



Universidad
Carlos III de Madrid

TRABAJO FIN DE GRADO

Estado del Arte y Perspectivas de Futuro de la Movilidad Personal Urbana

Grado en Ingeniería Mecánica

Jorge Rey Garrido
Septiembre 2014

Tutor: José Antonio Calvo Ramos

Agradecimientos:

A mis padres, por su cariño y apoyo incondicional,
por creer siempre en mí más que yo mismo.
Porque sin vosotros nunca hubiera llegado hasta aquí.

A mis abuelos,
porque sois cuatro pilares fundamentales en mi vida.
A vosotros os debo casi todo.

A mis amigos, en especial a Ana, Raquel, Lucas y Patricia,
porque los amigos se eligen.
No sabéis cuán afortunado me siento por formar parte de vuestra elección.

A los que se han ido este año.
Manolo, tío Faustino, no encuentro las palabras.
Siempre os llevaré en el corazón.

Y a todos los demás que me han apoyado y acompañado en este camino.
A mis titos, demás familia, compañeros de clase, amigos de la FAM...

Muchas gracias a todos. De corazón.

Contenido

Contenido	2
Resumen.....	9
Abstract	10
1. Objetivo.....	11
2. Introducción	12
2.1 Algunas cifras	12
3. El automóvil en la actualidad: problemas medioambientales, urbanos y accidentes.	16
3.1. Problemas medioambientales	17
3.1.1. Consumo y fragmentación del terreno.....	18
3.1.2. Impacto visual	20
3.1.3. Degradación ecológica	20
3.1.4. Degradación del entorno químico	21
3.1.5. Contaminación del agua y modificación de los procesos hidrológicos	22
3.1.6. Ruidos y vibraciones	22
3.1.7. Contaminación atmosférica	23
3.2. Problemas urbanos	28
3.2.1. Antecedentes históricos.....	29
3.2.2. Consumo de espacio.....	29
3.2.3. Congestión del tráfico.....	30
3.2.4. Contaminación atmosférica	30
3.2.5. Ruidos y vibraciones	33
3.3. Accidentes de tráfico.....	34
4. El automóvil y la energía: principales ineficiencias.....	37
4.1. Fuentes de ineficiencias	38
4.2. Resistencia a la rodadura	40
4.3. Ineficiencias por exceso de masa	42
4.3.1. Incorporación y sustitución de materiales ligeros.....	46
4.3.2. Rediseño de los vehículos hacia la reducción de masa.....	49
4.4. Pérdidas por resistencia aerodinámica	50
4.5. Conclusiones.....	52
5. Motores de combustión interna	53
5.1. Introducción a los motores de combustión interna alternativos	54

5.1.1.	<i>Motores de dos y cuatro tiempos</i>	54
5.1.2.	<i>Motores de ignición forzada e ignición espontánea</i>	57
5.2.	Repaso histórico a los motores de combustión interna	58
5.2.1.	<i>Historia del motor de gasolina</i>	58
5.2.2.	<i>Historia del motor diésel</i>	61
5.2.3.	<i>Situación actual</i>	65
5.3.	Tendencias actuales en los MCI	65
5.3.1.	<i>Downsizing</i>	66
5.3.2.	<i>Motores con relación de compresión variable (VCR)</i>	68
5.3.3.	<i>Motores de carga homogénea encendida por compresión (HCCI)</i>	72
5.3.4.	<i>Motores adiabáticos y pseudo-adiabáticos</i>	75
5.3.5.	<i>Conclusiones</i>	76
6.	Sistemas de propulsión alternativos: vehículos eléctricos, híbridos, con pila de combustible y de gas comprimido.	78
6.1.	Clasificación de los vehículos eléctricos.....	79
6.2.	El motor eléctrico	80
6.2.1.	<i>Generalidades</i>	80
6.2.2.	<i>Tipos de motores eléctricos: de inducción e imanes permanentes</i>	81
6.2.3.	<i>Diferencias de operación</i>	82
6.2.4.	<i>Alternativas de futuro: el motor de reluctancia conmutada</i>	84
6.2.5.	<i>Motor en el cubo de la rueda</i>	85
6.3.	La frenada regenerativa	87
6.4.	Baterías.....	88
6.4.1.	<i>Fundamentos de las baterías</i>	88
6.4.2.	<i>Baterías de Plomo-Ácido (PbAc)</i>	90
6.4.3.	<i>Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)</i>	90
6.4.4.	<i>Baterías ZEBRA</i>	91
6.4.5.	<i>Baterías de Ión-Litio (Li-Ion)</i>	92
6.4.6.	<i>Baterías de polímero de litio (Li-Poly)</i>	92
6.4.7.	<i>Resumen de características</i>	93
6.5.	Vehículos eléctricos a baterías (BEV)	94
6.5.1.	<i>Ventajas de los BEV</i>	94
6.5.2.	<i>Problemas de los vehículos eléctricos</i>	97
6.5.3.	<i>Baterías futuras para vehículos eléctricos</i>	98

