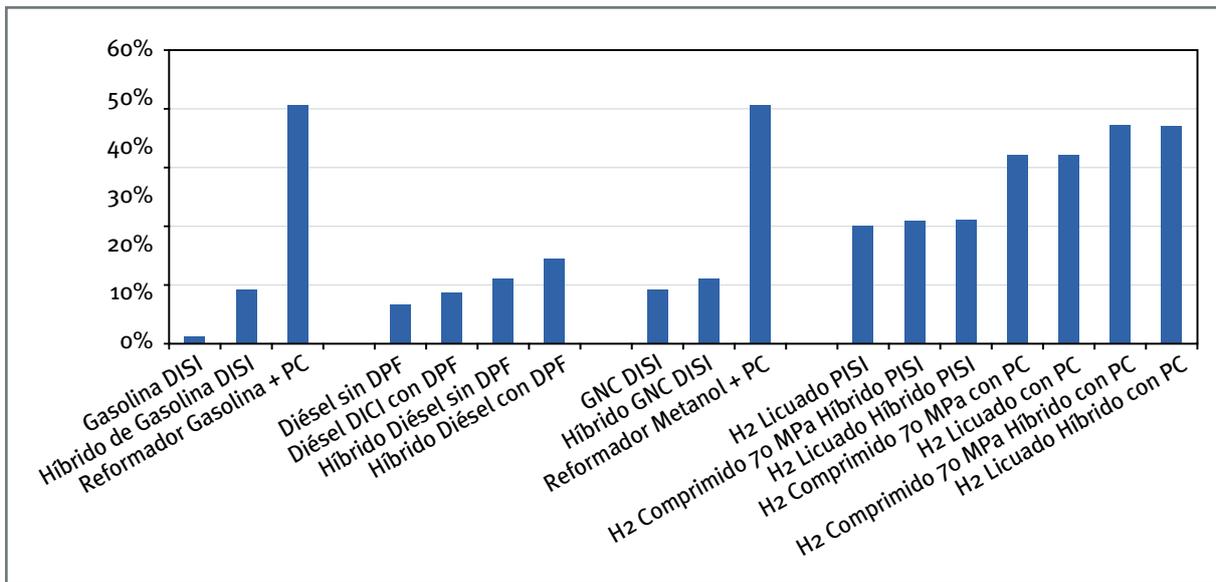


Figura 39. Incremento porcentual estimado en el precio de venta de los vehículos respecto al precio en el año 2002 de un vehículo convencional de inyección indirecta de gasolina

Fuente: JRC/EUCAR/CONCAWE (2005) [49]

17 Estudio de mercado y disponibilidad de los sistemas

17.1 Modificaciones de los sistemas convencionales de propulsión

Son muchas las tecnologías de reducción de emisiones que ya están disponibles actualmente. Algunas están extendidas ampliamente, como los catalizadores de tres vías o los sistemas de recirculación de gases de escape (o, en inglés, Exhaust Gas Recirculation – EGR). Otras se están incorporando paulatinamente en los nuevos modelos de vehículos, como es el caso de los filtros de partículas diésel, los sistemas “parada y arranque” (o, en inglés, “Stop and Start”) o los sistemas de control de la presión de los neumáticos. La tecnología de reducción catalítica selectiva (o, en inglés, Selective Catalytic Reduction – SCR) podría estar disponible en los vehículos en un futuro próximo, lo que ayudaría a éstos a cumplir con los futuros requerimientos de reducción de emisiones exigidos por las últimas normativas. En un futuro, a más largo plazo, podrían estar disponibles tecnologías aún en desarrollo como el sistema eléctrico de 42 voltios o los motores con encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) o con autoencendido controlado (CAI).

17.2 Biodiésel

El biodiésel producido a partir de residuos vegetales oleaginosos se beneficia de los precios relativamente bajos de estos residuos, lo que hace que su fabricación resulte rentable con los incentivos fiscales actuales. Es el biocombustible más ampliamente comercializado en España, existiendo más de 360 estaciones de servicio que lo distribuyen.

17.3 Bioetanol

La producción actual de bioetanol resulta bastante más cara que la obtención de gasolina. Por ello se necesitan ventajas fiscales si se desea que el bioetanol pueda competir con la gasolina y que dicha competencia estimule su mercado y su producción. España, a pesar de ser el primer país productor europeo de este biocombustible, no dispone de una red consolidada de estaciones de servicio que suministren bioetanol para uso público. La mayoría de las estaciones que suministran este combustible lo hacen para uso privado de flotas de autobuses o vehículos ligeros, si bien empiezan a aparecer las primeras estaciones para uso particular.

17.4 Combustibles sintéticos

Los combustibles sintéticos se encuentran todavía en fase de desarrollo a nivel industrial, y el número de plantas en el mundo que realizan síntesis de Fischer Tropsch (FT) aún es muy reducido. Las plantas Fischer Tropsch son caras de construir y presentan una serie de problemas medioambientales aún sin resolver. Ello provoca que tanto el gasóleo como la gasolina todavía se obtengan de forma más sencilla y barata mediante el refinado de petróleo. El uso de combustibles sintéticos se justifica sólo cuando el petróleo resulte particularmente caro o escaso, y cuando se disponga de una fuente alternativa de hidrocarburos barata o cercana. Ejemplos de dichas fuentes alternativas de hidrocarburos son el carbón, el gas natural, los desechos vegetales o los residuos pesados procedentes de las refinerías. Por otro lado, el combustible “gas a líquido” (GTL) obtenido a partir de gas natural sólo es rentable económicamente cuando algún obstáculo impide la comercialización directa del gas natural. Esto ocurre, por ejemplo, en los yacimientos pequeños situados lejos de los terminales de licuefacción.

17.5 Biocombustibles de segunda generación

De acuerdo con algunos estudios, en Europa el volumen potencial de producción en términos técnicos del combustible denominado “biomasa a líquido” (BTL), es decir, sin que se reduzca la producción de cultivos alimenticios, alcanza los 70 millones de toneladas. Este valor equivaldría a cerca de un tercio de la demanda total de combustible para todos los vehículos de los quince Estados que pertenecían a la Unión Europea en el año 2000. Esta estimación

incluye tanto a los vehículos diésel como a los de gasolina, y tanto a los automóviles particulares como a los vehículos comerciales. En los países europeos se está dando en estos momentos un gran impulso a los biocarburantes de segunda generación con el objetivo de que estén disponibles en la próxima década.

17.6 Gas natural

El gas natural es un combustible de disponibilidad inmediata ya que su distribución se realiza a través de la red existente. En cuanto al número de vehículos de gas natural, éste se ha duplicado en el mundo en los últimos cinco años, llegándose a más de 8,5 millones de vehículos. La Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural prevé que se llegue a 50 millones de vehículos en el año 2020.

En 2005 había en España cerca de 800 vehículos de gas natural, elevándose dicho número a 1.526 en mayo de 2008, según la Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural. En nuestro país existían 35 estaciones de abastecimiento de este producto en mayo 2008. Además, ya se ha abierto en España la primera estación de este combustible de uso público. La evolución en España del mercado de gas natural en el sector del transporte entre los años 1995 y 2003 se muestra en la gráfica siguiente:

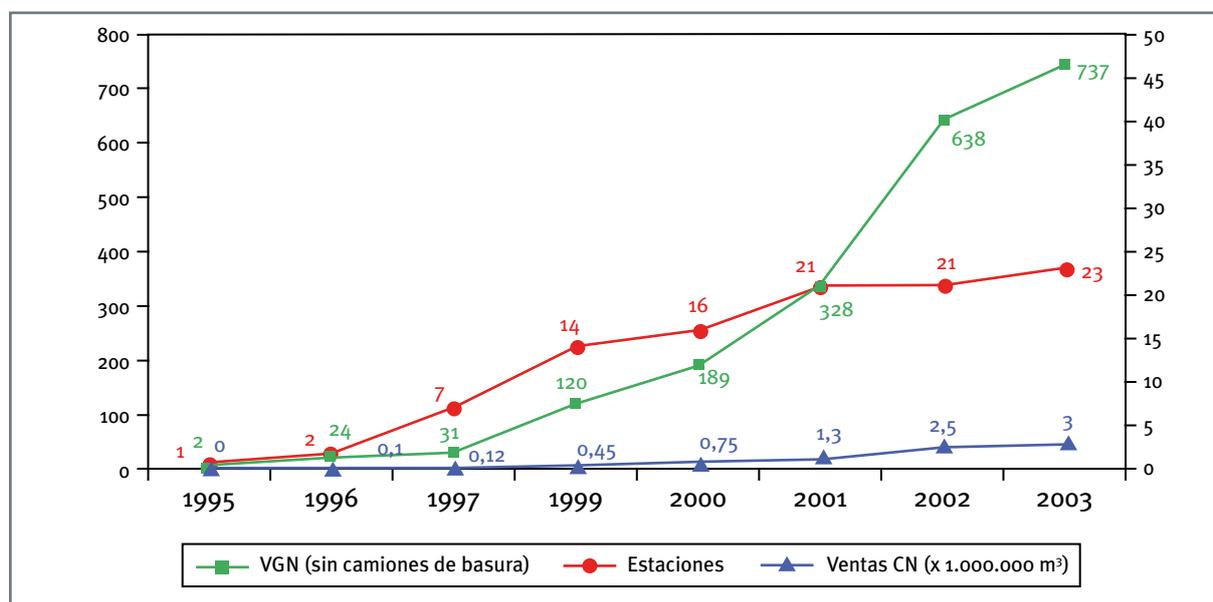


Figura 40. Evolución en España, entre 1995 y 2003, del número de vehículos de gas natural (en color verde), de estaciones de abastecimiento (en color rojo) y del volumen de gas vendido en millones de metros cúbicos (en azul)

Fuente: International Gas Union - IGU

Estos datos evidencian que en la última década se puede hablar de un despegue del mercado de vehículos de gas natural en España. Los factores clave para el desarrollo de este mercado son: los reducidos impuestos que gravan el gas natural; el papel activo de algunas empresas importantes en este sector –incluidos los fabricantes de vehículos–; las últimas normativas europeas; los estándares técnicos que eventualmente se adopten; y el impulso dado por parte de las administraciones públicas españolas.

17.7 Gas licuado del petróleo (GLP)

El gas licuado del petróleo (GLP) se presenta también como un combustible alternativo a la gasolina y diésel, con más de 11 millones de vehículos funcionando en estos momentos con este combustible. La tecnología está plenamente desarrollada y disponible de almacenamiento, distribución y consumo de gas licuado del petróleo (GLP) para automoción, al igual que ocurre con el GNC. Sin embargo, en España, las ventas de este producto destinadas a la

automoción representan menos del 1% del consumo total de gas licuado del petróleo (GLP) a nivel mundial. Así, sólo un mínimo número de 31 instalaciones suministraban gas licuado del petróleo en 2005 en España. De éstas, nueve eran instalaciones mixtas. Con la reciente introducción en nuestro país de ciertas modificaciones normativas, incluidas una significativa rebaja del tipo impositivo aplicable al GLP para su uso en vehículos particulares y la posibilidad de adaptar los vehículos particulares para su uso con este combustible, han desaparecido algunas de las barreras que hasta ahora habían impedido el desarrollo de este combustible en España.

A nivel mundial, desde 1999 hasta 2004 el gas licuado del petróleo (GLP) destinado a automoción pasó de representar el 6,6% a suponer el 7,6% de todo el gas licuado del petróleo consumido en todo el mundo. En ese mismo periodo, el número de vehículos impulsados por gas licuado del petróleo (GLP) en todo el mundo experimentó un incremento anual del 9%, lo que se tradujo sólo en esos cinco años en un incremento acumulado cercano al 50%.

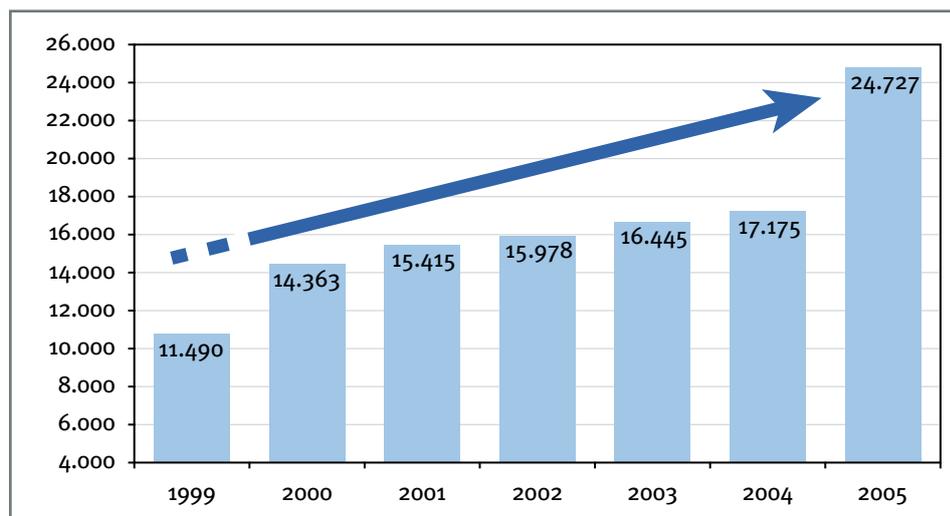


Figura 41.
Estimación del consumo global de GLP para automoción a nivel mundial en el año 2010
Fuente: Asociación Mundial del GLP: www.worldlpgas.com

Sin embargo, en los vehículos a GLP hay que tener en cuenta que, al tratarse en su mayoría de vehículos adaptados, éstos han de estar certificados y homologados con el fin de que las emisiones finales no superen en ningún caso a las que tendrían inicialmente y, cumplan la normativa existente en ese momento.

17.8 Vehículos eléctricos

Los mercados potenciales de los vehículos eléctricos son las flotas cautivas de servicios de transporte urbano de viajeros y de recogida de basuras, las flotas cautivas de vehículos ligeros de organismos públicos y, en menor medida, los vehículos para uso particular. En todos estos casos, la distribución de electricidad hasta los vehículos (dicho de otro modo, hasta el punto de consumo) se hace a través de la red ordinaria.

Desde hace relativamente pocos años están a la venta para mayoristas varios modelos de autobuses eléctricos y vehículos de baterías. Por ejemplo, en España recientemente se ha empezado a comercializar el primer vehículo eléctrico que se pone al alcance del público en general: el Reva i.

Actualmente, los vehículos eléctricos impulsados por baterías no llegan a ofrecer ni la autonomía ni la velocidad que ofrecen los vehículos convencionales, lo cual lastra notablemente el despliegue de la electricidad como fuente de energía alternativa. Hasta que los vehículos eléctricos puros no alcancen el nivel de prestaciones demandado actualmente por la sociedad su entrada en el mercado estará seriamente limitada.

17.9 Vehículos eléctricos híbridos

Los vehículos eléctricos híbridos tienen en el mercado precios superiores a los precios de sus equivalentes convencionales, aunque a cambio ofrecen un importante ahorro de combustible. En la mayoría de los países de la Unión

Europea, al igual que en muchos estados y ciudades de EE.UU., estos vehículos cuentan con subvenciones para su compra, por ejemplo en forma de reducciones en los impuestos. Actualmente en España están a la venta cuatro modelos diferentes de vehículos híbridos, y muchos fabricantes ya han anunciado la comercialización de vehículos de este tipo en los próximos años.

La gráfica siguiente muestra la evolución prevista del mercado de vehículos híbridos en Europa. Como puede observarse, se espera un crecimiento desde las aproximadamente 900 unidades que se vendieron en el año 2000 hasta alcanzarse unas 450.000 unidades en 2010.

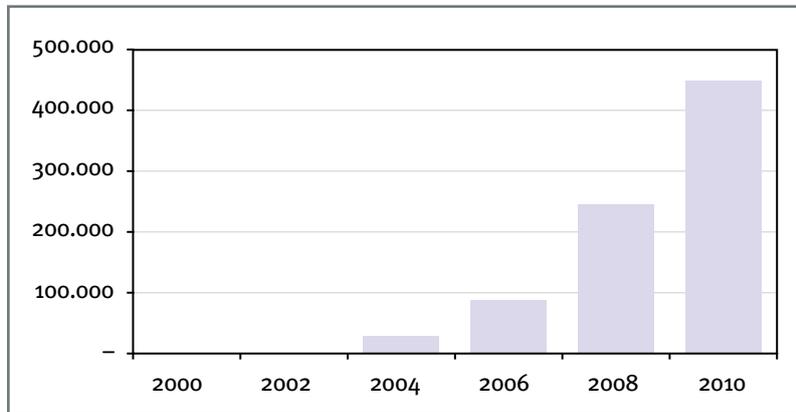


Figura 42. Estimación de las ventas de vehículos eléctricos híbridos en Europa en el periodo 2000-2010

Fuente: Frost and Sullivan

De acuerdo con la figura anterior, se prevé una penetración de los vehículos eléctricos híbridos en el mercado europeo de alrededor del 2,7% en el año 2010. Se estima que la mayor parte de ellos pertenecerán al grupo “mild hybrid” (2,1%) y que una pequeña parte serán “full hybrid” (0,6%). Para el periodo 2010-2015 se espera que la cuota de mercado se triplique a medida que se alcance un alto nivel de producción de este tipo de vehículos. Para 2015 se estima una tasa de penetración en el mercado del 8 al 10%, siendo la mayoría de los vehículos que se vendan dicho año del tipo “mild hybrid”.

17.10 Vehículos de pila de combustible

La viabilidad económica de los vehículos de pila de combustible impulsados por hidrógeno está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora de los sistemas de almacenamiento del hidrógeno en los vehículos, mejora de la funcionalidad y operatividad de la pila y, sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje. Por el momento existe un número muy limitado de estaciones de hidrógeno, y la mayoría de éstas son de carácter privado. En cualquier caso, muchos fabricantes de automóviles disponen ya de prototipos de vehículos de pila de combustible.

17.11 Vehículos con motores de combustión interna (MCI) impulsados por hidrógeno

Algunos fabricantes están apostando por los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno como primer paso para crear la demanda suficiente de este combustible que justifique el desarrollo de una mínima red de abastecimiento si bien, de momento, estos vehículos no compiten en prestaciones, potencia, autonomía y rendimiento al equivalente con combustible tradicional. En Europa, BMW ha anunciado recientemente la salida a la venta del primer vehículo de este tipo, junto con la puesta en marcha de tres estaciones de suministro de hidrógeno a finales del año 2007.



**Análisis prospectivo
a 2020 de las
nuevas tecnologías
de propulsión y de
los combustibles
alternativos
(Método Delphi)**

18 Definición de indicadores

A partir de toda la información recogida en las secciones anteriores, a continuación se presenta una serie de indicadores, considerados de relevancia, cuya evolución en los próximos años ayudará posteriormente a estimar la viabilidad futura y la ruta de entrada de los diferentes sistemas de propulsión y combustibles alternativos.

Los indicadores escogidos para este análisis se agrupan en seis bloques principales:

Bloque principal	Indicador
1 Recursos energéticos y materias primas	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de recursos y materias primas
2 Recursos tecnológicos y empresariales	<ul style="list-style-type: none"> • Grado de desarrollo tecnológico
3 Mercado	<ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura de abastecimiento de combustible • Modelos de vehículos disponibles con cada tecnología • Volumen de ventas • Coste global (coste del vehículo y del combustible)
4 Beneficios medioambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de gases de efecto invernadero • Emisiones de contaminantes locales
5 Beneficios energéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo energético
6 Aspectos sociopolíticos	<ul style="list-style-type: none"> • Compromiso político, marco legal y administrativo • Beneficios sociales, especialmente generación de empleo • Valoración por parte de los usuarios potenciales

Tabla 19. Indicadores escogidos para estimar la viabilidad futura y la ruta de entrada de los diferentes sistemas de propulsión y combustibles alternativos

Fuente: Elaboración propia

Una vez definida la lista anterior, el siguiente paso consiste en la estimación de cada indicador para cada uno de los nuevos sistemas de propulsión, combustibles alternativos o modificaciones en los motores convencionales actuales. A partir de dicha estimación se puede pronosticar un escenario probable en los próximos años (concretamente en 2010, en 2015 y en 2020) utilizando la siguiente metodología:

- Se valora la importancia de cada indicador desde el punto de vista de la introducción en el mercado de las nuevas tecnologías, los nuevos sistemas de propulsión y los combustibles alternativos.
- A continuación se pondera la contribución de cada uno de los indicadores en función del grado de penetración en el mercado de cada tecnología.
- Por último, se calcula para cada tecnología un indicador global en el año 2007 (año que representa la situación actual), en 2010, en 2015 y en 2020.

La contribución, o peso relativo, de los diferentes indicadores se ha calculado utilizando los siguientes factores de ponderación:

Indicador	Ponderación (1-10)	Ponderación (%)	Comentarios sobre la ponderación
Disponibilidad de recursos y materias primas	7	7,95	Es importante contar con los recursos y materias primas necesarios para los procesos de producción, y para reducir la dependencia del petróleo
Grado de desarrollo tecnológico	9	10,23	Para la apertura de mercados será necesario un soporte tecnológico en el caso de tecnologías poco desarrolladas y una importante inversión privada
Infraestructura de abastecimiento de combustible	10	11,36	Será fundamental considerar todas las herramientas necesarias para cubrir las necesidades de abastecimiento, suministro, mantenimiento...
Número de modelos disponibles con cada tecnología	5	5,68	El número de modelos disponibles puede conducir a una mayor aceptación social y, a su vez, a un mayor apoyo político
Volumen de ventas	5	5,68	Indicará el grado de aceptación social, aunque se trata de un indicador supeditado al grado de desarrollo tecnológico
Coste global (vehículo y combustible)	10	11,36	Fundamental para el desarrollo de las tecnologías, para la aceptación por parte de los fabricantes y para la aceptación social
Emisiones de gases de efecto invernadero	7	7,95	Es un punto importante debido a las nuevas normativas y a la actual preocupación por el cambio climático y el medioambiente
Emisiones de contaminantes locales	7	7,95	Es otro punto importante debido a las nuevas normativas y a la actual preocupación por el cambio climático y la salud
Consumo energético	8	9,01	Afecta a otros factores como la aceptación por parte de la sociedad y las administraciones
Compromiso político. Marco legal y administrativo	9	10,23	En un principio será fundamental contar con apoyo administrativo y con el adecuado marco legal y normativo europeo y español
Beneficios sociales. Empleo generado	5	5,68	Importante desde el punto de vista de la aceptación por parte de la sociedad y las administraciones
Valoración por parte del usuario potencial	6	6,82	El apoyo social puede facilitar cambios y actuaciones políticas

Tabla 20. Coeficientes de ponderación para cada tecnología o combustible alternativo

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior, los indicadores más importantes son el coste global (coste del vehículo sumado al coste del combustible) y la existencia de infraestructura de abastecimiento. Tras estos indicadores se sitúan el desarrollo tecnológico y el compromiso político, así como, y relacionado con éste último, el marco legal y administrativo. También se consideran indicadores importantes el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes locales, y la disponibilidad de recursos y materias primas, seguidos de la valoración por parte de los usuarios potenciales de la tecnología. Por otro lado, los indicadores que tendrán menos influencia, aunque todavía en estos casos se trate de una influencia significativa, serán el volumen de ventas en un momento determinado, el número de modelos disponibles con cada tecnología y los beneficios sociales. Estos beneficios pueden, a su vez, facilitar una mayor aceptación por parte de la sociedad y las administraciones.