6.5.4.	<i>El BEV y el sistema eléctrico</i>	104
6.6.	Vehículos eléctricos híbridos (HEV).....	106
6.6.1.	<i>Ventajas e inconvenientes de los vehículos híbridos</i>	108
6.6.2.	<i>Oportunidades de los vehículos híbridos</i>	109
6.7.	Vehículos eléctricos con pila de combustible (FCEV).....	115
6.7.1.	<i>Componentes de un FCEV</i>	116
6.7.2.	<i>El hidrógeno</i>	118
6.7.3.	<i>Coste de operación: FCEV vs. BEV</i>	120
6.7.4.	<i>Infraestructura de repostaje</i>	121
6.8.	Conclusiones.....	122
7.	Sistemas de transporte inteligente, redes de comunicación vehicular y conducción autónoma	123
7.1.	Comunicación V2V y V2I	123
7.1.1.	<i>Impactos en la seguridad</i>	124
7.1.2.	<i>Impactos en el medio ambiente</i>	125
7.2.	Vehículos autónomos.....	127
7.2.1.	<i>Niveles de autonomía en la conducción</i>	129
7.2.2.	<i>Principales ventajas de los vehículos autónomos</i>	130
7.2.3.	<i>Previsiones de introducción en el mercado</i>	131
7.2.4.	<i>Problemas de los vehículos autónomos</i>	132
8.	Conclusiones.....	133
8.1.	El coche urbano del futuro.....	135
	Bibliografía	136
	Anexo – Enlaces bibliográficos originales	143

Índice de figuras

Figura 1 - Distribución de distancia recorrida por medio de transporte en la UE-27 (2011) [2]	13
Figura 2 - Vehículos nuevos registrados en la UE por segmento [48].....	14
Figura 3 - Variación anual en las ventas de vehículos por segmento en Europa [48].....	14
Figura 4 - Evolución del número de coches por cada 1.000 habitantes en Europa [4].....	16
Figura 5 - Paso de fauna en el Parque Nacional de Banff. © Joel Sartore	18
Figura 6 - Interacciones espaciotemporales entre las infraestructuras de transporte y la actividad humana [6]	19
Figura 7 - Tasa de territorio ocupado en función del flujo de pasajeros en ciudades y autopistas [5]	19
Figura 8 - Emisiones anuales de CO2 (kt) [24].....	24
Figura 9 - Emisiones anuales de CH4 y N2O (t) [24].....	25
Figura 10 - Emisiones anuales de NOx en España (t) [24].....	27
Figura 11 - Comparación de emisiones de SO2 en Europa por origen [27, 28]	27
Figura 12 - Emisiones anuales de NH3 y SO2 (t) [24]	28
Figura 13 - Smog fotoquímico en Madrid [32].....	31
Figura 14 - Emisiones de CO en España (t) [24]	32
Figura 15 - Distribución del total de muertes a los 30 días por medio de transporte en Europa (Datos 2009-2012) [39]	35
Figura 16 - Distribución de muertes a los 30 días por medio de transporte en Europa en entornos urbanos (Datos 2009-2012) [39].....	35
Figura 17 - Evolución de las muertes por accidentes de tráfico en Europa 2001-2013 y objetivo hasta 2020 [40].....	36
Figura 18 - Consumo de energía en Europa por sector [2]	37
Figura 19 - Flujo de energía en un vehículo con MCI (adaptado de [42]).....	38
Figura 20 - Diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo en aceleración. Ilustración original: Porsche.....	39
Figura 21 - Relación entre emisiones de CO2 y clases de neumáticos según la normativa europea [47].....	41
Figura 22 - Evolución de la masa media de los vehículos vendidos en Europa por países [48]..	43
Figura 23 - Evolución de la masa media de los vehículos vendidos en Europa por segmento [48]	44
Figura 24 - Correlación entre la masa y el consumo de combustible para la serie 2001-2012 [48]	45
Figura 25 - Composición de un automóvil tipo en 2010 [52].....	46
Figura 26 - Uso de distintos aceros en la estructura de un Audi A3 (modificado de Audi)	47
Figura 27 - Monocasco del BMW i3 (BMW).....	49
Figura 28 - Estructura en forma de panal de abeja del BMW i3 (BMW).....	49
Figura 29 - Evolución de la distribución de masas en un automóvil por función [61].....	50
Figura 30 - Volkswagen XL1 en el túnel del viento (Volkswagen).....	51
Figura 31 - Motor de combustión interna de dos tiempos [67].....	55
Figura 32 - Funcionamiento de un motor de cuatro tiempos de gasolina [67]	56
Figura 33 - Motor tricilíndrico de dos tiempos que equipaba el Saab 96 (Saab).....	57