A continuación, los indicadores son evaluados a través de una encuesta enviada a un grupo representativo de expertos procedentes de diversos colectivos vinculados al sector de la automoción en España. La lista de colectivos incluyó fabricantes y empresas de componentes del sector del automóvil, empresas y asociaciones del sector energético y de carburantes, empresas de ingeniería, centros tecnológicos, universidades y centros de investigación.

El grupo de expertos realizó una evaluación de cada uno de los indicadores anteriores para cada una de las tecnologías y combustibles considerados en este estudio:

- Encendido por compresión de carga homogénea (HCCI).
- Autoencendido controlado (CAI).
- Biodiésel.
- Bioetanol.
- Combustible “gas a líquido” (GTL).
- Combustible “biomasa a líquido” (BTL).
- Etanol lignocelulósico.
- Gas natural.
- Gas licuado del petróleo (GLP).
- Vehículos eléctricos.
- Vehículos híbridos.
- Vehículos de pila de combustible.
- Hidrógeno en motores de combustión interna (MCI).

Para obtener la valoración de cada indicador se ha utilizado el Método Delphi, ampliamente aceptado internacionalmente como vía para alcanzar consensos sobre predicciones futuras en grupos de expertos, como en este caso. La aplicación del método se ha hecho mediante correo electrónico, elaborando un cuestionario en el que se solicitaba a los expertos una evaluación de cada uno de los indicadores. Esta primera encuesta fue enviada a más de 40 expertos del sector, obteniéndose un total de 11 respuestas completadas.

Las respuestas fueron almacenadas en una base de datos y analizadas buscando puntos comunes y valores medios de las respuestas. Tras el primer análisis se realizó un segundo cuestionario en el que se ofrecía a los expertos la posibilidad de reposicionarse en base a las respuestas del grupo, y de proponer un valor final que considerasen correcto. A los expertos se les solicitó que justificaran su posicionamiento.

La siguiente figura representa el método descrito:

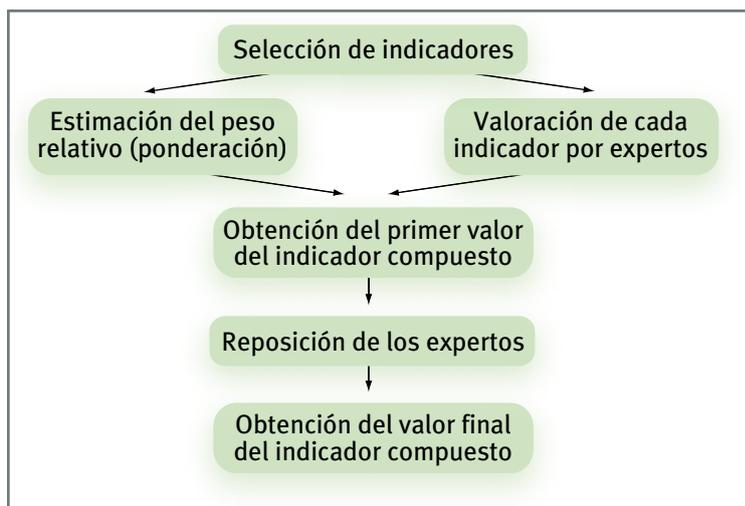


Figura 43. Esquema del método seguido para el cálculo de los indicadores de cada tecnología o combustible

Fuente: Elaboración propia

Toda esta información se muestra a continuación en forma de tablas de forma resumida. La información será utilizada más adelante como base para proponer una ruta temporal probable de entrada de las nuevas tecnologías y combustibles alternativos.

18.1 Recursos energéticos y materias primas

Disponibilidad de recursos energéticos y materias primas

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	4,00	3,83	3,67	3,67
CAI	3,80	3,80	3,60	3,60
Biodiésel	2,50	3,50	3,88	4,38
Bioetanol	2,38	3,38	3,88	4,25
GTL	3,43	3,57	3,86	3,57
BTL	2,14	2,43	3,14	3,57
Etanol lignocelulósico	1,67	2,17	3,83	4,17
Gas natural	4,57	4,57	4,43	4,00
GLP	4,14	4,00	3,86	3,71
Vehículos eléctricos	3,29	3,57	4,00	4,29
Vehículos híbridos	3,43	3,43	3,71	3,86
Pila de combustible	2,00	2,56	3,11	4,00
Hidrógeno en MCI	2,33	2,67	3,33	3,78

Tabla 21. Disponibilidad de recursos energéticos y materias primas

Fuente. Elaboración propia

Legenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta.

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- Para algunos expertos del sector, la disponibilidad de biodiésel y bioetanol debería ser ya a partir de 2010 cuanto menos alta (el indicador correspondiente debería ser a partir de dicha fecha mayor que 4).
- Algunos expertos afirman que para 2020 los precios del crudo serán muy elevados y su disponibilidad será cada vez menor, y predicen una tendencia descendente en el valor de este indicador en el caso de los desarrollos HCCI, CAI y de los vehículos híbridos. Las previsiones son similares, según los mismos expertos, en el caso del GLP.
- Por otro lado, la evolución de la disponibilidad de las tecnologías de pila de combustible y de hidrógeno en motores de combustión interna debería ir pareja, al utilizarse como combustible el hidrógeno en ambos casos. Aunque es cierto que se prevén desarrollos de pila de combustible con otros combustibles distintos al hidrógeno, este último representa por el momento el combustible que más peso tiene de cara al futuro.
- Además, algunos expertos coinciden en que la disponibilidad actual y a corto plazo del hidrógeno es incluso más baja de lo que los valores mostrados en la tabla anterior podrían hacer pensar. Según estos expertos, las estimaciones para 2020 también podrían ser demasiado optimistas.

18.2 Recursos tecnológicos y empresariales

Grado de desarrollo tecnológico

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	2,17	2,67	3,50	4,00
CAI	2,20	2,80	3,40	3,60
Biodiésel	3,25	3,50	4,38	4,75
Bioetanol	3,25	3,63	4,50	5,00
GTL	2,29	2,86	3,86	4,29
BTL	2,00	2,50	3,25	3,88
Etanol lignocelulósico	1,83	2,50	3,67	4,17
Gas natural	3,86	4,14	4,71	4,75
GLP	3,14	3,71	4,71	4,71
Vehículos eléctricos	2,50	2,88	3,75	4,50
Vehículos híbridos	3,00	3,75	4,50	4,88
Pila de combustible	1,67	2,33	3,22	4,00
Hidrógeno en MCI	2,38	3,00	3,75	4,38

Tabla 22. Grado de desarrollo tecnológico

Fuente. Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy bajo. 2 Bajo. 3 Medio. 4 Alto. 5 Muy alto

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- De acuerdo con algunos expertos el grado de desarrollo tecnológico de los vehículos eléctricos podría ser mayor que el reflejado por el valor del indicador mostrado en la tabla anterior. Estos expertos consideran que actualmente los vehículos eléctricos cuentan con una tecnología que ya está muy desarrollada (grado de desarrollo alto) y que actualmente se trabaja fundamentalmente en su optimización. El principal reto tecnológico que afrontan estos vehículos reside en el desarrollo de baterías más ligeras y con mayor capacidad de almacenamiento.
- De forma análoga, ciertos expertos estiman que el grado de desarrollo tecnológico actual es ya alto para el biodiésel, el bioetanol, los vehículos híbridos y la utilización del hidrógeno en motores de combustión interna (MCI). En este último caso, se requieren pocas modificaciones técnicas en los motores, aunque es cierto que la experiencia con este tipo de motores aún es escasa. En el caso de los MCI alimentados con hidrógeno las mayores dificultades se encuentran no ya en la adaptación del motor, sino en el sistema de almacenamiento del hidrógeno a bordo del vehículo.
- También se apunta desde algunas fuentes que el etanol lignocelulósico tendrá un grado de desarrollo medio ya a partir de 2010.

18.3 Mercado

Infraestructura de abastecimiento de combustible

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	4,33	4,67	4,67	4,83
CAI	4,20	4,60	4,60	4,80
Biodiésel	3,00	3,75	4,38	4,63
Bioetanol	2,13	3,00	3,63	4,00
GTL	2,00	2,57	3,14	3,57
BTL	1,50	1,88	3,38	3,75
Etanol lignocelulósico	1,33	1,67	3,33	4,00
Gas natural	3,00	3,57	3,86	4,14
GLP	2,57	3,00	3,57	3,71
Vehículos eléctricos	1,88	2,25	2,50	2,75
Vehículos híbridos	3,50	4,13	4,38	4,50
Pila de combustible	1,33	1,67	2,11	2,89
Hidrógeno en MCI	1,44	1,78	2,33	3,11

Tabla 23. Infraestructura de abastecimiento de combustible

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy poco desarrollada. 2 Poco desarrollada. 3 Desarrollo medio. 4 Bastante desarrollada.
5 Muy desarrollada

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- Los motores de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI), de autoencendido controlado (CAI) y los vehículos híbridos pueden utilizar la infraestructura de abastecimiento existente actualmente, puesto que todos estos vehículos normalmente funcionan con combustibles convencionales. Por ello, los valores de este indicador en estos casos deberían ser similares: infraestructura de abastecimiento muy desarrollada.
- Análogamente, la valoración de la infraestructura de abastecimiento de combustible para vehículos de pila de combustible y para vehículos con motor de combustión interna que funcionen con hidrógeno debería ser la misma. En este caso, y como reflejan los valores correspondientes, la infraestructura de abastecimiento de hidrógeno aún tiene que desarrollarse fuertemente en los próximos años.
- Por otro lado, algunos expertos consideran que la infraestructura actual de abastecimiento de bioetanol está muy poco desarrollada, al existir en el momento de la encuesta en España, y según estas fuentes, sólo una estación de servicio que dispense este combustible. En cambio, otras fuentes destacan que el biodiésel, el bioetanol y el etanol lignocelulósico pueden utilizar las infraestructuras actuales, por lo que según estas fuentes el valor del indicador debería ser “muy desarrollado” en todos estos casos.

Número de modelos de vehículos disponibles con cada tecnología

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	1,50	1,83	2,83	3,17
CAI	1,40	1,60	2,60	2,60
Biodiésel	2,75	3,38	4,13	4,38
Bioetanol	2,63	3,25	4,00	4,38
GTL	1,57	2,00	3,00	3,29
BTL	1,57	2,00	2,86	3,29
Etanol lignocelulósico	1,50	1,67	3,33	3,83
Gas natural	2,71	3,14	3,57	4,14
GLP	2,29	2,57	3,14	3,14
Vehículos eléctricos	1,75	2,25	2,88	3,38
Vehículos híbridos	2,25	2,88	3,63	4,25
Pila de combustible	1,22	1,67	2,11	2,78
Hidrógeno en MCI	1,22	1,89	2,11	2,67

Tabla 24. Número de modelos de vehículos disponibles con cada tecnología

Fuente: Elaboración propia

Legenda: 1 Número muy bajo. 2 Número bajo. 3 Número medio. 4 Número alto. 5 Número muy alto

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- Algunos expertos señalan que la tecnología de los vehículos es la misma tanto en el caso del bioetanol como en el caso del etanol lignocelulósico, por lo que los valores del indicador relativo al número de modelos de vehículos disponibles para ambos combustibles deberían ser similares.
- Además, según algunas fuentes, el número de modelos disponibles para el biodiésel debería ser en estos momentos alto o muy alto, ya que los actuales vehículos diésel pueden funcionar también con mezclas de biodiésel. En cualquier caso, conviene recordar que son mayoría los fabricantes de automóviles que no garantizan sus vehículos para mezclas superiores al 5% de biodiésel, y que sólo algunas marcas elevan esta cifra hasta el 30%.
- También se considera que el número de modelos disponibles en este momento debería ser alto o muy alto para el bioetanol y el etanol lignocelulósico, ya que los actuales vehículos convencionales de gasolina pueden funcionar con mezclas (gasolina mezclada con etanol y gasolina mezclada con el aditivo ETBE) de hasta el 10 ó el 15%. En Europa y en España se pueden poner a la venta mezclas de hasta el 5% de etanol como si se tratara de gasolina convencional y sin que sea necesario advertir de ello a los clientes (en EE.UU. este porcentaje llega al 10%). Sin embargo, en España, la mayor parte del bioetanol que se consume se utiliza en forma de aditivo ETBE. Los vehículos de combustible flexible (en inglés, Flexible Fuel Vehicle - FFV) pueden funcionar con mezclas de etanol y gasolina de hasta el 85% (combustible conocido como E85).

Volumen de ventas de cada tecnología o combustible alternativo

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	1,67	1,75	2,20	3,00
CAI	2,00	1,67	2,00	2,33
Biodiésel	1,86	2,71	3,57	3,86
Bioetanol	1,57	2,57	3,14	3,57
GTL	1,50	1,75	2,33	2,67
BTL	1,50	2,00	2,29	3,00
Etanol lignocelulósico	1,67	2,00	2,33	3,00
Gas natural	2,25	2,50	3,17	3,50
GLP	2,14	2,00	2,17	2,67
Vehículos eléctricos	1,50	1,75	2,13	2,43
Vehículos híbridos	1,75	2,13	3,00	3,71
Pila de combustible	1,33	1,29	1,67	2,50
Hidrógeno en MCI	1,33	1,57	1,78	2,50

Tabla 25. Volumen de ventas de cada tecnología o combustible alternativo

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy bajo. 2 Bajo. 3 Medio. 4 Alto. 5 Muy alto

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- Según algunas fuentes, los valores del indicador correspondiente al volumen de ventas en la actualidad de vehículos con motores de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y de autoencendido controlado (CAI) deberían ser más bajos que los mostrados en la tabla anterior. Según estas fuentes, probablemente dichos valores aumenten en los próximos años a medida que se desarrollen estas tecnologías.
- Algo similar ocurriría con las ventas de vehículos de pila de combustible, ya que en este caso aún se está investigando a nivel de primeros prototipos de demostración. Estos prototipos, evidentemente, aún no se encuentran a la venta.

Coste global de la tecnología (coste del vehículo más coste del combustible)

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	2,67	3,33	3,67	3,83
CAI	2,50	3,00	3,25	3,50
Biodiésel	3,57	4,00	4,14	4,14
Bioetanol	3,43	3,86	4,14	4,14
GTL	2,75	2,17	2,83	3,33
BTL	2,50	2,00	2,83	3,50
Etanol lignocelulósico	2,75	2,75	3,00	3,17
Gas natural	3,4	3,83	4,00	4,17
GLP	3,33	3,50	3,83	4,00
Vehículos eléctricos	2,43	2,57	3,14	3,29
Vehículos híbridos	2,57	3,14	3,79	4,00
Pila de combustible	1,13	1,38	1,75	2,50
Hidrógeno en MCI	1,63	1,88	2,25	2,88

Tabla 26. Coste global de la tecnología (coste total del vehículo más coste y del consumo de combustible)

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Excesivo. 2 Muy elevado. 3 Elevado. 4 Normal. 5 Bajo

No ha habido grandes discrepancias en la evaluación de este indicador. El coste global está relacionado con los costes de fabricación y los costes de utilización de los vehículos, por un lado, y con los costes de producción y distribución de los combustibles, por otro. Esta distinción entre en los costes hace que sea posible la valoración de este indicador también en los casos en los que la tecnología aún no se encuentre a la venta.

18.4 Beneficios medioambientales

Emisiones de gases de efecto invernadero

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	3,00	3,00	3,20	3,20
CAI	2,40	2,50	2,75	2,75
Biodiésel	3,63	3,57	3,71	3,71
Bioetanol	3,63	3,57	3,71	3,71
GTL	2,86	3,17	3,17	3,17
BTL	3,57	3,67	3,67	3,67
Etanol lignocelulósico	3,00	3,00	3,83	4,00
Gas natural	2,57	2,67	2,83	3,00
GLP	2,43	2,67	2,67	2,67
Vehículos eléctricos	3,25	3,57	3,86	4,14
Vehículos híbridos	3,38	3,43	3,43	3,43
Pila de combustible	3,63	4,00	4,14	4,43
Hidrógeno en MCI	3,00	3,14	3,43	3,71

Tabla 27. Emisiones de gases de efecto invernadero

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy altas. 2 Altas. 3 Medias. 4 Bajas. 5 Muy bajas

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- El principal gas de efecto invernadero emitido por el sector del transporte es el CO₂. En el caso del gas natural también se deberían considerar las emisiones a la atmósfera de gas metano, por ser también éste un gas de efecto invernadero.
- En general, las emisiones de CO₂ dependen de la cantidad de combustible consumido, ya que dicho gas es un producto directo de las reacciones de combustión de los hidrocarburos. Esto es válido en el caso de los motores con encendido por compresión de carga homogéneos (HCCI) y con autoencendido controlado (CAI), en el caso de los vehículos híbridos que utilizan combustibles tradicionales (gasolina o diésel), y en el caso de los vehículos que utilizan gas natural, gas licuado del petróleo (GLP) o combustible “gas líquido” (GTL).
- En todos los casos citados en el punto anterior, las emisiones de CO₂ serán menores cuanto mayor sea el rendimiento de los motores (ya que a mayor rendimiento, menor consumo de combustible). Las emisiones de CO₂ también dependen de la densidad energética del combustible: a mayor densidad energética, menor consumo de combustible y menores emisiones de CO₂.

- Los biocarburantes (biodiésel, bioetanol, etanol lignocelulósico y “biomasa a líquido”, o BTL) también producen emisiones de CO₂ durante su combustión, igual que en los casos anteriores. Sin embargo, cuando se analiza el ciclo completo de los biocombustibles se debe tener en cuenta que el CO₂ emitido durante su combustión ha sido previamente absorbido por las plantas utilizadas para la obtención del combustible. Debido a ello, algunas fuentes indican que los valores de este indicador en el caso de los biocarburantes deberían estar por encima de 4, ya que en el análisis de ciclo completo las emisiones de CO₂ resultan ser sensiblemente inferiores a las emisiones de los carburantes actuales fósiles.
- En el caso de los vehículos eléctricos, de los vehículos de pila de combustible y de los automóviles con motores de combustión interna que funcionan con hidrógeno no se emite CO₂ en el punto de uso, pero pueden producirse emisiones de este gas de efecto invernadero durante la producción de la electricidad o del hidrógeno cuando la fuente utilizada para generar dichos vectores energéticos no sea renovable. Por ello, la valoración de las emisiones de gases de efecto invernadero en estos tres casos debería tener en cuenta la fuente de energía utilizada para la generación de la electricidad o del hidrógeno.

Emisiones de contaminantes locales

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	2,60	2,60	3,00	3,00
CAI	2,25	2,25	2,80	2,50
Biodiésel	3,22	3,22	3,33	3,33
Bioetanol	3,25	3,25	3,25	3,25
GTL	2,83	3,00	3,17	3,17
BTL	3,00	3,33	3,33	3,33
Etanol lignocelulósico	2,33	2,50	3,17	3,17
Gas natural	2,86	3,00	3,00	3,14
GLP	2,57	2,71	2,71	2,71
Vehículos eléctricos	4,56	4,56	4,67	4,67
Vehículos híbridos	3,44	3,56	3,67	3,67
Pila de combustible	4,00	4,00	4,67	4,67
Hidrógeno en MCI	3,22	3,13	3,88	4,00

Tabla 28. Emisiones de contaminantes locales

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy altas. 2 Altas. 3 Medias. 4 Bajas. 5 Muy bajas

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- Los contaminantes locales que se consideran habitualmente son: los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos sin quemar (HC) y las partículas en suspensión (PM). También es preciso considerar en las valoraciones otros contaminantes como los óxidos de azufre o los compuestos aromáticos.
- En general, la mayoría de las nuevas tecnologías de propulsión alternativas producen menos emisiones que los combustibles convencionales. Sin embargo, en algunos casos ciertas emisiones contaminantes pueden aumentar.
- En concreto, algunos expertos defienden que en el caso del biodiésel, el bioetanol y el etanol lignocelulósico la valoración del indicador de emisiones locales debería ser más positiva, ya que son múltiples los estudios que han demostrado con claridad la importante reducción de contaminantes locales que puede derivarse de su uso.
- Las emisiones de contaminantes en el punto de uso de los vehículos eléctricos y de los vehículos de pila de combustible son nulas, por lo que deberían calificarse como “muy bajas” (valores cercanos a 5 en la tabla anterior).
- Para el caso de hidrógeno utilizado en motores de combustión interna (MCI), se pueden producir algunas emisiones de NO_x debido a las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso de combustión, si bien el resto de emisiones son prácticamente nulas. En este caso, es el propio nitrógeno contenido en el aire el precursor de las emisiones de NO_x.

18.5 Beneficios energéticos

Consumo energético total

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	3,25	2,75	2,80	3,00
CAI	3,33	2,67	2,75	3,00
Biodiésel	3,00	3,14	3,00	3,00
Bioetanol	2,88	2,86	2,71	2,86
GTL	2,75	2,75	2,83	2,83
BTL	2,75	2,75	3,17	3,17
Etanol lignocelulósico	1,75	1,75	3,00	3,33
Gas natural	2,86	3,00	2,83	2,67
GLP	2,29	2,33	2,17	2,00
Vehículos eléctricos	2,71	3,00	3,33	3,67
Vehículos híbridos	3,14	3,00	3,33	3,50
Pila de combustible	2,67	2,86	3,57	4,14
Hidrógeno en MCI	2,33	2,43	3,00	3,29

Tabla 29. Consumo energético total

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy alto. 2 Alto. 3 Medio. 4 Bajo. 5 Muy bajo

En general no se aprecian grandes diferencias entre los valores obtenidos para este indicador. En cualquier caso, al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunos comentarios particulares concretos realizados por los expertos:

- Los vehículos eléctricos y de pila de combustible tienen un menor consumo energético al no estar limitados por el bajo rendimiento energético característico de los motores de combustión.
- Los vehículos híbridos recuperan parte de la energía cinética durante las frenadas y, gracias a ello, mejoran el rendimiento de los vehículos convencionales.
- Para valorar el consumo energético total de cada uno de los combustibles analizados debería tenerse en cuenta tanto la energía obtenida del combustible como la energía que ha sido necesaria para su producción, distribución, etc.

18.6 Aspectos sociopolíticos

Compromiso político, marco legal y administrativo

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	2,60	2,80	2,40	2,20
CAI	3,00	3,25	2,75	2,50
Biodiésel	4,00	4,29	4,14	3,86
Bioetanol	3,86	4,29	4,14	3,86
GTL	2,83	3,17	3,50	3,33
BTL	3,50	3,67	4,17	4,00
Etanol lignocelulósico	3,67	4,00	4,33	4,17
Gas natural	3,17	3,33	3,50	3,50
GLP	2,50	2,50	2,33	2,17
Vehículos eléctricos	3,57	3,71	4,17	4,33
Vehículos híbridos	3,71	4,00	4,33	4,00
Pila de combustible	3,63	3,88	4,29	4,71
Hidrógeno en MCI	3,25	3,63	4,14	4,43

Tabla 30. Compromiso político, marco legal y administrativo

Fuente: Elaboración propia

Legenda: 1 Sin promoción. 2 Poca promoción. 3 Promoción media. 4 Promoción alta. 5 Promoción muy alta

En general, y al igual que en el caso del indicador anterior, no se han encontrado grandes discrepancias en la evaluación de este indicador. De todos modos, al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por los expertos:

- De acuerdo con los valores mostrados en la tabla anterior puede concluirse que las tecnologías alternativas que disfrutarán en el futuro de una mayor promoción por parte de las administraciones públicas son los combustibles obtenidos de fuentes renovables (biocarburantes como el biodiésel, el bioetanol, el etanol lignocelulósico, o el combustible “biomasa a líquido” o BTL). También se promocionarán los vehículos que funcionen con hidrógeno, especialmente aquellos impulsados por pilas de combustible, los vehículos eléctricos y los vehículos híbridos.
- Los combustibles fósiles se beneficiarán en mucha menor medida del apoyo y promoción por parte de las administraciones públicas. De ellos, el que lo merecerá en mayor grado será el gas natural, seguido del combustible “gas a líquido” (GTL) y, por último, del gas licuado del petróleo (GLP).
- No se pronostica ningún apoyo significativo de las administraciones públicas a los desarrollos de las tecnologías de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y de auto-encendido controlado (CAI).

Beneficios sociales, incluida la generación de empleo

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	2,20	2,00	2,40	2,00
CAI	2,50	2,00	2,25	2,00
Biodiésel	3,57	4,00	4,14	4,00
Bioetanol	3,57	4,00	4,14	4,00
GTL	1,83	2,00	2,33	2,17
BTL	2,14	2,43	3,86	3,86
Etanol lignocelulósico	2,50	2,67	4,17	4,33
Gas natural	1,50	1,83	2,00	1,83
GLP	1,50	1,67	1,83	1,67
Vehículos eléctricos	2,50	2,50	3,00	3,50
Vehículos híbridos	3,00	3,33	3,50	3,83
Pila de combustible	2,57	2,71	3,43	4,00
Hidrógeno en MCI	2,86	3,14	3,71	4,00

Tabla 31. Beneficios sociales, incluida la generación de empleo

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy bajo. 2 Bajo. 3 Medio. 4 Alto. 5 Muy alto

En general, tampoco en esta ocasión ha habido grandes discrepancias en la evaluación de este indicador. Pero, al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunas matizaciones o comentarios particulares realizados por uno de los expertos:

- La generación de empleo puede producirse en algunos casos durante la fase de fabricación en serie de los nuevos sistemas de propulsión o combustibles alternativos y, en otros casos, durante su fase de investigación y desarrollo. La fase concreta en la que se podría producir dicha generación de empleo dependerá del grado de desarrollo de cada tecnología.

Valoración por parte de los usuarios potenciales

	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
HCCI	3,33	3,00	3,20	2,80
CAI	3,00	2,75	3,25	3,00
Biodiésel	3,29	3,57	3,86	3,71
Bioetanol	3,29	3,57	3,71	3,57
GTL	2,50	3,00	3,00	3,00
BTL	2,75	3,25	3,50	3,83
Etanol lignocelulósico	3,50	4,00	4,00	4,33
Gas natural	2,83	3,17	3,17	3,00
GLP	2,75	2,50	2,67	2,67
Vehículos eléctricos	3,33	3,33	3,33	3,83
Vehículos híbridos	4,17	4,17	4,33	4,17
Pila de combustible	3,00	3,57	4,14	4,86
Hidrógeno en MCI	3,00	3,57	4,00	4,29

Tabla 32. Valoración por parte de los usuarios potenciales

Fuente: Elaboración propia

Legenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

Al margen de los valores medios mostrados en la tabla anterior, a continuación se reproducen algunos comentarios particulares realizados por los expertos:

- Algunos expertos predicen que la valoración de los usuarios tenderá a la baja tanto para los motores con encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) como para los motores con auto-encendido controlado (CAI). También, estos expertos opinan que paulatinamente mejorará la valoración de otras alternativas más respetuosas con el medio ambiente.
- Otros expertos consideran que la valoración por parte de los vehículos eléctricos se deteriorará a largo plazo, al mismo tiempo que mejorará la valoración de los vehículos de pila de combustible. Este último tipo de vehículos ofrece también emisiones nulas pero, además, cuenta con la ventaja de disponer de mayor autonomía. Aunque, en última instancia, todo ello dependerá del grado de desarrollo alcanzado por las baterías eléctricas.
- Algunos expertos asignan a los biocarburantes una valoración más alta que la acordada por el grupo en su conjunto reflejada en la tabla anterior.

19 Indicador global de viabilidad futura para cada tecnología y combustible

A continuación se calculará el índice global correspondiente a cada tecnología o combustible. Para ello se ha partido de los valores asignados por el grupo de expertos a cada indicador y, a los que continuación, se han aplicado los coeficientes de ponderación descritos en el apartado de la sección anterior.

19.1 Encendido por compresión de carga homogénea (HCCI)

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	4	3,83	3,67	3,67
Grado de desarrollo tecnológico	2,17	2,67	3,5	4
Infraestructura de abastecimiento	4,33	4,67	4,67	4,83
Modelos disponibles con cada tecnología	1,5	1,83	2,83	3,17
Ventas de vehículos	1,67	1,75	2,2	3
Coste global (vehículo + combustible)	2,67	3,33	3,67	3,83
Emisiones de gases de efecto invernadero	3	3	3,2	3,2
Emisiones de contaminantes locales	2,6	2,6	3	3
Consumo energético	3,25	2,75	2,8	3
Compromiso político, marco legal y administrativo	2,6	2,8	2,4	2,2
Beneficios sociales (empleo generado)	2,2	2	2,4	2
Valoración de los usuarios potenciales	3,33	3	3,2	2,8
Indicador global de viabilidad futura	2,87	2,99	3,23	3,33

Tabla 33. Resumen de los indicadores correspondientes al encendido por compresión de carga homogénea (HCCI)

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.2 Auto-encendido controlado (CAI)

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	3,8	3,8	3,6	3,6
Grado de desarrollo tecnológico	2,2	2,8	3,4	3,6
Infraestructura	4,2	4,6	4,6	4,8
Modelos disponibles con tecnología	1,4	1,6	2,6	2,6
Ventas de vehículos	2	1,67	2	2,33

(continuación)

	2007	2010	2015	2020
Coste global (vehículo + combustible)	2,5	3	3,25	3,5
Emisiones de gases de efecto invernadero	2,4	2,5	2,75	2,75
Emisiones de contaminantes locales	2,25	2,25	2,8	2,5
Consumo energético	3,33	2,67	2,75	3
Compromiso político, marco legal y administrativo	3	3,25	2,75	2,5
Beneficios sociales (empleo generado)	2,5	2	2,25	2
Valoración del usuario potencial	3	2,75	3,25	3
Indicador global de viabilidad futura	2,80	2,89	3,11	3,14

Tabla 34. Resumen de los indicadores correspondientes para el autoencendido controlado (CAI)

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.3 Biodiésel

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	2,5	3,5	3,88	4,38
Grado de desarrollo tecnológico	3,25	3,5	4,38	4,75
Infraestructura	3	3,75	4,38	4,63
Modelos disponibles con tecnología	2,75	3,38	4,13	4,38
Ventas de vehículos	1,86	2,71	3,57	3,86
Coste global (vehículo + combustible)	3,57	4	4,14	4,14
Emisiones de gases de efecto invernadero	3,63	3,57	3,71	3,71
Emisiones de contaminantes locales	3,22	3,22	3,33	3,33
Consumo energético	3	3,14	3	3
Compromiso político, marco legal y administrativo	4	4,29	4,14	3,86
Beneficios sociales (empleo generado)	3,57	4	4,14	4
Valoración del usuario potencial	3,29	3,57	3,86	3,71
Indicador global de viabilidad futura	3,19	3,59	3,91	4,00

Tabla 35. Resumen de los indicadores correspondientes para el biodiésel

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.4 Bioetanol

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	2,38	3,38	3,88	4,25
Grado de desarrollo tecnológico	3,25	3,63	4,5	5
Infraestructura	2,13	3	3,63	4
Modelos disponibles con tecnología	2,63	3,25	4	4,38
Ventas de vehículos	1,57	2,57	3,14	3,57
Coste global (vehículo + combustible)	3,43	3,86	4,14	4,14
Emisiones de gases de efecto invernadero	3,63	3,57	3,71	3,71
Emisiones de contaminantes locales	3,25	3,25	3,25	3,25
Consumo energético	2,88	2,86	2,71	2,86
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,86	4,29	4,14	3,86
Beneficios sociales (empleo generado)	3,57	4	4,14	4
Valoración del usuario potencial	3,29	3,57	3,71	3,57
Indicador global de viabilidad futura	3,02	3,46	3,77	3,90

Tabla 36. Resumen de los indicadores correspondientes para el bioetanol

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.5 Combustible sintético “gas a líquido” (GTL)

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	3,43	3,57	3,86	3,57
Grado de desarrollo tecnológico	2,29	2,86	3,86	4,29
Infraestructura	2	2,57	3,14	3,57
Modelos disponibles con tecnología	1,57	2	3	3,29
Ventas de vehículos	1,5	1,75	2,33	2,67
Coste global (vehículo + combustible)	2,75	2,17	2,83	3,33
Emisiones de gases de efecto invernadero	2,86	3,17	3,17	3,17

(continuación)

	2007	2010	2015	2020
Emisiones de contaminantes locales	2,83	3	3,17	3,17
Consumo energético	2,75	2,75	2,83	2,83
Compromiso político, marco legal y administrativo	2,83	3,17	3,5	3,33
Beneficios sociales (empleo generado)	1,83	2	2,33	2,17
Valoración del usuario potencial	2,5	3	3	3
Indicador global de viabilidad futura	2,49	2,71	3,14	3,27

Tabla 37. Resumen de los indicadores correspondientes para el combustible sintético “gas a líquido” (GTL)

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.6 Combustible sintético “biomasa a líquido” (BTL)

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	2,14	2,43	3,14	3,57
Grado de desarrollo tecnológico	2	2,5	3,25	3,88
Infraestructura	1,5	1,88	3,38	3,75
Modelos disponibles con tecnología	1,57	2	2,86	3,29
Ventas de vehículos	1,5	2	2,29	3
Coste global (vehículo + combustible)	2,5	2	2,83	3,5
Emisiones de gases de efecto invernadero	3,57	3,67	3,67	3,67
Emisiones de contaminantes locales	3	3,33	3,33	3,33
Consumo energético	2,75	2,75	3,17	3,17
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,5	3,67	4,17	4
Beneficios sociales (empleo generado)	2,14	2,43	3,86	3,86
Valoración del usuario potencial	2,75	3,25	3,5	3,83
Indicador global de viabilidad futura	2,44	2,66	3,31	3,59

Tabla 38. Resumen de los indicadores correspondientes para el combustible sintético “biomasa a líquido” (BTL)

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.7 Etanol lignocelulósico

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	1,67	2,17	3,83	4,17
Grado de desarrollo tecnológico	1,83	2,5	3,67	4,17
Infraestructura	1,33	1,67	3,33	4
Modelos disponibles con tecnología	1,5	1,67	3,33	3,83
Ventas de vehículos	1,67	2	2,33	3
Coste global (vehículo + combustible)	2,75	2,75	3	3,17
Emisiones de gases de efecto invernadero	3	3	3,83	4
Emisiones de contaminantes locales	2,33	2,5	3,17	3,17
Consumo energético	1,75	1,75	3	3,33
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,67	4	4,33	4,17
Beneficios sociales (empleo generado)	2,5	2,67	4,17	4,33
Valoración del usuario potencial	3,5	4	4	4,33
Indicador global de viabilidad futura	2,30	2,57	3,50	3,80

Tabla 39. Resumen de los indicadores correspondientes para el etanol lignocelulósico

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.8 Gas natural

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	4,57	4,57	4,43	4
Grado de desarrollo tecnológico	3,86	4,14	4,71	4,71
Infraestructura	3	3,57	3,86	4,14
Modelos disponibles con tecnología	2,71	3,14	3,57	4,14
Ventas de vehículos	2,14	2,5	3,17	3,5
Coste global (vehículo + combustible)	3,67	3,83	4	4,17
Emisiones de gases de efecto invernadero	2,43	2,67	2,83	3
Emisiones de contaminantes locales	2,86	3	3	3,14

(continuación)

	2007	2010	2015	2020
Consumo energético	2,86	3	2,83	2,67
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,17	3,33	3,5	3,5
Beneficios sociales (empleo generado)	1,5	1,83	2	1,83
Valoración del usuario potencial	2,83	3,17	3,17	3
Indicador global de viabilidad futura	3,07	3,33	3,52	3,57

Tabla 40. Resumen de los indicadores correspondientes para el gas natural

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.9 Gas licuado del petróleo (GLP)

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	4,14	4	3,86	3,71
Grado de desarrollo tecnológico	3,14	3,71	4,71	4,86
Infraestructura	2,57	3	3,57	3,71
Modelos disponibles con tecnología	2,29	2,57	3,14	3,14
Ventas de vehículos	2,25	2	2,17	2,67
Coste global (vehículo + combustible)	3,33	3,5	3,83	4
Emisiones de gases de efecto invernadero	2,57	2,67	2,67	2,67
Emisiones de contaminantes locales	2,57	2,71	2,71	2,71
Consumo energético	2,29	2,33	2,17	2
Compromiso político, marco legal y administrativo	2,5	2,5	2,33	2,17
Beneficios sociales (empleo generado)	1,5	1,67	1,83	1,67
Valoración del usuario potencial	2,75	2,5	2,67	2,67
Indicador global de viabilidad futura	2,72	2,85	3,08	3,10

Tabla 41. Resumen de los indicadores correspondientes para el gas licuado del petróleo (GLP)

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.10 Vehículos eléctricos

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	3,29	3,57	4	4,29
Grado de desarrollo tecnológico	2,5	2,88	3,75	4,5
Infraestructura	1,88	2,25	2,5	2,75
Modelos disponibles con tecnología	1,75	2,25	2,88	3,38
Ventas de vehículos	1,5	1,75	2,13	2,43
Coste global (vehículo + combustible)	2,43	2,57	3,14	3,29
Emisiones de gases de efecto invernadero	3,25	3,57	3,86	4,14
Emisiones de contaminantes locales	4,56	4,56	4,67	4,67
Consumo energético	2,71	3	3,33	3,67
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,57	3,71	4,17	4,33
Beneficios sociales (empleo generado)	2,5	2,5	3	3,5
Valoración del usuario potencial	3,33	3,33	3,33	3,83
Indicador global de viabilidad futura	2,79	3,02	3,43	3,75

Tabla 42. Resumen de los indicadores correspondientes para los vehículos eléctricos

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.11 Vehículos híbridos

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	3,43	3,43	3,71	3,86
Grado de desarrollo tecnológico	3	3,75	4,5	4,88
Infraestructura	3,5	4,13	4,38	4,5
Modelos disponibles con tecnología	2,25	2,88	3,63	4,25
Ventas de vehículos	1,75	2,13	3	3,71
Coste global (vehículo + combustible)	2,57	3,14	3,79	4
Emisiones de gases de efecto invernadero	3,38	3,43	3,43	3,43

(continuación)

	2007	2010	2015	2020
Emisiones de contaminantes locales	3,44	3,56	3,67	3,67
Consumo energético	3,14	3	3,33	3,5
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,71	4	4,33	4
Beneficios sociales (empleo generado)	3	3,33	3,5	3,83
Valoración del usuario potencial	4,17	4,17	4,33	4,17
Indicador global de viabilidad futura	3,16	3,48	3,86	4,01

Tabla 43. Resumen de los indicadores correspondientes para los vehículos híbridos

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.12 Vehículos impulsados por pila de combustible

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	2	2,56	3,11	4
Grado de desarrollo tecnológico	1,67	2,33	3,22	4
Infraestructura	1,33	1,67	2,11	2,89
Modelos disponibles con tecnología	1,22	1,67	2,11	2,78
Ventas de vehículos	1,33	1,29	1,67	2,5
Coste global (vehículo + combustible)	1,13	1,38	1,75	2,5
Emisiones de gases de efecto invernadero	3,63	4	4,14	4,43
Emisiones de contaminantes locales	4	4	4,67	4,67
Consumo energético	2,67	2,86	3,57	4,14
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,63	3,88	4,29	4,71
Beneficios sociales (empleo generado)	2,57	2,71	3,43	4
Valoración del usuario potencial	3	3,57	4,14	4,86
Indicador global de viabilidad futura	2,32	2,64	3,17	3,78

Tabla 44. Resumen de los indicadores correspondientes para los vehículos impulsados por pila de combustible

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

19.13 Hidrógeno en motores de combustión interna (MCI)

	2007	2010	2015	2020
Disponibilidad de recursos y materias primas	2,33	2,67	3,33	3,78
Grado de desarrollo tecnológico	2,38	3	3,75	4,38
Infraestructura	1,44	1,78	2,33	3,11
Modelos disponibles con tecnología	1,22	1,89	2,11	2,67
Ventas de vehículos	1,33	1,57	1,78	2,5
Coste global (vehículo + combustible)	1,63	1,88	2,25	2,88
Emisiones de gases de efecto invernadero	3	3,14	3,43	3,71
Emisiones de contaminantes locales	3,22	3,13	3,88	4
Consumo energético	2,33	2,43	3	3,29
Compromiso político, marco legal y administrativo	3,25	3,63	4,14	4,43
Beneficios sociales (empleo generado)	2,86	3,14	3,71	4
Valoración del usuario potencial	3	3,57	4	4,29
Indicador Índice Global de viabilidad futura	2,33	2,64	3,15	3,61

Tabla 45. Resumen de los indicadores correspondientes para los motores de combustión interna (MCI) alimentados con hidrógeno
Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

20 Análisis de escenarios

Para realizar una estimación de la ruta de entrada de los nuevos sistemas de propulsión y los combustibles alternativos es necesario analizar numerosos factores económicos y de mercado, incluyendo las políticas públicas, los impuestos y las subvenciones, el estado de las tecnologías y/o sus costes asociados. La evolución futura más probable de cada uno de estos factores también ha de ser debidamente considerada. Además de todo lo anterior, también debe tenerse en cuenta el análisis realizado anteriormente en este estudio sobre las ventajas e inconvenientes de cada tecnología, los balances de energía y emisiones y la disponibilidad. Por último, en la estimación de dicha ruta de entrada se debe considerar el análisis de los diferentes indicadores expuestos en el apartado anterior.

En este apartado se mostrarán diferentes escenarios de entrada de varias de las tecnologías descritas en este estudio. Los escenarios han sido propuestos por diferentes asociaciones y proyectos de investigación europeos. Se analizarán sus puntos de intersección y sus diferencias, para confluir finalmente en una hoja de ruta de entrada de los sistemas de propulsión y los combustibles alternativos de aquí hasta el año 2020.

20.1 Diferentes escenarios

Escenario propuesto por EUCAR¹ (European Council for Automotive R & D)

En la siguiente figura se muestra la hoja de ruta propuesta por EUCAR desde el año 2005 hasta el año 2030 para el despliegue en Europa de diferentes tecnologías aplicadas a vehículos de gasolina (combustible representado en color verde) y en vehículos diésel (en color azul). En la figura se incluyen, entre otras, las futuras tecnologías de combustión avanzadas para motores gasolina y diésel. La figura también incluye otras tecnologías como los vehículos impulsados por gas (en color amarillo), los vehículos híbridos (en violeta) y los impulsados por hidrógeno (en rojo).

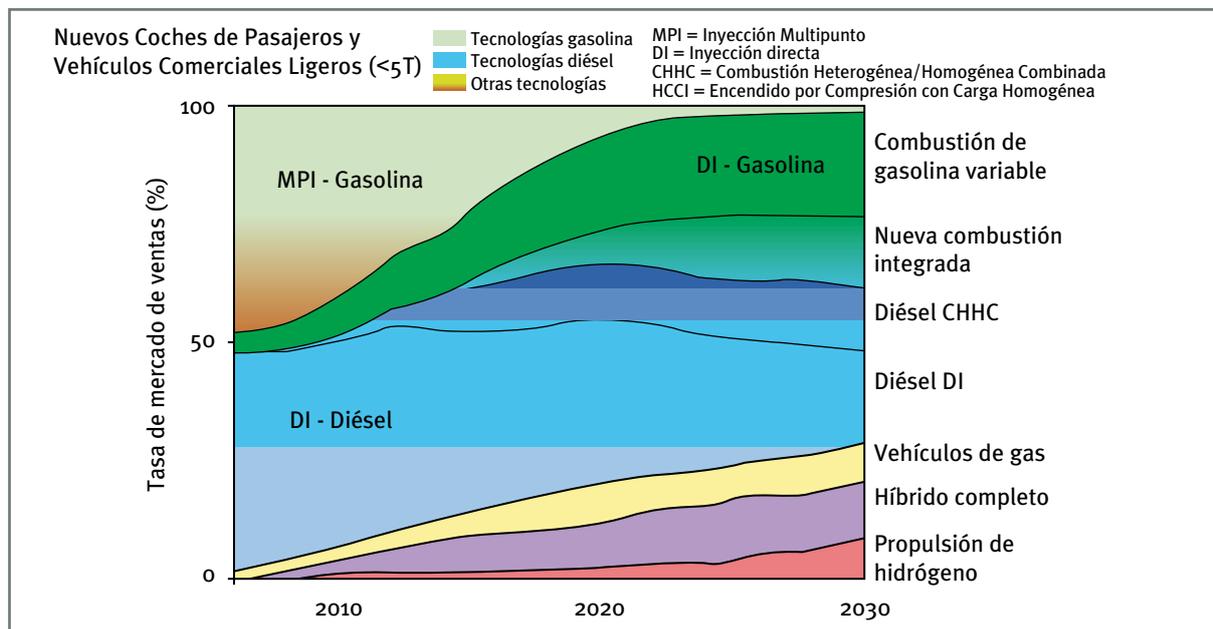


Figura 44. Hoja de ruta hasta 2030 propuesta por EUCAR para la entrada en Europa de diferentes tecnologías

(híbrido completo = híbrido puro)

Fuente: EUCAR 2007

¹ EUCAR se formó en 1994 a partir del Joint Research Centre (JRC). Sus miembros representan a los principales fabricantes europeos: BMW, DAF, Daimler Chrysler (Mercedes), Fiat, Ford, Opel, Porsche, PSA, Renault, VW y Volvo. El objetivo de EUCAR es promocionar la I+D de la automoción en Europa, y con ello mantener y fortalecer su competitividad industrial

De acuerdo con la hoja de ruta anterior, los vehículos impulsados por gasolina o diésel serán los que todavía conserven una mayor cuota de mercado en el año 2020, si bien se producirá una paulatina entrada de sistemas de combustión avanzados en los motores convencionales. Los vehículos alimentados con gas tendrán en 2020 una cuota de mercado significativa, aunque ligeramente menor que la cuota de los vehículos híbridos. Según este estudio, los vehículos propulsados por hidrógeno no se introducirán de forma apreciable en el mercado hasta más allá del año 2020.

Así, según las conclusiones de este estudio, los motores de combustión interna seguirán siendo el principal sistema de propulsión para automoción durante los próximos veinte años. En las siguientes décadas, según EUCAR, sí que se conseguirán avances significativos, tanto en la mejora de los procesos de combustión como en desarrollo de nuevos tipos de combustibles. Sin embargo, a corto y medio plazo seguirán siendo los avances en los sistemas de propulsión convencionales y en el tratamiento de las emisiones producidas por los combustibles tradicionales los que produzcan una mayor mejora en el medioambiente. Esta mejora se conseguirá gracias a una mayor eficiencia general, traducida en una reducción de las emisiones de CO₂ y de otras sustancias contaminantes. Por otro lado, la investigación en el hidrógeno se propugna como la vía para encontrar la solución definitiva a largo plazo. En cualquier caso, desde el punto de vista del medioambiente, la investigación en energías renovables y en combustibles alternativos constituye uno de los aspectos más importantes para las próximas dos décadas, especialmente de cara a la seguridad del suministro energético y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Escenario propuesto por la asociación EARPA (European Automotive Research Partners Association)

El proyecto europeo FUIORE, liderado por la asociación EARPA, recoge la siguiente previsión de reparto del consumo de los diferentes combustibles a lo largo del periodo 2015-2020:

	Gasolina (%)	Diésel (%)	GNC/GNL ² (%)	GLP (%)	Hidrógeno (%)
FUIORE - Coche	40	50	5	4	1
FUIORE - Camión	-	96	3	-	1
FUIORE - Autobús	-	90	8	-	2
EUCAR - Coche	40	51	8	8	1
EUCAR - Coche	40	51	8	1	

Tabla 46. Comparación de las previsiones de EARPA y EUCAR en relación al reparto de combustibles en el transporte por carretera para el horizonte 2015-2020

Fuente: Proyecto FUIORE

Es probable, según EARPA, que la mayor parte del crecimiento en el uso de los combustibles alternativos venga de la mano de los biocarburantes y los combustibles sintéticos, probablemente mezclados con combustibles tradicionales. Dichas mezclas permitirían optimizar las propiedades de los combustibles tradicionales, reducir las emisiones y cumplir con los requisitos de calidad necesarios en impuestos por los nuevos sistemas de combustión. Sin embargo, también vale la pena resaltar que los miembros del proyecto FUIORE creen que el objetivo del 20% de sustitución de los carburantes convencionales en el año 2020 no se va a poder alcanzar.

No obstante, el hidrógeno y las pilas de combustible son vistos por muchos de los participantes en el proyecto FUIORE como una solución competitiva en cuanto a su coste para en el periodo 2020-2030.

El proyecto FUIORE también incluye dos hojas de ruta hasta el año 2030. La primera de ellas muestra las previsiones para los vectores energéticos y los combustibles. La segunda ofrece un pronóstico para las tecnologías de

² GNC/GNL: Gas Natural Comprimido/Gas Natural Licuado

propulsión. En ambas figuras las barras muestran el tiempo necesario para llevar a cabo la investigación básica (periodo representado por el color azul de las barras), la investigación aplicada (en color amarillo) y para el desarrollo tecnológico previo al lanzamiento en el mercado de los combustibles o las tecnologías (en verde).

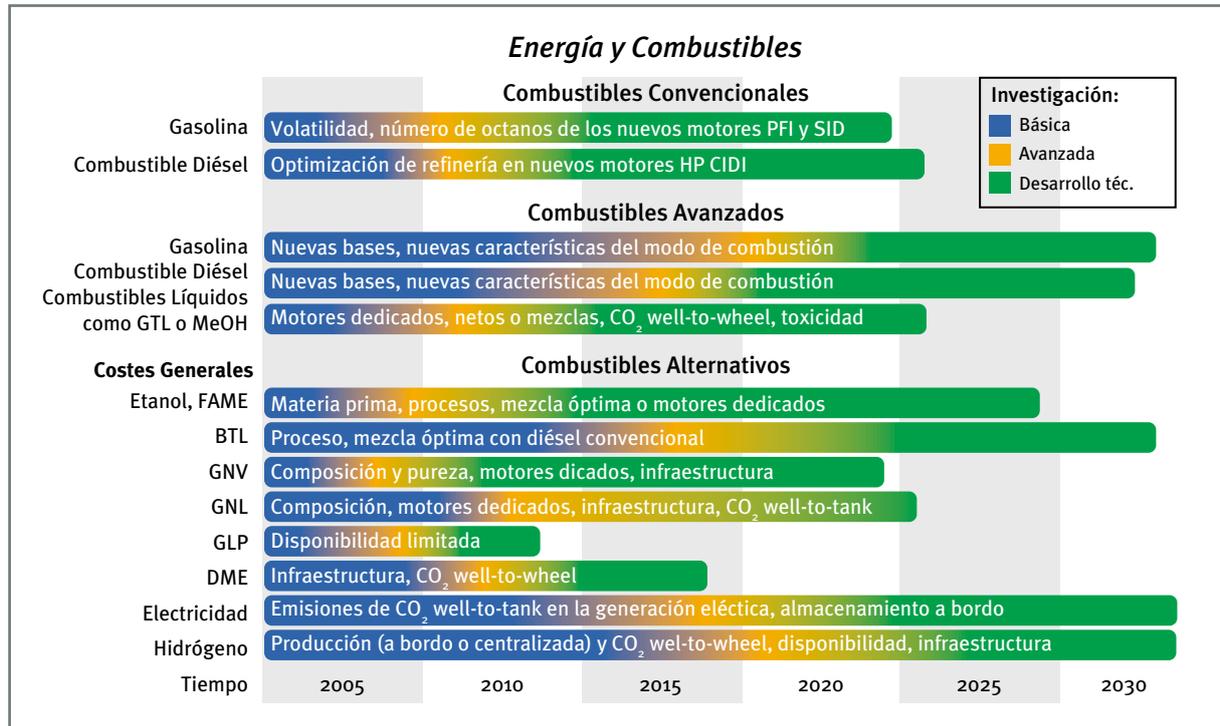


Figura 45. Hoja de ruta de los combustibles y los vectores energéticos en el periodo 2000-2030

Fuente: Proyecto FURORE

Según el proyecto FURORE, para alcanzar el objetivo del 20% de sustitución de carburantes es necesario seguir investigando en los siguientes temas siguientes:

- Reducción de los costes totales de los combustibles alternativos “desde el pozo hasta la rueda”. En estos momentos es el reto principal al que se enfrentan los combustibles alternativos, puesto que muchos de ellos, particularmente los biocarburantes, el gas natural y el gas licuado del petróleo (GLP) se pueden considerar ya totalmente desarrollados y demostrados.
- Tecnologías de almacenamiento de los combustibles gaseosos, con el objetivo de asegurar una adecuada autonomía de los vehículos.
- Producción de hidrógeno, mediante procesos con mayor rendimiento, por ejemplo mediante procedimientos de hidrólisis (o descomposición química de un compuesto al reaccionar con el agua). La investigación ha de incluir también el sistema de producción de la electricidad, y la evaluación medioambiental global del hidrógeno como vector energético.
- Sistemas de distribución para el hidrógeno, que deben ser económicos y seguros si se quiere asegurar su aceptación futura.
- Utilización de la electricidad en el transporte por carretera, incluida la investigación y el desarrollo de mejores sistemas de almacenamiento de la electricidad a bordo. El empleo de la electricidad como vector energético y la mejora de los sistemas de almacenamiento a bordo se cree que podrían mejorar notablemente el balance global del CO₂ emitido por el transporte por carretera.

La siguiente figura muestra la hoja de ruta de las distintas tecnologías de propulsión:

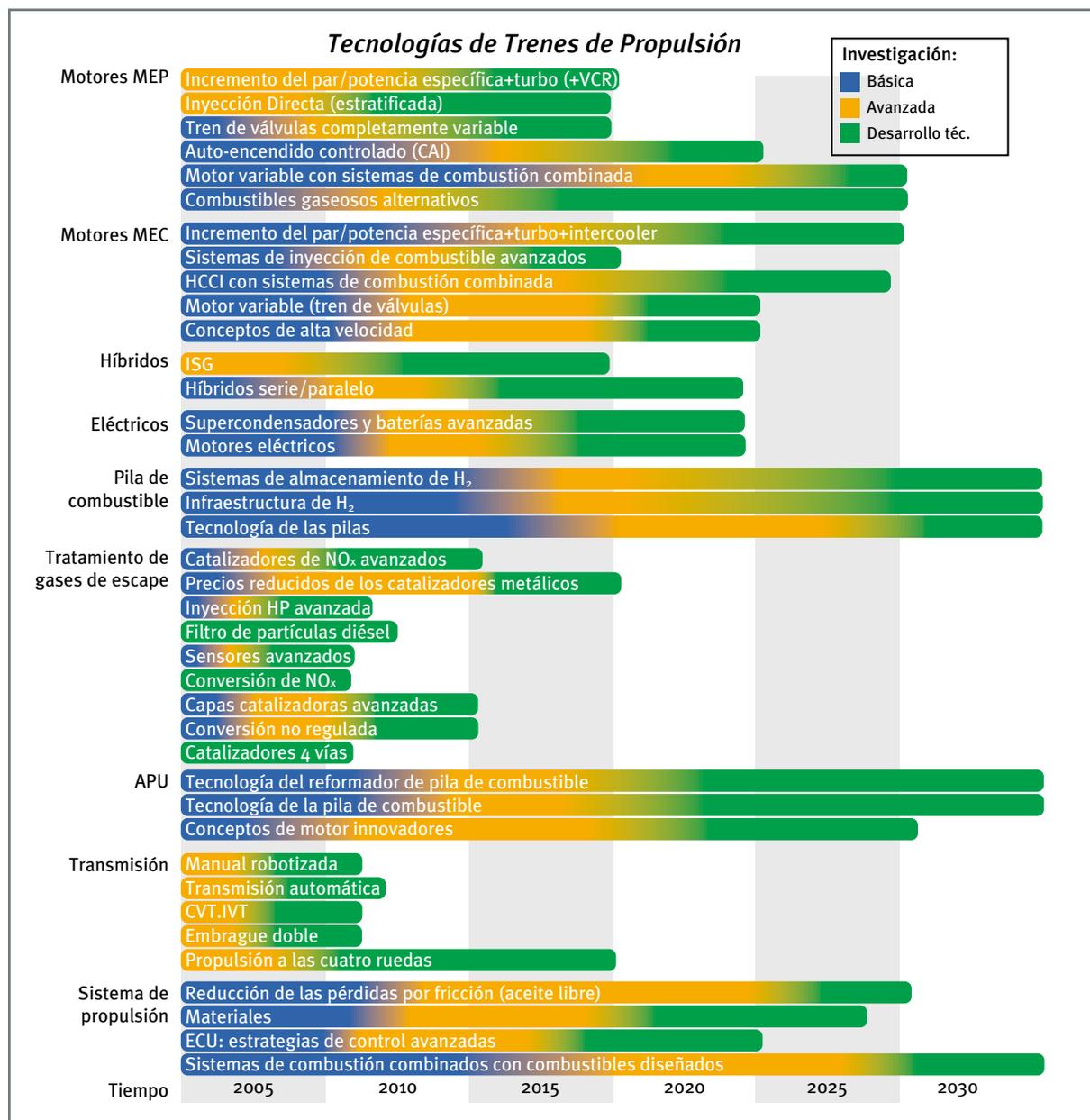


Figura 46. Hoja de ruta de las diferentes tecnologías de sistemas de propulsión en el horizonte temporal 2000-2030

Fuente: Proyecto FURORE

Entre las conclusiones que se pueden extraer de esta segunda figura se pueden destacar las siguientes:

- La investigación en las tecnologías de los motores de combustión interna es necesaria, ya que esta investigación garantizará la competitividad global de la industria de automoción europea, reducirá la dependencia energética y mejorará el medioambiente.
- La investigación en sistemas de propulsión completamente nuevos es igualmente necesaria para conseguir avances sostenibles en los ámbitos del medioambiente y la seguridad energética.
- En cualquier caso, deben considerarse de elevada importancia todas las medidas de reducción del consumo energético, independientemente de los escenarios futuros y de los sistemas de propulsión o combustibles que finalmente intervengan en dichos escenarios.

Escenario propuesto por el proyecto europeo HYWAYS

El proyecto europeo HYWAYS también ha realizado su propia hoja de ruta de la entrada de las diferentes tecnologías del hidrógeno en Europa. A continuación se destacan algunas conclusiones del subproyecto HYNET, el cual se ha desarrollado dentro del citado proyecto HYWAYS:

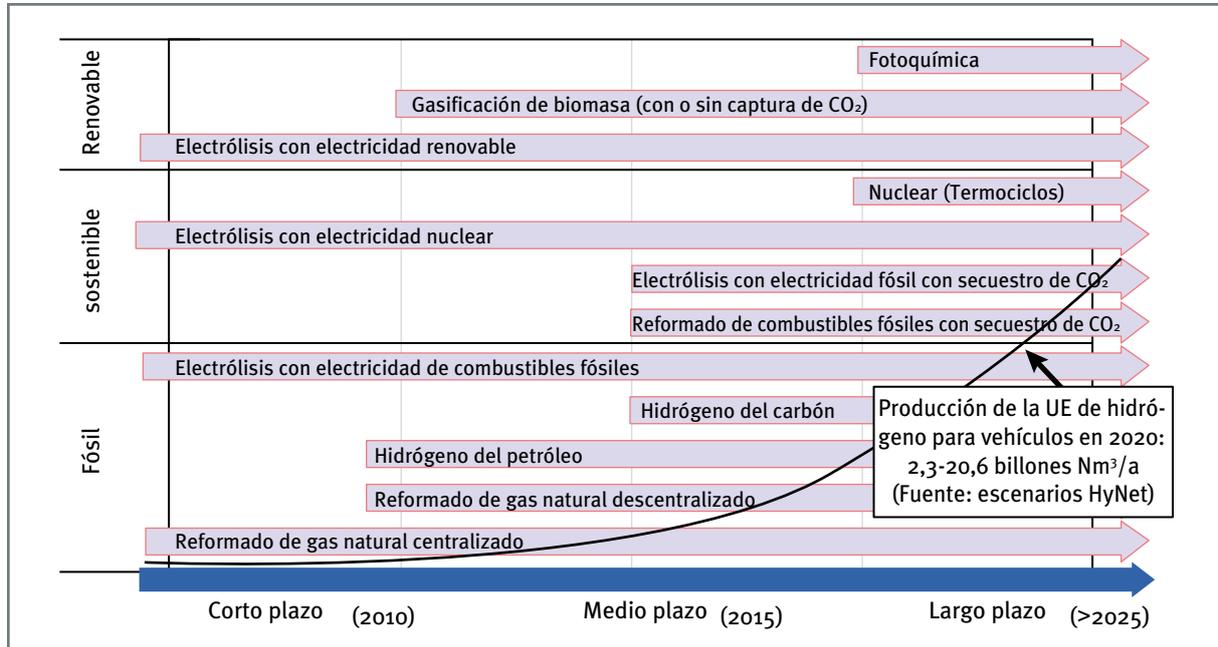


Figura 47. Hoja de ruta de entrada de las tecnologías de producción del hidrógeno

Fuente: Proyecto HYNET

En torno al 95% de la producción actual de hidrógeno proviene de reformado centralizado de gas natural. A medio y largo plazo es de esperar un abandono progresivo de aquellos procesos de obtención de hidrógeno que emitan CO_2 a la atmósfera.

Considerando el actual estado del arte, la electrólisis utilizando energías renovables ofrece la posibilidad real de producir hidrógeno sin generar emisiones de CO_2 . Esta tecnología es adecuada para su utilización a pequeña escala. A medio plazo, se espera que las tecnologías basadas en los combustibles fósiles, junto con otras alternativas igualmente neutras desde el punto de vista de las emisiones de CO_2 , también contribuyan a la producción de hidrógeno. Entre las más interesantes están el reformado de gas natural a pequeña escala y la gasificación de la biomasa, así como también aquellas plantas de reformado y gasificación que conviertan en hidrógeno el petróleo o el carbón. Mirando a más largo plazo, las tecnologías de producción del hidrógeno podrán incluir procesos de conversión foto-biológicos o foto-electroquímicos, sin descartarse tampoco los procesos de conversión nuclear.

De este modo, según el escenario previsto por el proyecto HYNET, en el año 2020 la producción anual europea de hidrógeno para su uso como combustible de vehículos se situará entre 2,3 y 20,6 billones de metros cúbicos.

Sin embargo, la producción del combustible no es el único factor a considerar, ya que actualmente existe una muy limitada infraestructura industrial para la distribución de hidrógeno. Esta infraestructura está basada en el transporte por carretera de líquido criogénico o de gas comprimido. En la actualidad, una de las principales barreras del hidrógeno son los costes asociados a su transporte y almacenamiento, además de los costes propios de las estaciones de abastecimiento.

Así, hasta que finalmente las pilas de combustible lleguen a ser una realidad cotidiana, los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno podrían ayudar a crear la demanda mínima necesaria para comenzar a desplegar la imprescindible infraestructura de suministro de hidrógeno.

Por otro lado, se prevé que las flotas cautivas de vehículos abran el camino hacia el uso del hidrógeno como combustible para automoción. En cualquier caso, no se espera una llegada extensa masiva del hidrógeno a las estaciones de servicio públicas antes del año 2015-2020, puesto que serán mayoría los fabricantes de vehículos que no estén listos para producir coches impulsados por hidrógeno antes de estas fechas.

La figura siguiente muestra el escenario de la introducción de vehículos de hidrógeno propuesto por el proyecto HYNET. En el año 2020 se pronostica un parque de vehículos de hidrógeno en Europa de 5 millones de unidades, con unos límites márgenes de incertidumbre inferior y superior de 2 y 9 millones, respectivamente. Los escenarios no distinguen entre vehículos de pila de combustible y vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno:

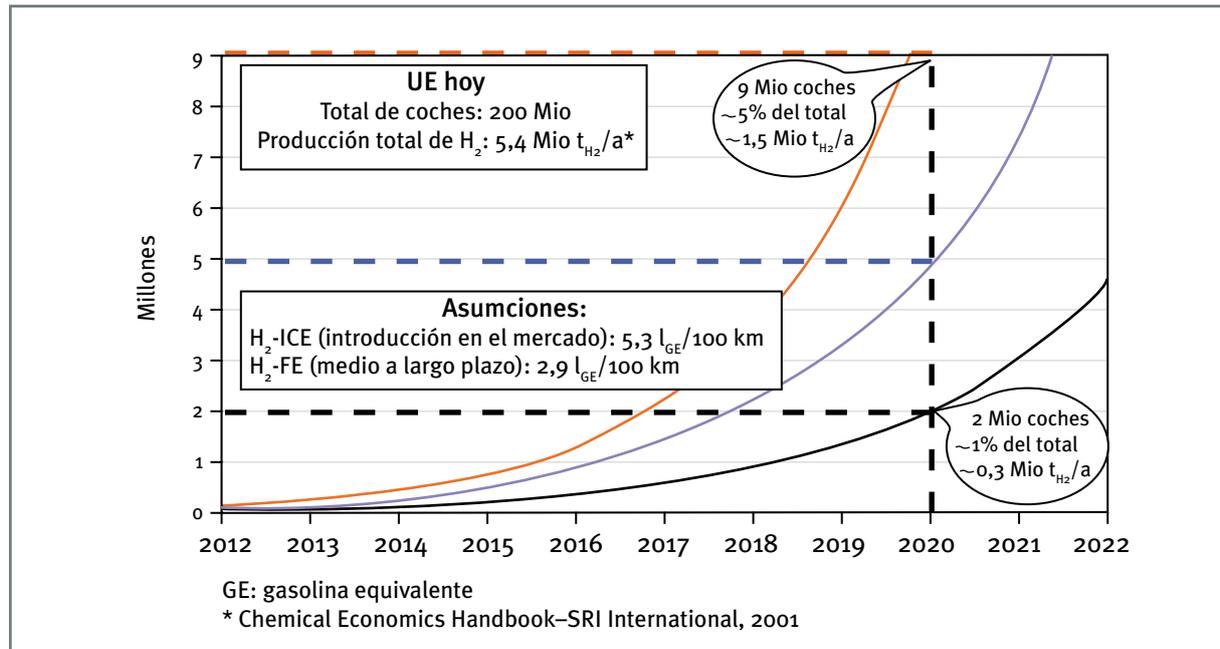


Figura 48. Posible evolución del parque de vehículos de hidrógeno hasta el año 2020

Fuente: Proyecto HYNET

Si se admite como más probable el escenario intermedio de 5 millones de vehículos de hidrógeno circulando en Europa en 2020; entonces en el año 2010 la cifra de estos vehículos se situaría en un total de 50.000 coches de hidrógeno, mientras que en el 2015 alcanzaría los 530.000 vehículos.

20.2 Valoración de los escenarios. Puntos en común y diferencias

Mientras que los estudios realizados por EUCAR y por el proyecto FURORE establecen una hoja de ruta para la introducción de diversas tecnologías y sistemas de propulsión que se extiende hasta el año 2030, los resultados del proyecto HYWAYS se centran exclusivamente en el hidrógeno y las tecnologías asociadas a su desarrollo hasta el año 2020. Por tanto, este último estudio sólo podrá compararse con los anteriores en aquellos aspectos relativos a la aparición de la entrada del hidrógeno en el mercado.

El estudio de EUCAR no hace distinciones entre los diferentes combustibles para motores de combustión interna (combustibles sintéticos, biocarburantes, etc.), limitándose a analizar la introducción de diversas tecnologías y modificaciones en dichos sistemas de propulsión convencionales. En este sentido, el proyecto FURORE es el que ofrece una información más detallada, realizando análisis individualizados para las fuentes de energía y los combustibles, por un lado, y para las tecnologías de propulsión, por otro.

Las conclusiones más importantes que se extraen del análisis de los estudios anteriores se resumen a continuación.

Puntos en común

Estudios EUCAR y FURORE:

- Los motores de combustión interna seguirán siendo el sistema de propulsión principal en el año 2020.
- Se esperan importantes avances en las tecnologías de los motores de combustión interna. Estos avances previstos, desde ahora al año 2020, incluyen tecnologías específicas para los motores diésel y para los motores de gasolina.
- Se estima que la entrada en el mercado de las tecnologías de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y de auto-encendido controlado (CAI) se podría producir en el año 2020 ó 2025.
- Se prevé un aumento importante en la cuota de mercado de los vehículos híbridos hasta el año 2020.
- Se espera que los vehículos con combustibles gaseosos (como el gas natural o el gas licuado del petróleo, o GLP) alcancen un 9% de cuota de mercado en 2020.
- Es probable, por todo lo dicho en los puntos de las secciones anteriores, que la mayor parte del crecimiento en el uso de los combustibles alternativos venga de la mano de los biocarburantes y los combustibles sintéticos.

Diferencias

- Mientras que el proyecto HYWAYS predice ya en el año 2020 la presencia en Europa de 5 millones de vehículos impulsados por hidrógeno (sin distinguir entre vehículos con motor de combustión interna y vehículos de pila de combustible), el estudio de EUCAR no prevé su introducción de forma apreciable hasta más allá del año 2020, y el proyecto FURORE retrasa dicha introducción hasta más allá de 2025.
- Las previsiones del proyecto FURORE sugieren la introducción de las pilas de combustible en torno al periodo a 2025-2030, mientras que ninguno de los otros dos estudios ofrecen información al respecto.
- El escenario propuesto por EUCAR no contempla la introducción de la propulsión eléctrica en el mercado, mientras que el de FURORE la sitúa hacia el periodo 2015-2025.

21 Resumen y conclusiones

21.1 Resumen del análisis de los indicadores de viabilidad futura

En primer lugar, en las tablas y gráficas que figuran a continuación, se resumen los valores de los indicadores globales de viabilidad futura presentados anteriormente. En concreto, para los combustibles contemplados en este estudio los resultados son los siguientes:

Combustibles	En la actualidad (2007)	2010	2015	2020
Biodiésel	3,19	3,59	3,91	4
Bioetanol	3,02	3,46	3,77	3,9
“Gas a líquido” (GTL)	2,49	2,71	3,14	3,27
“Biomasa a líquido” (BTL)	2,44	2,66	3,31	3,59
Etanol lignocelulósico	2,3	2,57	3,5	3,8
Gas natural	3,07	3,33	3,52	3,57
Gas licuado del petróleo (GLP)	2,72	2,85	3,08	3,1
H2 en motores combust. interna	2,33	2,64	3,15	3,61

Tabla 47. Resumen de los indicadores globales de viabilidad futura de los diferentes combustibles alternativos

Fuente: Elaboración propia

Legenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

De forma gráfica, la evolución de los indicadores globales de viabilidad futura de los diferentes combustibles se muestra en la siguiente figura:

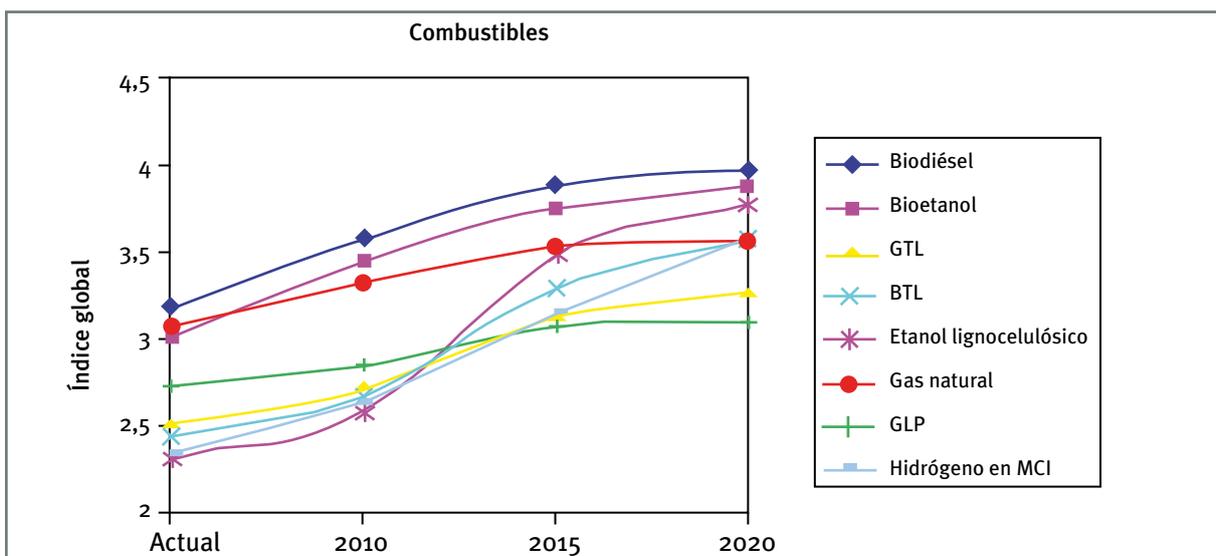


Figura 49. Evolución de los indicadores globales de viabilidad futura de los diferentes combustibles

Fuente: Elaboración propia

La evolución de los indicadores globales de viabilidad futura nos da información sobre la tendencia previsible en el mercado en el caso de cada uno de los combustibles. En general, se prevé que la mayoría de los combustibles aumente en mayor o menor medida su cuota de mercado en los próximos años. Dicho aumento iría en detrimento de los combustibles convencionales, diésel y gasolina. Éstos, en cualquier caso, continuarán manteniendo la mayor cuota de mercado.

El **biodiésel** y el **bioetanol** aumentarán su cuota de mercado sobre todo hasta el año 2015. Es previsible que en España el bioetanol lo haga en mayor medida, ya que parte de una penetración en el mercado mucho mayor. A partir de ese año 2015, es de esperar que su ritmo de crecimiento disminuya hasta que su cuota prácticamente se estabilice. La incorporación al mercado de los biocarburantes de segunda generación, los cuales entrarían en fuerte competencia con el biodiésel y el bioetanol, sería el principal motivo de dicha estabilización.

El combustible “gas a líquido” o **GTL** y el combustible “biomasa a líquido” o **BTL** tendrán una evolución paralela a la anterior del biodiésel y el bioetanol en los próximos años, puesto que están basados en la misma tecnología que éstos. Ambos aumentarán notablemente su cuota de mercado en la próxima década, pero es previsible que cuando comience su producción a gran escala, en torno al año 2012, el crecimiento del combustible “biomasa a líquido” (BTL), sea mayor que el crecimiento del combustible “gas a líquido” (GTL). Ello se deberá a las buenas características medioambientales y energéticas del primero. Estas buenas características se justifican en el hecho de utilizar para su producción materias primas renovables de amplia disponibilidad. El etanol lignocelulósico también podría tener una evolución similar al combustible “biomasa a líquido” (BTL), al tratarse de un combustible con similares prestaciones medioambientales y disponibilidad de materias primas parecidas, y al beneficiarse de las mismas políticas de promoción, incluso podría tener un crecimiento más rápido a partir de 2010, ya que se basa en una tecnología de producción diferente.

El **gas natural** y el gas licuado del petróleo, o **GLP**, también aumentarán su cuota de mercado, pero previsiblemente la penetración en el mercado del gas natural será mayor que la del gas licuado del petróleo (GLP), puesto que en España es el gas natural el que parte de una situación más avanzada. Por otra parte, las políticas de algunas administraciones y la posibilidad de utilizar biogás como combustible también contribuirán a la penetración del gas natural. Aunque conviene recordar que el gas licuado del petróleo (GLP) también cuenta con la alternativa renovable del dimetil éter (DME) obtenido a partir de biomasa.

Por último, el **hidrógeno** tendrá aún una evolución lenta en los próximos años, hasta que no se desarrollen las tecnologías necesarias para su plena introducción en el mercado. Esta introducción podría tener lugar en los motores de combustión interna antes de 2020. De hecho, es previsible que el hidrógeno experimente el mayor crecimiento de todos los combustibles a medida que se acerque al año 2020.

Así pues, la situación prevista para el periodo considerado en este estudio no se ceñirá a un único combustible, sino que incluirá un mercado diversificado en el que las diversas alternativas a los combustibles convencionales irán aumentando progresivamente su cuota de mercado en Europa. El aumento de dicha cuota será más notable en el caso de los biocarburantes, aunque las aportaciones del resto de combustibles alternativos también serán significativas.

A continuación, se muestra el resumen de los indicadores globales de viabilidad futura de los principales sistemas de propulsión y modificaciones técnicas que se recoge en la tabla y en la gráfica siguientes:

Sistemas de propulsión	(2007) Actual	2010	2015	2020
Encendido por compresión de carga homogénea (HCCI)	2,87	2,99	3,23	3,33
Auto-encendido controlado (CAI)	2,8	2,89	3,11	3,14
Vehículos eléctricos	2,79	3,02	3,43	3,75

(continuación)

Sistemas de propulsión	(2007) Actual	2010	2015	2020
Vehículos híbridos	3,16	3,48	3,86	4,01
Vehículos de pila de combustible	2,32	2,64	3,17	3,78

Tabla 48. Indicadores globales correspondientes a las modificaciones técnicas y a los nuevos sistemas de propulsión

Fuente: Elaboración propia

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta

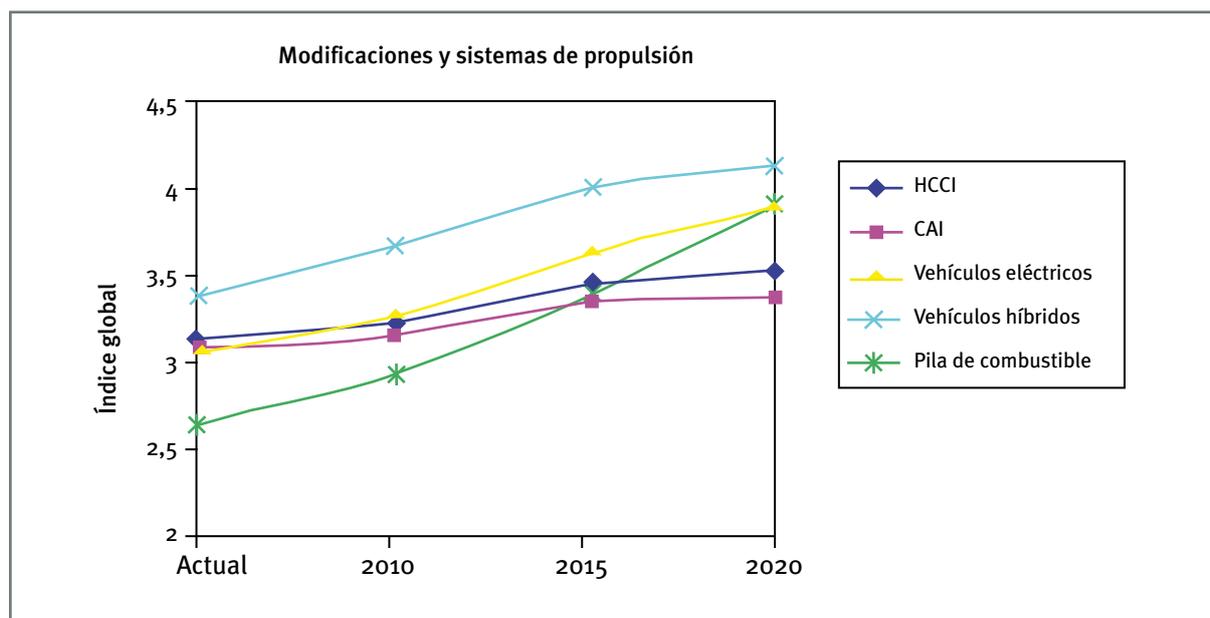


Figura 50. Evolución de los indicadores globales de los nuevos desarrollos y sistemas de propulsión

Fuente: Elaboración propia

Los motores de combustión interna (MCI) seguirán siendo el sistema de propulsión más importante en los próximos años. Estos motores pueden ser adaptados para funcionar con multitud de combustibles diferentes, ofrecen unos costes bajos, un grado de desarrollo muy elevado y una fiabilidad contrastada.

Según se concluye del análisis de los indicadores globales de viabilidad futura presentados anteriormente en este estudio, los sistemas de combustión de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y de auto-encendido controlado (CAI) aumentarán su presencia en el mercado entre 2010 y 2015. Dicho aumento, en cualquier caso, se producirá a un ritmo muy lento, parejo al ritmo de desarrollo de estas tecnologías.

Entre los sistemas de propulsión alternativos, el que tendrá un mayor desarrollo a corto y medio plazo serán los **vehículos híbridos**. Éstos tienen una tecnología ya desarrollada, están favorecidos por las actuales políticas públicas y permiten mejorar la eficiencia y el comportamiento medioambiental de los vehículos convencionales. El principal desafío al que se enfrentan en los próximos años es rebajar su coste.

La evolución de los vehículos eléctricos será similar a la de los vehículos híbridos, aunque los primeros parten en la actualidad de una posición menos desarrollada que los segundos y, ofrecen menores prestaciones y una autonomía más reducida.

A corto plazo muchos fabricantes de automóviles están optando ya por soluciones híbridas, mientras que a largo plazo la utilización de **pilas de combustible** permitirá vencer todas las limitaciones citadas y mantener las buenas

características medioambientales y de eficiencia energética de los vehículos eléctricos. Las pilas de combustible podrían tener un desarrollo importante a partir del año 2020.

En resumen, el panorama en los próximos años estará compuesto principalmente por vehículos con motores de combustión interna coexistiendo con nuevos sistemas de propulsión, sobre todo vehículos eléctricos híbridos. Un menor desarrollo tendrán a corto plazo los sistemas de combustión de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y de auto-encendido controlado (CAI), así como los vehículos de pila de combustible. Éstos últimos se encuentran aún en fase de desarrollo y comenzarán a popularizarse a más largo plazo.

21.2 Resumen de la valoración de los escenarios

Las principales conclusiones de este apartado se resumen a continuación:

- Los motores de combustión interna seguirán siendo el principal sistema de propulsión en el año 2020.
- De aquí al año 2020 se esperan importantes avances en la tecnología de los motores de combustión interna, avances que incluyen tecnologías específicas tanto para los motores Diesel como para los motores de gasolina.
- Para el período 2020-2025 se espera la entrada en los motores de combustión interna de las tecnologías de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y de auto-encendido controlado (CAI).
- Se prevé un aumento importante en la cuota de mercado de los vehículos híbridos de aquí al año 2020.
- Se espera que los vehículos con combustibles gaseosos aumenten progresivamente su cuota de mercado hasta alcanzar un 9% en 2020. Los principales combustibles gaseosos utilizados serán el gas natural y el gas licuado del petróleo (GLP).
- La mayor parte del crecimiento de los combustibles alternativos vendrá de la mano de los biocarburantes y los combustibles sintéticos.
- La aparición del hidrógeno en el mercado, utilizado inicialmente como combustible en vehículos con motor de combustión interna, tendrá lugar entre los años 2012 y 2030.
- La introducción de las pilas de combustible se espera en torno a los años 2025-2030.
- La propulsión eléctrica posiblemente se introducirá en el mercado en el periodo 2015-2025, aunque todavía deben solventarse sus actuales limitaciones, principalmente la restringida autonomía de las baterías.

21.3 Síntesis de la hoja de ruta

A partir de toda la información analizada hasta este punto (hojas de ruta, indicadores de viabilidad futura, escenarios...), en esta sección se presenta una estimación de hoja de ruta de entrada en España de los combustibles y sistemas de propulsión alternativos revisados en este estudio. La hoja de ruta está basada en la situación actual y en las perspectivas de futuro de cada sistema o combustible y, además, tiene en cuenta, como no podía ser de otro modo, el marco general europeo.

La hoja de ruta en el mercado de las tecnologías de aquí al año 2020 se ha dividido en tres apartados. El primero de ellos recoge la situación presente y la evolución prevista de las principales modificaciones técnicas en los sistemas actuales de propulsión. En el segundo apartado se trata la entrada en el mercado de los diferentes combustibles alternativos. Por último, en el tercer punto se muestra la evolución prevista de los nuevos sistemas de propulsión, entre los que se han incluido el sistema de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y el sistema de auto-encendido controlado (CAI).

En el caso de los aspectos relativos al presente y futuro de los combustibles alternativos y de los sistemas de propulsión, se distribuyó en su momento un cuestionario entre los integrantes del Grupo de Expertos españoles para conocer su opinión sobre las correspondientes hojas de ruta.

Las preguntas incluidas en el cuestionario hacían referencia a las fechas previstas de introducción y/o de consolidación en el mercado español de los nuevos sistemas de propulsión y combustibles alternativos. Así, se consideraron dos fechas de referencia para cada sistema de propulsión o combustible:

- **La Fecha de Introducción (FI):** fecha en la que se considera que comienza la introducción en el mercado de un sistema de propulsión o de un combustible (por ejemplo, en flotas cautivas).
- **La Fecha de Consolidación (FC):** fecha en la que se alcanza una penetración total en el mercado. Se considera que se alcanza una penetración total cuando el sistema de propulsión o el combustible ya se encuentra a la venta y al alcance del público en general.

De esta forma, mediante el método Delphi, se obtuvo un consenso entre los expertos respecto a la hoja de ruta de la entrada de los combustibles alternativos y los nuevos sistemas de propulsión.

Por otro lado, para la elaboración del primer apartado correspondiente a las modificaciones en los sistemas actuales de propulsión ha sido suficiente partir de los datos recogidos en este informe, al tratarse de modificaciones que, en su mayoría, se encuentran ya ampliamente extendidas en el mercado.

La representación gráfica de la introducción en el mercado de las diferentes tecnologías y combustibles incluye las tres etapas siguientes: un periodo de investigación y desarrollo (representado en color rojo); un periodo de introducción en el mercado (en color amarillo); y un periodo de popularización o penetración masiva (en verde). Conviene incidir en que las fechas y todos los periodos de desarrollo, introducción y popularización de tiempo son meramente orientativos, dada la considerable incertidumbre a la que todavía están sometidas todas estas tecnologías. Esta incertidumbre está justificada por la complejidad y la multitud de factores que intervienen en cada tecnología.

Modificaciones en los vehículos

En el término de modificaciones este apartado incluye todas aquellas mejoras en los vehículos y en los motores convencionales (normalmente se tratará de motores Diesel y/o gasolina) que vayan dirigidas a reducir el consumo y las emisiones. Los combustibles derivados del petróleo son en la actualidad imprescindibles por su alta implantación y su bajo coste, y seguirán siendo necesarios a largo plazo. Por ello, el desarrollo y la evolución de nuevas tecnologías aplicadas a los motores y vehículos actuales continuarán jugando un importante papel en los próximos años.

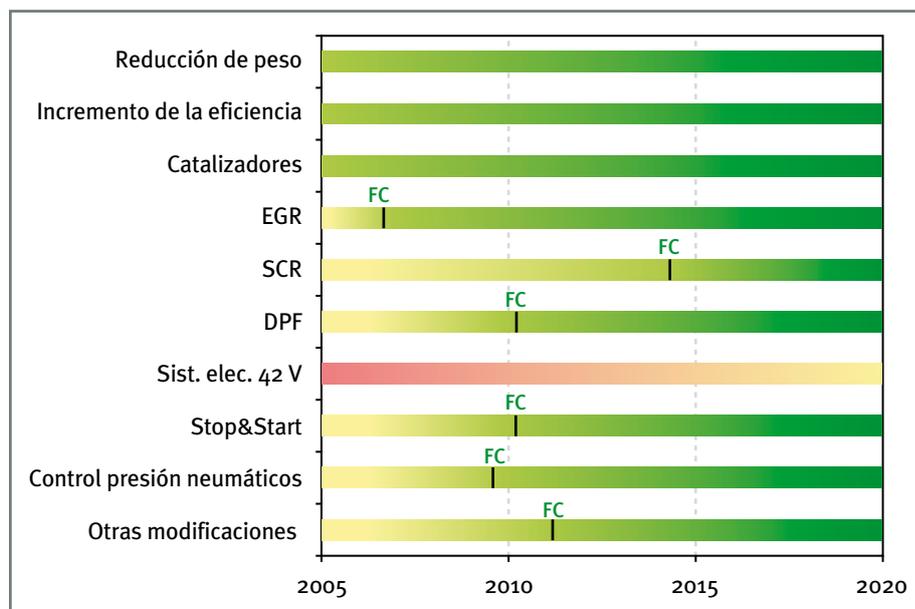


Figura 51. Hoja de ruta de las modificaciones en los vehículos actuales y sus motores actuales
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior, el término “otras modificaciones” incluye algunas de las propuestas de la Unión Europea para reducir aún más las emisiones de CO₂. Entre dichas propuestas se encuentran el aumento de la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado y la disminución de la resistencia a la rodadura de los neumáticos.

Algunas de las citadas modificaciones en los vehículos estudiadas en el presente documento están ya totalmente introducidas en el mercado: los catalizadores, la recirculación de gases de escape (EGR), o los sistemas que permiten una reducción del peso o un incremento de la eficiencia de los sistemas de propulsión. Estas tecnologías seguirán experimentando un desarrollo importante en los próximos años. Dicho desarrollo resultará imprescindible para cumplir con los futuros requerimientos europeos de reducción de las emisiones de CO₂.

En cuanto al resto de tecnologías, algunas de ellas ya están disponibles en una gran variedad de modelos de vehículos, como en el caso del control de la presión de los neumáticos, los filtros de partículas diésel o los sistemas de parada y arranque del motor o, en inglés, “Stop and Start”. Es previsible que en pocos años la mayoría de modelos de automóviles cuenten con todos estos sistemas entre su equipamiento de serie.

Otras tecnologías están aún en fase de desarrollo, como el sistema eléctrico de 42 voltios. Los fabricantes de automóviles se han visto obligados a retrasar la introducción de este sistema, y no es fácil estimar cuándo podrá entrar definitivamente en el mercado.

Combustibles alternativos

Las opiniones del Grupo de Expertos sobre la hoja de ruta para la introducción en el mercado de los combustibles alternativos considerados en este estudio se recogen a continuación:

Combustibles	Fecha de introducción	Fecha de consolidación
Biodiésel	Ya introducido	2012
Bioetanol	Ya introducido	2012
Gas a líquido (GTL)	2011	2019
Biomasa a líquido (BTL)	2013	2019
Etanol lignocelulósico	2013	2017
Gas natural	Ya introducido	2013
Gas licuado del petróleo (GLP)	Ya introducido	2015
Hidrógeno en motores de combustión interna	2011	2020

Tabla 49. Fechas de introducción y de consolidación de los diferentes combustibles alternativos

Fuente: Elaboración propia

Algunos expertos apuntan que los combustibles gas a líquido (GTL) y gas licuado del petróleo (GLP) no llegarán nunca a consolidarse en el mercado al no conllevar ninguna reducción neta de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, según otros expertos, el biodiésel se debería considerar como consolidado en el mercado español, puesto que ya existen más de 300 estaciones de servicio que ofrecen mezclas de este biocarburante. También señalan varios expertos que en 2009 comenzarán a aplicarse las normativas europeas que imponen una cuota mínima de biocarburantes, lo que supondrá también, para entonces, la consolidación del bioetanol. Además, diversos expertos

opinan que ya existen plantas para la producción a gran escala de bioetanol lignocelulósico, por lo que consideran que también éste debe considerarse un combustible ya introducido en el mercado.

En cuanto a la utilización del hidrógeno en los vehículos con motor de combustión interna, BMW ya tiene a la venta un modelo de la serie 7. Este modelo se destina principalmente a personalidades influyentes y con una alta visibilidad. Al seleccionar de este modo su clientela, BMW pretende contribuir a la promoción de las ventajas del hidrógeno. Mazda también ofrece su modelo, el RX8, con motor rotativo Renesis alimentado con hidrógeno. En cualquier caso, en España estos modelos aún no se venden al público en general.

Los resultados obtenidos mediante la consulta al Grupo de Expertos son coherentes con los extraídos del análisis de escenarios, y complementan la información recogida mediante el análisis del indicador global de viabilidad futura. Todo ello permite obtener una visión más amplia de las perspectivas, y de conjunto, del grado de penetración en el mercado de cada una de estas tecnologías.

Resumiendo, la hoja de ruta temporal de entrada en el mercado español de los combustibles alternativos quedaría como sigue:

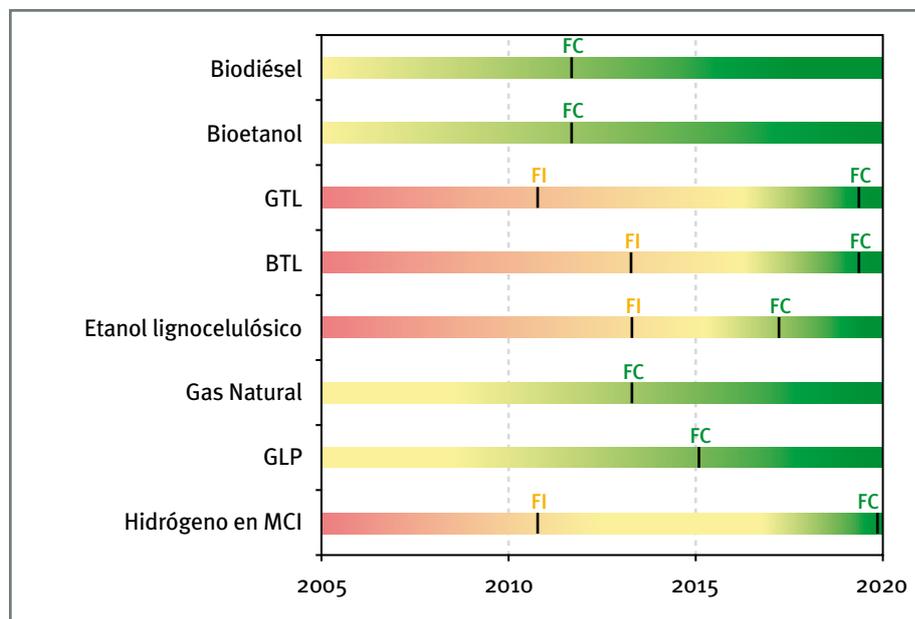


Figura 52. Hoja de ruta de la entrada en el mercado de los combustibles alternativos
Fuente: Elaboración propia

El gas natural y el gas licuado del petróleo (GLP) son ya una realidad, siendo en la actualidad dos de los combustibles alternativos más utilizados en todo el mundo. Su desarrollo en los próximos años se verá favorecido por su bajo coste relativo, y por los incentivos fiscales de los que disfruten estos combustibles en muchos países, entre ellos España. En Europa se prevé que alcancen una cuota de mercado del 9% en 2020.

La utilización del biodiésel y del bioetanol se ha extendido ampliamente en Europa en los últimos años, gracias en parte a los incentivos fiscales. Su uso seguirá en aumento a medida que entren en vigor las cuotas mínimas de utilización de biocombustibles exigidas por Europa. En España, el biodiésel se utiliza sobre todo mezclado con el diésel convencional, mientras que el bioetanol se utiliza normalmente para fabricar el compuesto denominado ETBE, el cual se emplea como aditivo de las gasolinas. Es posible que en los próximos años el bioetanol comience a mezclarse directamente con la gasolina, a medida que la previsible escasez futura del isobutileno limite la producción de ETBE (el isobutileno es un producto imprescindible para la fabricación del ETBE).

Es de esperar que los biocarburantes de segunda generación también ayuden a conseguir los objetivos europeos de cuotas mínimas de utilización de biocarburantes en la próxima década. Los principales avances en este campo provendrán de la utilización de técnicas de Fischer Tropsch para la obtención de diésel sintético a partir de biomasa (biomasa a líquido, o BTL) y de la elaboración de etanol a partir de materia prima lignocelulósica. Estos nuevos

combustibles permitirán aprovechar mejor las limitadas superficies de cultivo destinadas a la producción de biocarburantes. El desarrollo de la tecnología Fischer-Tropsch (FT) posibilitará también la producción en masa de combustible licuado líquido a partir de gas natural (combustible denominado gas a líquido, o GTL).

Los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno podrían contribuir a aumentar la demanda de este combustible. El aumento de su demanda impulsaría la creación de una red de suministro de hidrógeno, lo cual favorecería sin duda la introducción de las tecnologías asociadas a las pilas de combustible.

Nuevos sistemas de propulsión

La siguiente tabla recoge las previsiones del Grupo de Expertos respecto a las fechas de introducción y de consolidación de los nuevos sistemas de propulsión:

Sistema de propulsión	Fecha de introducción	Fecha de consolidación
Encendido "HCCI"	2013	A partir de 2020
Auto-encendido "CAI"	2013	A partir de 2020
Vehículos eléctricos	Ya introducidos	2019
Vehículos híbridos	Ya introducidos	2013
Pila de combustible	2014	A partir de 2020

Tabla 50. Fechas de introducción y de consolidación de los nuevos sistemas de propulsión

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) y de auto-encendido controlado (CAI) están siendo investigados y desarrollados por diversos institutos y fabricantes de automóviles, y se postulan como una alternativa más eficiente que los modos actuales de combustión utilizados en los motores Diesel y de gasolina tradicionales. Estas tecnologías también se configuran como un paso intermedio hacia los vehículos de pila de combustible. El principal reto tecnológico al que se enfrentan los desarrollos HCCI y CAI es el control del momento exacto del inicio de la combustión dentro del cilindro.

Según varios expertos, ni los modos de combustión de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) ni la combustión con auto-encendido controlado (CAI) llegarán nunca a consolidarse en el mercado al no tratarse de tecnologías competitivas a largo plazo. Los vehículos eléctricos, por su parte, tampoco llegarían a consolidarse totalmente y se limitarían a cubrir exclusivamente mercados nicho.

El crecimiento del mercado de los vehículos eléctricos está lastrado fundamentalmente por el insuficiente nivel tecnológico de las baterías. Las baterías actuales no son capaces de satisfacer las demandas exigidas en cuanto a prestaciones y autonomía. La alternativa más factible hoy en día son los vehículos eléctricos híbridos. Se trata ésta de una tecnología ya consolidada entre los fabricantes de vehículos japoneses y estadounidenses. Por su parte, la gran mayoría de los fabricantes europeos tiene planes para comenzar a utilizarla antes de 2010. Por tanto, es de esperar un significativo incremento en las ventas de este tipo de vehículos en Europa y en España a medida que aumente la oferta de modelos híbridos.

Otra alternativa a los sistemas de propulsión eléctricos son los vehículos de pila de combustible. La mayoría de los fabricantes de automóviles consideran que la única solución realista a largo plazo es ésta. Actualmente están en desarrollo numerosos proyectos de investigación y demostración de estas tecnologías, pero su popularización a gran escala está todavía considerablemente limitada por factores como el grado de desarrollo tecnológico de las pilas de combustible y de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno, o la inexistencia de una infraestructura

de abastecimiento de este combustible. Debido a estos factores no es previsible que el despliegue a gran escala de los vehículos de pila de combustible se produzca antes de los años 2025-2030. Sin embargo, otros expertos destacan que la mayoría de las marcas tienen ya prototipos de vehículos impulsados con pilas de combustible: Chevrolet Equinox, Opel Zafira Hidrogen 1, Hyundai Tucson, etc. Por ello, y según estos últimos expertos, la pila de combustible constituye una tecnología ya introducida en el mercado, aunque se trate de modelos que aún no se vendan al público en general.

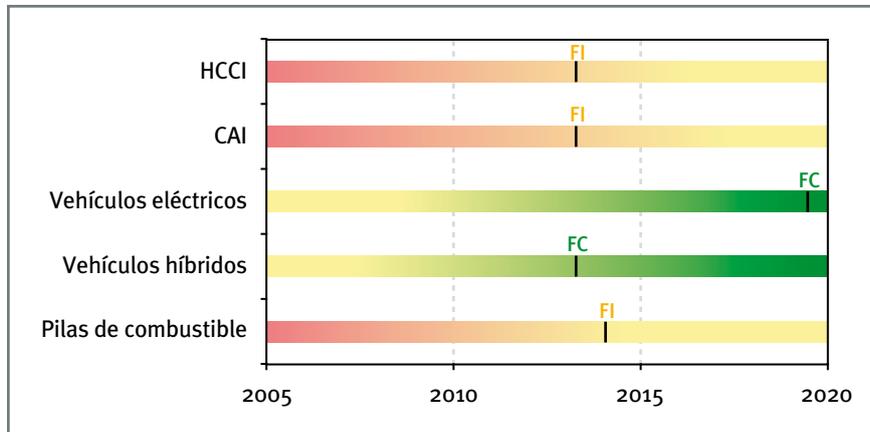


Figura 53. Hoja de ruta de la entrada en el mercado de los nuevos sistemas de propulsión
Fuente: Elaboración propia

21.4 Resumen y conclusiones

Los resultados de este estudio muestran una clara tendencia a la diversificación energética y a la coexistencia de distintas tecnologías y combustibles. Es muy probable que, cada una de las tecnologías y cada uno de los combustibles alternativos, incidirá sobre un nicho de mercado específico dependiendo de su idoneidad para ciertos tipos de aplicaciones.

A causa de su baja autonomía, los vehículos eléctricos actualmente están limitados a su utilización en áreas de pequeñas dimensiones. A cambio, estos vehículos ofrecen en el punto de utilización emisiones nulas de gases de efecto invernadero y de contaminantes; además, sus emisiones acústicas son también muy bajas. Por todo ello, los vehículos eléctricos son idóneos para, por ejemplo, ser utilizados en los cascos históricos de las ciudades.

Las soluciones híbridas y las tecnologías tipo “parada y arranque” permiten mejorar la eficiencia energética de los vehículos y reducir sus emisiones. Las ventajas de este tipo de vehículos son mayores en el tráfico urbano, donde se pueden aprovechar al máximo los beneficios de estas tecnologías. Además, los vehículos híbridos no presentan el inconveniente, como sucede en el caso inherente de los vehículos eléctricos actuales, de una reducida autonomía.

Actualmente, son muchas las flotas cautivas de transportes urbanos que ya utilizan combustibles gaseosos como el gas natural o los gases licuados del petróleo (GLP) para impulsar sus vehículos. Estos combustibles necesitan grandes depósitos para su almacenamiento a bordo. Por otro lado, una de las principales ventajas de estos combustibles gaseosos es que son más económicos que el diésel o la gasolina. Además, producen menores emisiones contaminantes que los carburantes convencionales.

Para flotas de transporte interurbano de larga distancia, en cambio, los combustibles líquidos son más adecuados, ya que permiten una mayor autonomía para un determinado volumen de depósito. Los biocarburantes ofrecen prestaciones parecidas comparables a las de los combustibles convencionales y producen menores emisiones contaminantes. Además, cuando se analiza el ciclo completo de producción de los biocarburantes se comprueba que su uso también reduce las emisiones totales de CO₂.

A continuación se muestra el resumen final de las hojas de ruta de la entrada en el mercado de las diferentes modificaciones en los sistemas de propulsión convencionales, las hojas de ruta de los nuevos sistemas de propulsión y las de los combustibles alternativos.

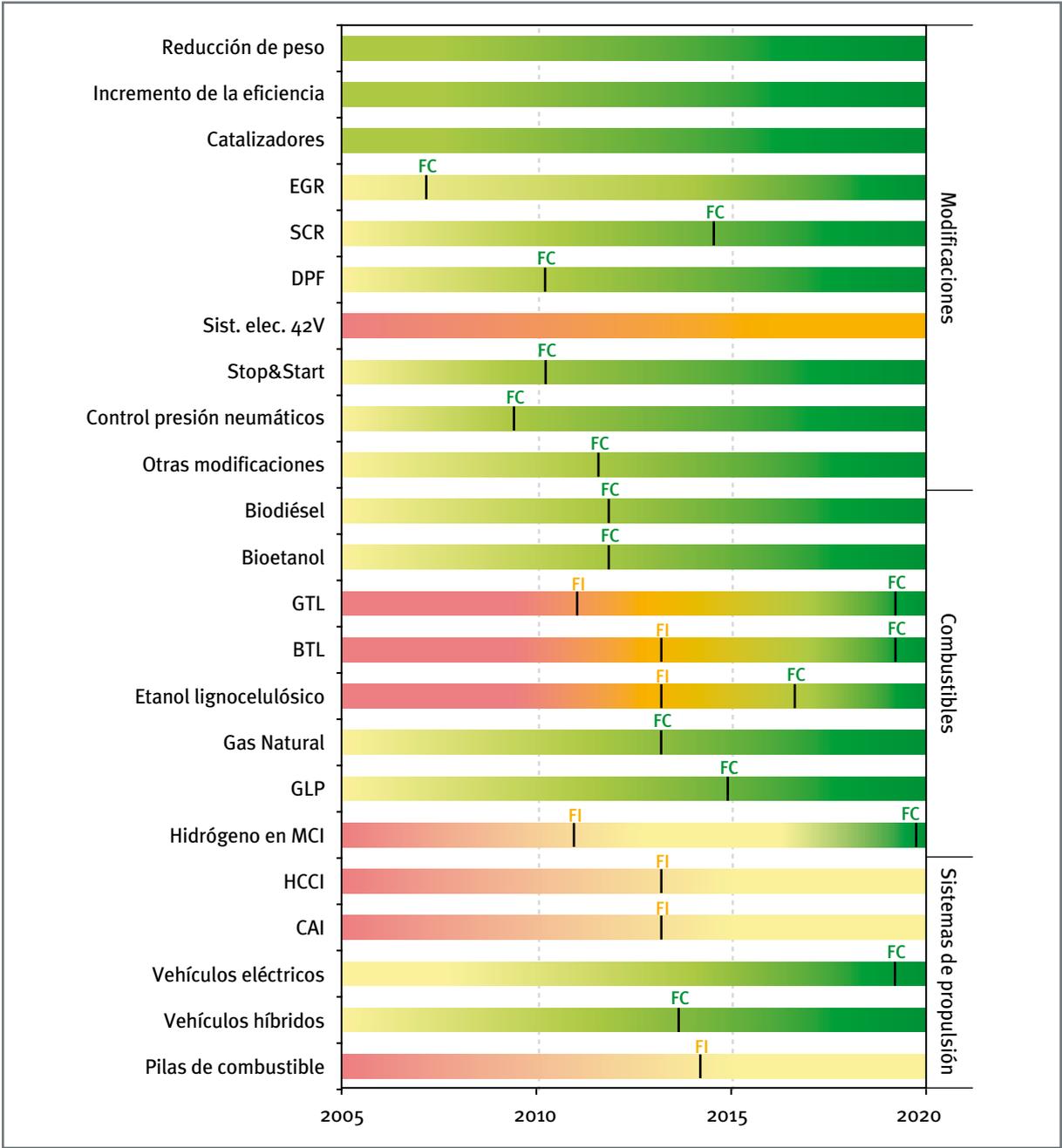


Figura 54. Resumen final de las hojas de ruta de las diferentes modificaciones en los motores convencionales, de los nuevos sistemas de propulsión y de los combustibles alternativos

Fuente: Elaboración propia

En definitiva, el panorama probable en el año 2020 seguirá dominado por un alto porcentaje de los vehículos de gasolina y diésel. Eso sí, éstos serán más eficientes que los actuales, sobre todo los vehículos de gasolina cuyo rendimiento tiene aún un mayor margen de mejora.

En cuanto a los combustibles alternativos, es probable que además se alcance el objetivo europeo de que éstos representen en el año 2020 el 20% del consumo total de combustibles. Ello se conseguirá fundamentalmente

mediante el uso de biocarburantes y gas natural. También el combustible “gas a líquido” (GLP) jugará un cierto papel en la diversificación de los combustibles. Por su parte, el hidrógeno participará igualmente en dicha diversificación, al principio principalmente como combustible en vehículos con motor de combustión interna alternativos. A largo plazo, estos vehículos serán sustituidos por los vehículos de pila de combustible, debido a la mayor eficiencia de estos últimos.

La cuota de mercado de los vehículos híbridos se prevé que alcance aproximadamente el 10% del total de vehículos en 2015, lo que posibilitará un mejor aprovechamiento energético de los combustibles tradicionales.

Finalmente, la pila de combustible alimentada con hidrógeno se perfila como la mejor solución a largo plazo, aunque habrá que esperar hasta después del año 2020 para que se introduzca a gran escala en el mercado.



Anexos

Anexo I: Glosario de términos y siglas

Biocarburante: biocombustible líquido cuyas especificaciones técnicas son equivalentes a las del carburante fósil al que sustituye en los motores de automoción.

Biocombustible: combustible obtenido a partir de una gran variedad de fuentes de biomasa.

Biodiésel: combustible biodegradable que se utiliza en motores diésel y que se produce mediante la transesterificación de grasas o aceites orgánicos. Una de sus principales aplicaciones es como combustible en el sector del transporte.

Bio-DME: DME (véase más adelante la definición de DME) producido a partir de bio-fuentes. El bio-DME, por ejemplo, puede producirse a partir de biometanol mediante deshidratación catalítica o a partir de gas sintético mediante un proceso denominado, precisamente, síntesis DME.

Bioetanol: alcohol del etano obtenido a partir de biomasa. Compuesto químico que se puede utilizar como combustible y que procede de la fermentación de los azúcares y/o del almidón.

Biohidrógeno: hidrógeno producido a partir de biomasa. Se obtiene mediante el reformado de gas metano que, previamente, se haya obtenido mediante procesos de gasificación de la biomasa.

Biomasa: materia orgánica renovable utilizada para la producción de energía. El concepto biomasa incluye las cosechas agrícolas, los residuos o desechos de las cosechas, los desechos de la madera, el estiércol, etc.

Biometanol: metanol producido a partir de biomasa.

BTL (Biomass To Liquid o, en castellano, biomasa a líquido): proceso termoquímico que se utiliza para obtener combustibles líquidos a partir de biomasa. Se basa en la obtención de un gas de síntesis mediante gasificación de la biomasa que posteriormente se transforma en combustible líquido mediante un proceso de síntesis conocido como Fischer-Tropsch.

Pila de combustible: dispositivo electroquímico sin partes móviles que convierte la energía química de un combustible, como el hidrógeno, y un oxidante, como el oxígeno, directamente en electricidad. Los principales componentes de una célula o pila de combustible son los electrodos activados catalíticamente y el electrolito a través del cual se desplazan para conducir los iones entre los dos electrodos. El electrodo para el combustible se denomina ánodo y el electrodo para el oxidante cátodo.

CO (Monóxido de carbono): gas tóxico que se produce como consecuencia de la combustión incompleta del carbono.

CO₂ (Dióxido de carbono): es el gas invernadero de origen antropogénico con mayor incidencia en el denominado efecto invernadero. Se produce en los procesos de combustión en los que interviene el carbono.

COV (Compuestos Orgánicos Volátiles): son todos aquellos hidrocarburos que, o bien se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente, o bien son muy volátiles a dicha temperatura. El número conocido de estos compuestos COVs supera el millar, pero los más abundantes en el aire son: metano, tolueno, n-butano, i-pentano, etano, benceno, n-pentano, propano y etileno. Se trata de compuestos que participan activamente en numerosas reacciones químicas, tanto en la troposfera como en la estratosfera, contribuyendo a la formación del smog (o niebla) fotoquímico y al efecto invernadero. Además, son compuestos precursores del ozono troposférico.

Combustible alternativo: el término combustible alternativo proviene de la Directiva Europea de Biocombustibles (2003/30/EC) e incluye: bioetanol, biodiésel, biogás (obtenido a partir de procesos de gasificación o de la digestión de la biomasa), bio-metanol (un producto tóxico), biodimetiléter, bio-ETBE (éter etil terbutílico), bio-MTBE (éter metil terbutílico), biocombustibles sintéticos (combustibles similares al diésel o la gasolina), biohidrógeno (hidrógeno obtenido de energías renovables mediante electrolisis o mediante reformado de hidrógeno a partir de biometanol), y aceite vegetal puro.

CTL (Coal To Liquid, o carbón a líquido): proceso termoquímico que se utiliza para obtener combustibles líquidos a partir del carbón. Se basa en la gasificación del carbón para producir un gas de síntesis que, posteriormente, se transforma en combustible líquido mediante un proceso denominado síntesis de Fischer-Tropsch.

Diésel Fischer-Tropsch: el diésel Fischer-Tropsch (FT) se produce utilizando tecnología de conversión del gas a líquido (véase más adelante la definición del Gas to Liquid – GTL).

Diésel HTU: diésel obtenido de la biomasa húmeda utilizando procesos de alta temperatura y presión.

DME (Dimetil Éter): el DME es un éter gaseoso incoloro y con un ligero olor. Es soluble en agua. Puede obtenerse del gas natural, el carbón o la biomasa. Cuando se obtiene a partir de la biomasa se considera una alternativa renovable al gas licuado del petróleo (GLP). Su número de cetano es 55, superior al del diésel fósil. El almacenamiento del DME es similar al del gas licuado de petróleo (GLP).

Dosado: relación entre la masa de combustible y la masa de aire utilizada en un proceso de combustión.

Dosado estequiométrico: relación entre la masa de combustible y la masa de aire que produce una combustión estequiométrica. La combustión estequiométrica es aquella en la que se quema todo el combustible sin que sobre, ni falte, nada de aire.

Dosado relativo: relación entre el dosado que se utiliza en un momento dado y el dosado estequiométrico.

ETBE (éter etil terbutílico): oxigenante del combustible utilizado como aditivo de la gasolina para aumentar el índice de octano y reducir el riesgo de auto-encendido del combustible. Parte de la formulación química del ETBE tiene un origen biológico.

FAME (Fatty Acid Methyl Ester): éster metílico producido por la transesterificación de un ácido graso.

Fischer-Tropsch: el proceso Fischer-Tropsch es un proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos (gasolina, queroseno, gasóleo y lubricantes) a partir de gas de síntesis. El gas de síntesis está formado por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). Este proceso fue inventado por los alemanes Franz Fischer y Hans Tropsch en los años 1920.

FFV (Flexible Fuel Vehicle, o vehículo de combustible flexible): vehículo diseñado para funcionar con mezclas de gasolina sin plomo y etanol. Los vehículos de combustible flexible admiten mezclas de hasta un 85% de etanol.

GLP (Gas Licuado del Petróleo): mezcla de hidrocarburos (normalmente propano y butano) que se extrae de los yacimientos de gas natural o se obtiene a partir de procesos de refinado del petróleo crudo. El gas licuado del petróleo se utiliza principalmente como materia prima en la industria química, como combustible para calefacción, y como combustible para vehículos.

GNC: Gas Natural Comprimido.

GNL: Gas Natural Licuado.

GTL (Gas To Liquid o, en castellano, gas a líquido): proceso termoquímico que se utiliza para obtener combustibles líquidos a partir del gas natural. Se basa en la obtención, a partir del gas natural, de un gas de síntesis que posteriormente se transforma en combustible líquido mediante un proceso denominado síntesis de Fischer-Tropsch.

HC (Hidrocarburos): hidrocarburos que quedan sin quemar tras la combustión. Los hidrocarburos están formados por carbono e hidrógeno.

Índice de cetano: unidad que expresa la facilidad con la que se inflama el combustible en los motores diésel.

Índice de octano: unidad que expresa el poder antidetonante de una gasolina u otro carburante en relación con una cierta mezcla de hidrocarburos que se toma como referencia.

Isobutileno: producto petroquímico obtenido en las refinerías. Cuando el isobutileno reacciona con el metanol se forma éter metil terbutílico (MTBE); cuando lo hace con el etanol se forma éter etil terbutílico (ETBE). Ambos productos son oxigenantes y, cuando se usan como aditivos, incrementan el número de octano de los combustibles.

Licuefacción directa del carbón: la licuefacción directa del carbón, también conocida como proceso Pott-Broche, es un proceso químico que convierte el carbón directamente en una mezcla de hidrocarburos líquidos denominada “crudo sintético”.

MCI (Motor de Combustión Interna): cualquier motor, alternativo o rotativo, en el que la combustión se produce en el interior de una cámara de combustión en el motor.

MEC (Motor de Encendido por Compresión): en los motores de encendido por compresión la inflamación de la mezcla aire-combustible se produce espontáneamente al comprimirse dicha mezcla y producirse un elevado aumento de la presión y de la temperatura en el interior de los cilindros.

MEP (Motor de Encendido Provocado): en los motores de encendido provocado la inflamación de la mezcla aire-combustible se provoca cuando la bujía situada en el interior del cilindro produce una chispa.

NO (Óxidos de nitrógeno): los óxidos de nitrógeno son gases formados por oxígeno y nitrógeno y se producen en la mayor parte de los procesos de combustión en los que se alcanzan altas temperaturas. Son uno de los causantes de la llamada lluvia ácida.

PAH: Hidrocarburo Aromático Policíclico.

PM (Particulate Matter o, en castellano, partículas de material en suspensión): son todas las partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en el aire. La mayor parte de ellas son perjudiciales para la salud. Las partículas están formadas por una mezcla compleja variada que contiene, entre otros elementos, polvo, polen, hollín, humo y pequeñas gotas.

RME (Rapeseed Methyl Ester, o éster de metil de colza): aceite de colza procesado para posibilitar su uso en vehículos con un solo depósito de combustible.

SCR (Selective Catalytic Reduction o, en castellano, reducción catalítica selectiva): el objetivo de esta tecnología es reducir las emisiones que se generan durante la combustión del motor. La reducción catalítica selectiva se lleva a cabo en un convertidor catalítico que forma parte del sistema de escape del vehículo.

SO₂ (Óxido de azufre): gas incoloro, de fuerte olor e irritante. En altas concentraciones genera problemas respiratorios. Es muy soluble y su combinación con el agua produce ácido sulfúrico. Es uno de los compuestos responsables de la lluvia ácida.

Sunfuel: término utilizado para designar el combustible obtenido a partir de biomasa (BTL) mediante procesos de síntesis Fischer-Tropsch.

SVO/PPO (Straight Vegetable Oil/Pure Plant Oil o, en castellano, aceite vegetal directo/aceite puro de plantas): aceite vegetal sin modificar. Muchos aceites vegetales pueden tener propiedades similares a las del combustible diésel, si bien suelen tener una viscosidad mayor y una menor estabilidad a la oxidación. Las características del SVO dependen en gran medida de la materia prima utilizada.

Synfuel: término utilizado para designar el combustible obtenido a partir de gas natural (GTL) mediante procesos de síntesis Fischer-Tropsch.

VEH (Vehículo Eléctrico Híbrido): un vehículo impulsado por dos o más fuentes de energía, una de las cuales es la electricidad. Los VEH pueden combinar en un único tren de propulsión el motor y el combustible de un vehículo convencional, por un lado, y las baterías y el motor eléctrico de un vehículo eléctrico, por otro.

Anexo II: Índice de figuras y tablas

Lista de figuras

Figura 1	Diagrama presión-volumen del ciclo Otto	16
Figura 2	Diagrama presión-volumen del ciclo Diesel	17
Figura 3	Diagrama presión-volumen del ciclo Atkinson	17
Figura 4	Esquema de la máquina de Carnot	18
Figura 5	Diagrama presión-volumen del ciclo Carnot	19
Figura 6	Límites de emisiones para la homologación de vehículos de gasolina	20
Figura 7	Límites de emisiones para la homologación de vehículos diésel	21
Figura 8	Incremento de las emisiones de CO ₂ durante la desulfuración de los combustibles.	22
Figura 9	Emisiones de monóxido de carbono (CO) antes y después del catalizador en función del dosado relativo	26
Figura 10	Emisiones de hidrocarburos (HC) en partes por millón (ppm) antes y después del catalizador en función del dosado	26
Figura 11	Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO _x) en partes por millón (ppm) antes y después del catalizador en función del dosado	26
Figura 12	Relación entre la tasa de recirculación de gases de escape en porcentaje (%) y las emisiones de NO _x respecto a las emisiones sin recirculación	28
Figura 13	Eficiencia en la reducción de NO _x (%) en función de la temperatura del gas de escape	29
Figura 14	Características de las materias primas más utilizadas actualmente para la obtención de biodiésel	44
Figura 15	Producción de biodiésel	44
Figura 16	Reacción de transesterificación	45
Figura 17	Reacción de esterificación	46
Figura 18	Distribución de estaciones de servicio que ofrecen biocombustibles en España (año 2007)	47
Figura 19	Cambio en las emisiones de NO _x , PM, CO y HC en función del porcentaje de mezcla de biodiésel (%)	50
Figura 20	Producción mundial de biodiésel entre 2000-2005 en millones de toneladas equivalente de petróleo (Mtep, datos de 2006)	52
Figura 21	Evolución de la producción de biodiésel en la Unión Europea desde el año 2000 en toneladas	52
Figura 22	Producción total de biocombustibles en los diferentes países de la Unión Europea en 2005	53
Figura 23	Objetivos de biocarburantes propuestos en el Plan de Energías Renovables de España 2005-2010.	55
Figura 24	Producción de bioetanol	59
Figura 25	Evolución de la producción mundial de bioetanol entre 2000 y 2005, en millones de toneladas equivalente de petróleo-Mtep (datos de 2006)	65
Figura 26	Producción de bioetanol en la Unión Europea desde el año 2000 hasta el año 2005	66
Figura 27	Consumo de carburantes en España 2006	67
Figura 28	Objetivos de biocarburantes propuestos en el Plan de Energías Renovables de España 2005-2010	68
Figura 29	Esquema del proceso “gas a líquido” (GTL)	73
Figura 30	Esquema del proceso “biomasa a líquido” (BTL)	73
Figura 31	Comparación entre las emisiones del combustible diésel con bajo contenido en azufre y las emisiones del combustible sintético Shell GTL (g/km)	76

Figura 32	Esquema de las etapas desde exploración-uso del gas natural.	87
Figura 33	Instalaciones que suministran gases licuados del petróleo (GLP) en España	103
Figura 34	Principales componentes de un vehículo eléctrico.	114
Figura 35	Vías de obtención de hidrógeno	129
Figura 36	Emisiones de CO ₂ de las diferentes combinaciones de combustible y sistemas de propulsión (g/km)	151
Figura 37	Energía consumida en el caso de los diferentes combustibles y sistemas de propulsión.	155
Figura 38	Evolución y previsión del consumo de biocarburantes en España	160
Figura 39	Incremento porcentual estimado en el precio de venta de los vehículos respecto al precio en el año 2002 de un vehículo convencional de inyección indirecta de gasolina.	163
Figura 40	Evolución en España entre 1995 y 2003 del número de vehículos de gas natural (en color verde), de estaciones de abastecimiento (en color rojo) y del volumen de gas vendido en millones de metros cúbicos (en azul).	165
Figura 41	Estimación del consumo global de GLP para automoción a nivel mundial en el año 2010	166
Figura 42	Estimación de las ventas de vehículos eléctricos híbridos en Europa en el periodo 2000-2010 ...	167
Figura 43	Esquema del método seguido para el cálculo de los indicadores de cada tecnología o combustible	173
Figura 44	Hoja de ruta hasta 2030 propuesta por EUCAR para la entrada en Europa de diferentes tecnologías	194
Figura 45	Hoja de ruta de los combustibles y los vectores energéticos en el periodo 2000-2030	196
Figura 46	Hoja de ruta de las diferentes tecnologías de sistemas de propulsión en el horizonte temporal 2000-2030.	197
Figura 47	Hoja de ruta de entrada de las tecnologías de producción del hidrógeno	198
Figura 48	Posible evolución del parque de vehículos de hidrógeno hasta el año 2020	199
Figura 49	Evolución de los indicadores globales de viabilidad futura de los diferentes combustibles	201
Figura 50	Evolución de los indicadores globales de los nuevos desarrollos y sistemas de propulsión	203
Figura 51	Hoja de ruta de las modificaciones en los vehículos actuales y sus motores actuales	205
Figura 52	Hoja de ruta de la entrada en el mercado de los combustibles alternativos.	207
Figura 53	Hoja de ruta de la entrada en el mercado de los nuevos sistemas de propulsión	209
Figura 54	Resumen final de las hojas de ruta de las diferentes modificaciones en los motores convencionales, de los nuevos sistemas de propulsión y de los combustibles alternativos	210

Lista de tablas

Tabla 1	Propiedades físico químicas del biodiésel	43
Tabla 2	Efecto sobre las emisiones de añadir un 20% de biodiésel al diésel fósil	50
Tabla 3	Propiedades físico químicas del bioetanol	58
Tabla 4	Comparación de las emisiones del bioetanol mezclado al 10% frente a la gasolina sin mezclar. ...	64
Tabla 5	Comparación multicriterio entre los combustibles “gas a líquido”, “biomasa a líquido” y “carbón a líquido” (GTL/BTL/CTL)	78
Tabla 6	Plantas de producción de combustible sintético según el método Fischer-Tropsch (datos de febrero de 2007)	78
Tabla 7	Composición típica del gas natural	86
Tabla 8	Estadísticas de vehículos impulsados por gas natural (vehículos nuevos y vehículos adaptados) y de estaciones de suministro	94

Tabla 9	Emisiones (Estudio Traffic&Public Transport Authority)	100
Tabla 10	Comparación de las emisiones de vehículos que utilizan GLP y de los vehículos diésel y gasolina que cumplen con la normativa “Euro 3”	106
Tabla 11	Mercado de gases licuados del petróleo (GLP) para automoción en Europa	109
Tabla 12	Clasificación de los vehículos según su funcionamiento híbrido.	121
Tabla 13	Ventajas e inconvenientes de las diferentes modificaciones en los sistemas tradicionales de propulsión	148
Tabla 14	Ventajas e inconvenientes de los diferentes combustibles alternativos.	150
Tabla 15	Ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas de propulsión alternativos	151
Tabla 16	Emisiones comparativas de los nuevos sistemas de propulsión y combustibles alternativos en comparación con los combustibles convencionales a los que sustituyen	154
Tabla 17	Grado de desarrollo tecnológico y madurez de las infraestructuras en España para los diferentes sistemas de propulsión y combustibles alternativos	156
Tabla 18	Objetivos de uso de combustibles alternativos propuestos por la Comisión Europea en 2001	159
Tabla 19	Indicadores escogidos para estimar la viabilidad futura y la ruta de entrada de los diferentes sistemas de propulsión y combustibles alternativos	170
Tabla 20	Coefficientes de ponderación para cada tecnología o combustible alternativo	171
Tabla 21	Disponibilidad de recursos energéticos y materias primas	173
Tabla 22	Grado de desarrollo tecnológico	174
Tabla 23	Infraestructura de abastecimiento de combustible.	175
Tabla 24	Número de modelos de vehículos disponibles con cada tecnología	176
Tabla 25	Volumen de ventas de cada tecnología o combustible alternativo	177
Tabla 26	Coste global de la tecnología (coste total del vehículo más coste y del consumo de combustible	178
Tabla 27	Emisiones de gases de efecto invernadero.	179
Tabla 28	Emisiones de contaminantes locales.	180
Tabla 29	Consumo energético total	181
Tabla 30	Compromiso político, marco legal y administrativo.	182
Tabla 31	Beneficios sociales, incluida la generación de empleo	183
Tabla 32	Valoración por parte de los usuarios potenciales	184
Tabla 33	Resumen de los indicadores correspondientes al encendido por compresión de carga homogénea (HCCI)	185
Tabla 34	Resumen de los indicadores correspondientes para el autoencendido controlado (CAI)	186
Tabla 35	Resumen de los indicadores correspondientes para el biodiésel	186
Tabla 36	Resumen de los indicadores correspondientes para el bioetanol	187
Tabla 37	Resumen de los indicadores correspondientes para el combustible sintético “gas a líquido” (GTL)	188
Tabla 38	Resumen de los indicadores correspondientes para el combustible sintético “biomasa a líquido” (BTL)	188
Tabla 39	Resumen de los indicadores correspondientes para el etanol lignocelulósico	189
Tabla 40	Resumen de los indicadores correspondientes para el gas natural	190
Tabla 41	Resumen de los indicadores correspondientes para el gas licuado del petróleo (GLP)	190
Tabla 42	Resumen de los indicadores correspondientes para los vehículos eléctricos	191
Tabla 43	Resumen de los indicadores correspondientes para los vehículos híbridos	192

Tabla 44	Resumen de los indicadores correspondientes para los vehículos impulsados por pila de combustible	192
Tabla 45	Resumen de los indicadores correspondientes para los motores de combustión interna (MCI) alimentados con hidrógeno	193
Tabla 46	Comparación de las previsiones de EARPA y EUCAR en relación al reparto de combustibles en el transporte por carretera para el horizonte 2015-2020	195
Tabla 47	Resumen de los indicadores globales de viabilidad futura de los diferentes combustibles alternativos	201
Tabla 48	Indicadores globales correspondientes a las modificaciones técnicas y a los nuevos sistemas de propulsión	203
Tabla 49	Fechas de introducción y de consolidación de los diferentes combustibles alternativos.	206
Tabla 50	Fechas de introducción y de consolidación de los nuevos sistemas de propulsión.	208



Bibliografía y Fuentes

- 1 <http://www.eea.europa.eu/pressroom/newsreleases/transportes-2014-de-nuevo-a-la-cola-en-el-cumplimiento-de-kyoto>, AEMA, 26 Febrero 2007.
- 2 Transportation and climate change: Opportunities, challenges and long term strategies, IPIECA (USA), 12-13, 2004.
- 3 Inventario de emisiones de GEI de España (1990-2005). Comunicación a la CE.
- 4 Libro Blanco: La política de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad. Comisión Europea.
- 5 Termodinámica, Kurt C. Rolle, 2006, Ed. Pearson Education.
- 6 Motores de Combustión interna alternativos, M. Muñoz, F. Payri, 1989, Ed. Sección de publicaciones de la ETS de Ingenieros Industriales. Fundación General UPM.
- 7 Future Diesel: Exhaust gas legislation for passenger cars, Lightlight-duty commercial vehicles, and heavy duty vehicles-Updating of limit values for diesel vehicles, U. Bundes section I.3.2, Federal Agency, 2003. Editado. Stefan Rodt.
- 8 Light Vehicle Diesel Engine Technologies and Market Propects in the United States, Frost&Sullivan, 2005.
- 9 Directiva 2003/17/CE, (que modifica la Directiva 98/70/CE), 2003.
- 10 Proyecto TREATISE (<http://www.treatise.eu.com/>).
- 11 <http://www.as-sl.com>.
- 12 Mitsubishi Motors.
- 13 Agencia de Protección medioambiental de EE.UU. (EPA: <http://www.epa.gov/>).
- 14 Engine Technology analysis: Air/Fuel Systems: Background on air/fuel system Technology, Frost&Sullivan, 2005.
- 15 Citroën (<http://www.citroen.es/CWE/es-ES/RANGE/PrivateCars/C3/Presentation/c3stopstart.htm>).
- 16 Biocarburantes en el transporte, Manual de energías renovables, 7, IDAE, 2006.
- 17 Biodiesel: the clean, Green green fuel for diesel engines, NREL, 2000.
- 18 Fuels trends in Europe, .Nylund.N, O.VTT Energy, 2000.
- 19 Fact sheet: Biodiesel Usage, BAA, 2003b.
- 20 Especificación diesel CEN [EN 590:1993].
- 21 RD 398/1996.
- 22 RD 1728/1999, BOE nº 272, 39659-39664, 1999.
- 23 Norma UNE-EN 14214/2003.
- 24 Wearcheckiberica. Boletín Mensual, sep 2004.
- 25 Biocarburantes: calidad y especificaciones, J. A. Martínez, L. A. Sánchez, 2007.
- 26 Informe de vigilancia tecnológica: “Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol”, J. M. García, J. A. García, CEIM, Madrid, 2006. Fundación para el conocimiento de Madrid.
- 27 Ésteres metílicos como combustibles. Materias primas y propiedades. Vicente, G., Martínez, M., Aracil, J. Tecno-ambiente 85 (10), 9-12, 1998.

- 28 Biodiésel: una alternativa real al gasóleo mineral. Vicente, G., Martínez, M., Aracil, J. Tecno-ambiente 377 (3), 135-145, 2001.
- 29 <http://www.accion.es>.
- 30 An alkalicatalyzed transesterification process for high free fatty acid oils, Dorado, M. P., Ballesteros, E., Almeida, J. A., Schellet, C., Lohrlein, H. P., Krause, R. Trans. ASAE, 45 (3): 525-9, 2002.
- 31 Biocombustibles para motores de automoción. Congreso Internacional sobre Innovación Tecnológica y Desarrollo empresarial para vehículos e infraestructuras de tráfico. Francisco, V. Tinaut Fluixá. Universidad de Valladolid, CIDAUT.
- 32 RD 1700/2003, BOE 307, 45961-45971, 2003.
- 33 Directiva 2003/30/CE.
- 34 RD 774/2006.
- 35 RD 1165/1995, BOE 179, 1995.
- 36 Ley 40/1995, BOE 303, 1995 (por la que se modifica la Ley 38/1992).
- 37 RD 1739/2003, BOE 11, 2004.
- 38 From the fryer to the Fuel Tank: The complete Guide to using vegetable oil as an alternative fuel. Tickell, J., 2000, Ed. Veggie Van Publications.
- 39 Ministerio de Industria, Turismo y Comercio: (<http://oficinavirtual.mityc.es/carburantes/>).
- 40 Biodieselspain: (http://www.biodieselspain.com/mapa_biogasolinas.php).
- 41 The Influence of Biodiesel properties on Fuel Injection Equipments. J. Ullmann, R. Bosch, 2002.
- 42 Analysis for PIU on Transport in the Energy Review, Fergusson.M, Institute for European Environmental Policy, Final report 2001.
- 43 Biodiesel: Handling and Use Guidelines, NRLE, 2001.
- 44 Citroën y Peugeot. Información recogida en el Proyecto SUGRE del Programa IEE de la Comisión Europea.
- 45 IVECO.
- 46 Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte (CIEMAT).
- 47 Eucar-Concawe Reports (2005-2006).
- 48 Biocombustibles, Pere Valls i Puyalto, Acta 35, 53-60, 2005.
- 49 A comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, Technical report, EPA, 2002b.
- 50 Diesel Engines: Environmental Impact and Control. J. of Air and Waste Management, Lloyd A. C, Cackett. T. A., Vol 51, 2001.
- 51 Biocarburantes de 2º generación. Ballesteros, M. CIEMAT. Genera 2007.
- 52 Biocarburantes: estado actual y perspectivas. Ballesteros, M. CIEMAT, 2006.
- 53 Biodiesel in Europe: Systems Analysis, Non-technical Barriers,, F. Eibensteiner and H. Danner, Sysan IEA, 2000d.
- 54 Report EUR 20279 EN, 2002.
- 55 RD 61/2006, BOE 41, 6342-6357, 2006.
- 56 Biofuel Production, IEA, 2007.

- 57 EurObserv'ER 2006.
- 58 Libro Blanco de la Comisión Europea de Energías Renovables. LBC, 1997.
- 59 European Biodiesel Board, 2006: (<http://www.ebb-eu.org>).
- 60 Plan de Energías Renovables en España 2005-2010 (PER).
- 61 Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000-2010 (PFER).
- 62 Política Agraria Común de la Unión Europea, (PAC), 2003.
- 63 Asociación de Productores de Energías Renovables. (APPA -: <http://www.appa.es>).
- 64 Biofuels-Market Barriers. Agore's homepage, 2001.
- 65 Especificación gasolina CEN [EN 228:1999].
- 66 Technical study on fuels technology related to the European Auto-Oil II Programme, 2000.
- 67 Bioethanol looking to become the driving force in transport fuels, Akzo Nobel, 2001.
- 68 Bioethanol added to fuel. STOA, briefing note 07/2001.
- 69 Alternative fuels: E85 and Flex fuel Vehicles, EPA 420, 2006.
- 70 Ford (http://www.ford.es/ie/environment/-/-/env_flexi_vehicle/-/-/).
- 71 Saab (<http://www.saab.com/main/GLOBAL/en/pressreleases/14/index.shtml>; <http://www.saab.com/main/GLOBAL/en/pressreleases/12/index.shtml>).
- 72 Volvo (<http://www.volvocars.com/es/campaigns/Misc/Flexifuel/Pages/default.aspx>; <http://www.volvocars.com/es/footer/about/environment1/Pages/default.aspx>).
- 73 Renault (<http://www.renault.es/descubre-renault/medio-ambiente/descubriendo-los-biocarburantes-renault/index.jsp>).
- 74 Peugeot (<http://www.tv-es.peugeot.com/>).
- 75 Citroen (http://www.citroen.com/CWW/en-US/RANGE/PrivateCars/C4_5p/default/BIOFLEX.htm).
- 76 Scania (http://www.scania.it/Images/Bus%20a%20bioetanol_tcm78-152043.pdf).
- 77 Utilización de bioetanol. Abengoa Bioenergy, 2006: (<http://www.abengoabioenergy.com/research/index.cfm?page=9&lang=2>; <http://www.abengoabioenergy.com/NewTechnologies/index.cfm?page=13&lang=2>).
- 78 <http://www.oxydiesel.com/products/e-diesel.html>.
- 79 Life Cycle Assessment of Wood- based- ethanol-Diesel blends (E-diesel). Rodríguez, J. C, Chalmers University of technology, 2003 (<http://www.dantes.info/Publications/Publication-doc/LCA%20of%20E-Diesel-public.pdf>).
- 80 <http://www.e-diesel.org/>.
- 81 E-Diesel: An immediate & practical air quality and energy security solution, Rae. A, BAQ, 2002.
- 82 Biofuels market position and future potential, Agores homepage, 2001.
- 83 Performance analysis of SI engine with ethyl tertiary butylether (ETBE) as a blending component in motor gasoline and comparison with other blending components, Baur, Kim. B, Jenkins P.E, Cho.Y, Center for Engine Technology. Mechanical Engineering Department, 1990, University of Nebraska-Lincoln.
- 84 Distribución de biocarburantes CLH, Genera 2007.

- 85 Alcohol for Motor Fuels. CSU, 2001 (<http://www.ext.colostate.edu/pubs/farmmgt/05010.html>).
- 86 Biofuels, a solution for climate change, DOE, U.S. Dept. of Energy, Office of Transportation Technologies, 1999.
- 87 Questions and answers about E85 and Flexible Fuel Vehicles, ICGA, 2003.
- 88 Biofuel for transport: an international perspective, IEA, 2000.
- 89 The Newest Silverado: a production feasible ethanol (E85) conversion by the University of Nebraska-Lincoln, Otte C. et al, University of Nebraska-Lincoln, Department of Mechanical Engineering and SAE, Inc, 2000.
- 90 Situación actual y futuro de la biomasa: Producción de biocombustibles líquidos, bioetanol y ETBE, Ballesteros, I. 2002, CIEMAT, 2002.
- 91 Informe CIEMAT. Cabrera, J. A., 2006.
- 92 Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el Transporte. Fase I: Análisis del ciclo de Vida Comparativo del Etanol de Cereales y de la Gasolina. Energía y Cambio climático, CIEMAT, 2006.
- 93 Energy in Europe, European Energy to 2020, a scenario approach, 1996.
- 94 Utbredning i världen, Brasilien, 2000.
- 95 Project data ALo89, Agore's homepage 2001.
- 96 Utvecklingskedjan, Regelverk, 2000.
- 97 Libro Verde de la Comisión Europea: Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético [COM(2000) 769].
- 98 Corporación de reservas estratégicas de productos petrolíferos (CORES - : <http://www.cores.es>).
- 99 Repsol YPF (<http://www.repsolypf.es>).
- 100 Emissions form Synthetic Fuels. ASFE Position Paper, 2007.
- 101 A new gas to liquids (GTL) or gas to ethylene (GTE) technology, K. R. Hall, Catalysis today, Vol 106, 1-4, (2005), 243-246.
- 102 F. Fischer and H. Tropsch, Brenstoff-Chem, 7 (1926) 97.
- 103 Enagas, Javier Alcaide, 2006 (http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/GTs/GT10/GT-10_ppt_JavierAlcaide.pdf).
- 104 Fischer-Tropsch based GTL Technology a new process?, L. P. Dancuart, A. P Steynberg, Studies in Surface Science and Catalysis, 163 (2007) 379-399.
- 105 GTL Technology challenges and opportunities in Catalysis, P. Samuel. B. Catalysis Society of India 2 (2003) 82-99.
- 106 Production of Transportation fuels from Biomass. A. A. Lappas, S. S. Voutetakis, N. Drakaki, M. Papetron, L.A. Vasalos, .CPERI, CERTH (2004).
- 107 http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/BTL_Berlin_2006/11_heinrich.pdf.
- 108 Volkswagen AG: Principios de la movilidad sostenible.
- 109 <http://futurecoalfuels.org/technology.asp>.
- 110 The potential of gas to liquid technology in the energy market. R. Chedid, M. Kobrosly, R. Ghajar, Energy Policy, 35 (2007), 4799-4811.

- 111 Qatar Petroleum and Sasol collaborate in GTL project, . Focus on Catalysis, (2005), 4.
- 112 <http://petrochemical.ihs.com/news-0602/doe-ctl-projects.jsp>.
- 113 China reins in fast growth of coal to liquid fuels projects, W. Qui . Xinhua News Agency, 2006.
- 114 Gas to liquid for automotive fuel. Shell, 2006: (http://www.shell.com/static/shellgasandpower-en/downloads/what_is_gas_to_liquids/gtl_automotive_factsheet.pdf).
- 115 Particle size distribution from a GTL engine, L. Xinling, Z. Huang, J. Wang, W. Zhang, Science of the total Environment, 382 (2007) 295-303.
- 116 GTL fuel: driving the growth of the GTL market, P. Jory. Shell Gas&Power. 23rd World Gas conference, 2006.
- 117 <http://realenergy.shell.com/>.
- 118 http://www.eere.energy.gov/afdc/fuels/emerging_coals_what_is.html.
- 119 <http://www.worldcoal.org/pages/content/index.asp?PageID=423>.
- 120 <http://www.aaas.org/spp/cstc/briefs/coaltoliquid/>.
- 121 Influence of the feed Gas Composition on the Fischer-Tropsch Synthesis in Commercial Operations, Y. Lu, T. Lee, . J. Natural Gas Chemistry, 16(2007), 329-341.
- 122 CO₂ abatement in gas to liquids plants, H. Audus, G. Chol, A. Heath, S. S. Tam. Studies in Surface Science and Catalysis, 136 (2001) 519-524.
- 123 Carburantes Sintéticos GTL, CTL, BTL. Curso: Combustibles de automoción. Profesor: Jesús Delgado Diestre. Instituto Superior de la Energía.
- 124 GTL Transport Fuel. Shell Gas and Power, 2003 (<http://www.mati.go.jp/report/downloadfiles/531112b51g.pdf>).
- 125 <http://www.greencarcongress.com/2005/12/secondgeneratio.html> (consultado en 2007).
- 126 http://www.choren.com/en/choren_industries/information_press/press_releases/nid=55.
- 127 <http://www.nestoil.com/Default.asp?path=1,41,539,7516,7522>.
- 128 NExBTL-Biodiesel fuel of the second generation, L. Rantaman, R. Linnalia, P. Aakko, T. Harju, SAE (2005).
- 129 Biodiesel plant planned for Singapore, Pump Industry Analyst, 3 (2008).
- 130 Neste Oil and OMV, Plan large-scale NExBTL Plant, Green Car Congress, (2006).
- 131 http://www.abengoa.es/sites/abengoa/resources/pdf/gobierno_corporativo/informes_anuales/2005/2005_Tom01_IA_Bioenergia.pdf.
- 132 Market development of alternative fuels, .Repsol Gas, 2003.
- 133 Biofuels from lignocellulosic material-in the Norwegian context 2010 - Technology, potential and cost, NTNU, 2005.
- 134 <http://www.refuel.eu/biofuels/>.
- 135 Dimethylether (DME) as an alternative fuel, T.A. Semeisberger, R.L.Borup, H.L. Greene, J.Power Sources, 156(2006)497-511.
- 136 Environmental and economic analysis of methanol production process via biomass gasification, K. Kumabe, S. Fujimoto, T. Yamagida, M. Ogata, T. Fukuda, A. Yabe, T. Minowa, . Fuel 87 (2007)1422-1427.

- 137 Status and perspectives of biomass-to-liquid fuels in the European Union. B. Kkavalov, S. D.Peteves, 2005.
- 138 Biomass-to-liquid fuels (Btl), Choren, 2005.
- 139 http://www-mile-bioethanol.org/doc/PR_NILE_05Deco6.pdf.
- 140 Progress in bioethanol processing, progress in energy and combustion Science. M. Balat, H. Balat, C. Öz, 2008, Article in Press.
- 141 Biogas as a resource-efficient vehicle fuel, P. Börjesson, B. Mattiasson. Trends in Biotechnology 26 (2008)7-13.
- 142 Study on the Autoxidation of Dimethyl Ether (DME). M. Naito, C. Radcliffe, Y. Hoshino, L. Xiungmin, M. Arai, M. Tanura.
- 143 A comparative study on the autooxidation of dimethylether (DME) comparison with diethylether (DEE) and diisopropylether (DIPE),. M. Naito, C. Radcliffe, Y. Hoshino, L. Xiungmin, M. Arai, M. Tanura, J. Loss Prevention in the Process Industries, 18 (2005) 469-473.
- 144 The economy of alternative fuels when including the cost of air pollution, B. Johansson, Transportation Research Part D: Transport and Environment 4(1999)91-108.
- 145 Biofuels under development, B.E. Kampan, L.C. den Boer, H.J. CroezenDelft, 2005.
- 146 http://www.greencarcongress.com/biomasstoliquids_btl/index.html.
- 147 Biomass to liquid-Btl, Implementation report Summary, 2006.
- 148 Natural Gas and other alternative fuels for transportation purposes, A. Vieira, Energy 10 (1985) 187-215.
- 149 Alternative and future fuels and energy sources for road vehicles, 999 <http://www.ghgenius.ca/reports.php?tag=Natural%20Gas>.
- 150 <http://www.procalc.org.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/466/1/images/gasnatural.pdf>.
- 151 Biogas as a resource-efficient-vehicle fuel, P. Börjesson, B. Mattiasson, Trends in Biotechnology 26 (2008) 7-13.
- 152 http://corporate.basf.com/en/innovationen/felder/energiemanagement/reden/-reden1.htm?getasset=file10&name=P-428e-Rott.pdf&id=Voo-l.L98C-ZYbcp*pw.
- 153 Biogas, scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in India context, S.S. Kapoli, V.K. Rajesh, R. Prasad, Renewable Energy, 30(2005) 1195-1202.
- 154 Process design of Synthetic Natural Gas (SNG) production using wood gasification, A. Durex, C. Friedli, F. Maréchai, J. Cleaner Production, 13 (2005) 1434-1446.
- 155 <http://www.omv.com/portal/01/com/>.
- 156 <http://www.gasnatural.com/servlet/ContentServer?gnpage=1-40-2¢ralassetname=1-40-1-4-2-1-0>.
- 157 <http://www.fuelmaker.com/Products/NaturalGasRefueling/RefuelingMethods/>.
- 158 http://www.omv.com/SecurityServlet/secure?cid=1191498070401&swa_id=695595808807.3583&swa_site=wps.vp.com.
- 159 http://portal.gasnatural.com/servlet/ContentServer?gnpage=1-10-1¢ralassetname=1-NOT-27022008-GNV_VALENCIA¢ralassettype=Noticia.
- 160 http://www.greencarcongress.com/2005/09/bosch_develops_.html.
- 161 <http://www.generac.com/PublicPDFs/0168170SBY.pdf>.



- 162 <http://www.greencarcongress.com/2008/03/vw-introduces-d.html>.
- 163 Engine Management For Gasoline, LP, CNG, Dual-Fuel Uses - Precision Governors LLC - Brief Article, M. Osenga, 2001, Diesel Progress North American Edition.
- 164 http://www.greencarcongress.com/2006/03/bosch_launches_.html.
- 165 <http://www.ngvglobal.com/en/technology/obvio-tri-fuel-cars-to-hit-u.s.-european-and-japanese-markets.html>.
- 166 http://www.greencarcongress.com/2004/11/lng_tractortrai.html.
- 167 <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/ngvtf/news.html>.
- 168 Environmental systems analysis of biogas systems. Part I: Full-cycle emissions, P. Börjesson, N. Berghund, Biomass and Bioenergy, 30 (2006) 469-485.
- 169 http://portalgasnatural.com/archivos/Castellano/Fundacion/Ponencia/20070418_Po6610.pdf.
- 170 <http://www.berr.gov.uk/files/file31209.pdf>.
- 171 Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context, JRC-Eucar-Concawe Reports, 2004.
- 172 Overcoming barriers to the implementation of alternative fuels for road transport in Europe, T. Steenburghen, E. López, J. Cleaner Production, 18 (2008) 577-590.
- 173 <http://www.iangv.org/ngv-statistics.html>.
- 174 http://www.sobrecoches.com/coches/citroen/c3/novedad_1_4i_gaz_naturel/texto.
- 175 <http://elinviernoquema.blogspot.com/2007/11/taxis-ecologicos.html>.
- 176 http://www.unionfenosa.es/webuf/ShowContent.do?contenido=CON_10_03_01&audiencia=1.
- 177 <http://www.mityc.es/Gas/Seccion/Sector/Futuro/>.
- 178 <http://www.mityc.es/GLP>.
- 179 <http://www.spainautogas.com/>.
- 180 http://www.aoglp.com/noticias/de_socios/ponencias/Autogas_Carburante_Alternativo.ppt#390,1, Autogas: un carburante alternativo para el momento actual.
- 181 BOE nº 292, (1982) 33565-33567. N-normas para el almacenamiento y suministro de GLP a granel para su utilización como carburante para vehículos de motor.
- 182 UNE 60630, normativa sobre estaciones de servicio de GLP para vehículos a motor.
- 183 <http://www.motorglp.com>.
- 184 RD 2140/85, modificado por la Orden 17/05/2000. H – homologación de vehículos a GLP.
- 185 RD 736/1988, modificado por CTE/3191/2002. T – Transformación de vehículos a GLP.
- 186 http://www.aoglp.com/noticias/de_socios/ponencias/Autogas_Carburante_Alternativo.ppt#390,1, Autogas: un carburante alternativo para el momento actual.
- 187 Informe sobre la situación de los Gases Licuados del Petróleo como carburante de automoción en España, CNE (2004).
- 188 Autogas: cuestión de futuro – Retos 2007, J. Luis Blanco, .AOGLP http://www.aoglp.com/noticias/de_socios/ponencias/Autogas_Cuestion_Futuro.ppt#258,1, Diapositiva 1.

- 189 The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression ignition engines – A review., Fuel, 87(2008)1014-1030.
- 190 On-road remote sensing of liquefied petroleum gas (LPG) vehicle – emissions measurement and emission factors estimation, Z.Ning, T.L.Chan, Atmospheric environment, 41(2007)9099-9110.
- 191 UNE-EN -589. Requisitos y métodos de ensayo del GLP Automoción.
- 192 UNE 60635. Requisitos de talleres para reparación y mantenimiento de vehículos a GLP.
- 193 <http://www.aeglp.com>.
- 194 The potential of methanol and LPG as new fuel for transportation, H. Menrad, G. Decker, R. Wegener, .Resources and Conservation, 10 (1983) 123-125.
- 195 Autobuses Urbanos de Valladolid. S.A. <http://www.auvasa.es/glp.htm>.
- 196 <http://www.eaaev.org>.
- 197 General Motors: <http://www.gm.com/explore/technology/electric/>.
- 198 http://www.evadc.org/ev_faq.html.
- 199 Baterías para vehículos eléctricos. M. L. Soria. Energía: Ingeniería energética y medio ambiental, 3 (1998) 89-94.
- 200 Advanced batteries for electric vehicles: A technology and Cost-effectiveness Assessment for battery electric vehicles, and Plug-in hybrid electric vehicles, . M. Duvall, 2004 (<http://www.epriweb.com/public/00000000001009299.pdf>).
- 201 Siemens VDO: http://www.vdo.com/products_solutions/cars/safety/e-corner/e-corner.html.
- 202 <http://www.revaindia.com/>.
- 203 http://cabierta.uchile.cl/revista/13/articulos/13_3/index.html.
- 204 <http://www.km77.com/tecnica/alternativas/clasificacionhibridos/to1.asp>.
- 205 Tecnologías de propulsión híbridas y las evidencias científicas de su eficiencia, Fundación FITSA, 2006.
- 206 Vehículos híbridos, F. Lorca, STA, 158(2003)36-37.
- 207 <http://alternativefuels.about.com/od/alternativefuels101/a/hybridfaq3.htm?once=true&>.
- 208 <http://www.hybridcenter.org/hybrid-center-how-hybrid-cars-work-under-the-hood.html>.
- 209 Bosch: <http://rb-kwin.bosch.com/es-AR/start/specials/hybrid/hybrisys.html>.
- 210 General Motors: http://www.gm.com/explore/technology/news/2007/fuel_cells/volt_010707.jsp.
- 211 Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options: final report, . R. Graham, 2001 (<http://www.epriweb.com/public/00000000001000349.pdf>).
- 212 <http://www.univision.com/content/content.jhtml?cid=744552>.
- 213 <http://www.finanzas.com/id.9080447/noticias/noticia.html>.
- 214 http://www.racc.es/externos/prensa/Marzo2007_es.pdf.
- 215 European Market for Full and Mild Hybrid Electric Vehicles. Frost & Sullivan Reports.
- 216 <http://www.hybrid-vehicles.net>.
- 217 Proyecto HYWAYS/HYNET.

Fuentes generales:

- Instituto Superior de la Energía.
- Proyecto FURORE.
- Frost & Sullivan Reports.
- The keys to the car: Electric and Hydrogen Vehicles for the 21st Century . -James J. Mackenzie, . Ed. World Resources Institute.
- Refino de Petróleo, Gas natural y petroquímica (M. A. Ramos Carpio. Fundación Fomento Innovación Industrial).
- CONAMA 8 Reports.
- Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4).
- A comprehensive analysis of biodiesel impacts on Exhaust Emissions. (Technical Report EPA 420-P-02-001).
- Report EUR 20279 EN de la Comisión Europea.
- EurObserv ER 2006.
- ENAGÁS.
- Volkswagen AG.
- Shell.
- Mitsubishi M-motors.
- Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural.
- AEGPL Economic Report 2005 (. Istambul, June June 2006).
- IGU International Gas Union.
- Asociación Mundial del GLP: www.worldlpgas.com.
- <http://www.biodieselpain.com>.
- Biofuels in the European Union: A Vision for 2030 and beyond.
- DGAGRI.
- European Biofuel standards and regulation -.PSA Peugeot, 2007; http://ec.europa.eu/energy/res/events/doc/biofuels/presentation_cahill.pdf.
- Una obligación de biocarburantes para España: propuestas de APPA, Bio Oil, 2007.
- <http://www.cartif.es/quimi/proyquimi11.php?resH=1024>.
- Nuevas tecnologías para un transporte sostenible: el papel de los biocombustibles. Luis Cabra Dueñas. Repsol YPF, Julio, 2007.
- Mercado de biocarburantes: posición y visión de Repsol YPF, II Encuentro IIR mercado de biocombustibles, 2007.
- Economy of Biomasa-to-Liquids (BTL) plants: An Engineering assessment, H. Boerrigter, 2006.
- Biofuel Production, IEA, 2007.
- ANFAC.

- Fundación energías (<http://www.fundacionenergia.es/PDFs/Ahorro%20Eficiencia%2011-07Ba%C3%B1obrePresentaci%C3%B3n%20UPM%20eugenio3.pdf>).
- The effect of biodiesel on transient emissions from modern diesel engines, Part I: Regulated emissions and performance. Sharp, C. A, Howell, S. A, Jobe. J, SAE Paper 2000-01-1967, June 2000.
- The effect of biodiesel on transient emissions from modern diesel engines, Part 2: Unregulated emissions and chemical characterization. Sharp, C. A, Howell, S. A, Jobe. J, SAE Paper 2000-01-1968, June 2000.
- <http://www.ethanol.org/index.php?id=50&parentid=8>.
- Biofuel Technology Handbook V2, D. Rutz, R. Janssen, 2008.

Patronato de la Fundación FITSA



DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO
OBSERVATORIO NACIONAL
DE SEGURIDAD VIAL
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN
DE TRÁFICO Y MOVILIDAD



DIRECCIÓN GENERAL DE
DESARROLLO INDUSTRIAL
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE ANÁLISIS DE
SECTORES Y MEDIO AMBIENTE INDUSTRIAL
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE
CALIDAD Y SEGURIDAD INDUSTRIAL



DIRECCIÓN GENERAL DE
POLÍTICA TECNOLÓGICA



Fundación Instituto Tecnológico
para la Seguridad del Automóvil

Avda. Bruselas, 38. Portal B - 2ª Planta
28108 Alcobendas (Madrid)

Tel.: 91 484 13 05. Fax: 91 484 13 76

www.fundacionfitsa.org

info@fundacionfitsa.org

IDAE Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

c/ Madera, 8 - 28004 Madrid

Tel.: 91 456 49 00. Fax: 91 523 04 14

comunicacion@idae.es

www.idae.es

ISBN 978-84-612-2622-1



9 788461 226221

P.V.P.: 30 € (IVA incluido)