Figura 34 - Jean Étienne Lenoir en el primer vehículo con MCI.....	58
Figura 35 - Ciclo Otto teórico	59
Figura 36 - Karl Benz y Josef Brecht en el Motorwagen.....	60
Figura 37 - Mercedes 35.....	61
Figura 38 - Ciclo diesel teórico	62
Figura 39 - Tercer prototipo desarrollado por Diésel, expuesto en el Deutches Museum (MAN Bildarchiv).....	63
Figura 40 - Motor de Heinrich Dechamps	64
Figura 41 - Cilindrada de los vehículos vendidos en Europa entre 2001 y 2012 por fabricante [48]	66
Figura 42 - Nº de cilindros de los vehículos vendidos en Europa entre 2001 y 2012 por fabricante [48].....	66
Figura 43 - Comparación entre las curvas de par de los motores VW 1.4 L TFSI (sobrealimentado) y VW 1.6 L FSI (atmosférico) [79]	67
Figura 44 - Ford 1.0 L Ecoboost (Ford)	68
Figura 45 - Motor Saab SVC. Comparación de posiciones (Saab)	70
Figura 46 - Motor Omnivore de Lotus [86]	71
Figura 47 - Biela de dimensiones variables para motor VRC [87]	72
Figura 48 - Comparación entre la combustión en MIF, MIE y HCCI - Adaptado de [88].....	73
Figura 49 - Curva de rendimiento del ciclo Otto en función de la relación de compresión	75
Figura 50 - Curvas de potencia y par del motor eFone (RTU)	76
Figura 51 - Clasificación de Vehículos Eléctricos.....	79
Figura 52 - Comparación entre las curvas de potencia y par de motores Nissan [Nissan]	80
Figura 53 - Representación de un motor de inducción y un motor de imanes permanentes [99, 100]	82
Figura 54 - Ilustración de un motor de reluctancia conmutada [101]	84
Figura 55 - Michelin Active Wheel [Michelin]	86
Figura 56 - Ford eWheelDrive [Shaeffler].....	86
Figura 57 - Interacción de parámetros en un freno regenerativo [107]	88
Figura 58 - Configuración de una pila Daniell [109]	89
Figura 59 - Batería de NiMH [113]	91
Figura 60 - Diagrama de Ragone para distintos tipos de tecnologías de almacenamiento eléctrico [117]	93
Figura 61 - Configuración de un Mitsubishi i-MiEV [Mitsubishi].....	94
Figura 62 - Suelo plano de un Tesla Model S [Tesla Motors]	95
Figura 63 - Ilustración de una batería de Li-S con grafito [124]	99
Figura 64 - Ilustración de una batería de Li-S con grafeno [125]	99
Figura 65 - Ilustración de una batería de Litio-Aire [125]	100
Figura 66 - Comparación entre los distintos tipos de baterías analizadas (Elaboración propia)	101
Figura 67 - Diferencias entre ultracondensadores y ultracondensadores de ión-litio [127]	102
Figura 68 - Ilustración de una batería de flujo redox [131].....	103
Figura 69 - Ilustración del vehículo Quantum eSportLimousinne [132]	103
Figura 70 - Representación del mix de generación del sistema eléctrico español peninsular [133]	104

Figura 71 - Emisiones de CO2 asociadas a la operación de vehículos [kg/100km].....	105
Figura 72 - Efecto de la introducción del BEV en el sistema eléctrico [136].....	106
Figura 73 - Arquitecturas de HEV: en paralelo y combinado [137].....	107
Figura 74 - Arquitecturas de HEV: en serie [137].....	107
Figura 75 - Representación de un ciclo Atkinson ideal	110
Figura 76 - Ilustración del generador lineal de motor libre de Toyota (Adaptado de Toyota) .	111
Figura 77 - Ilustración del generador lineal de pistón libre de GM y la Universidad de Michigan [146]	112
Figura 78 - Disposición de los componentes en el interior del vehículo patentado por GM y la Universidad de Michigan [146]	113
Figura 79 - Representación del tren de potencia híbrido de Bosch y PSA [148].....	114
Figura 80 - Ilustración esquemática del conjunto motor térmico - motor hidráulico (Bosch) .	114
Figura 81 - Tren de potencia de un Audi Q5 Hybrid Fuel Cell (Audi)	116
Figura 82 - Representación del funcionamiento de una pila de combustible [152].....	117
Figura 83 - Principales componentes de los sistemas V2V. (Traducido de [167]).	124
Figura 84 - Posibles escenarios de colisión evitables gracias a los sistemas V2V. (Traducido de [167]).	125
Figura 85 - Ilustración de un tren de carretera [168].....	126
Figura 86 - Principales señales de las que se sirve un vehículo autónomo para circular. Traducido de [173].	128
Figura 87 - Recreación del mapa generado por un sistema LiDAR (Google)	129
Figura 88 - Una persona ciega conduce el vehículo autónomo desarrollado por Google	130
Figura 89 - Previsión de ventas de vehículos autónomos [180]	132

Índice de tablas

Tabla 1 - Clases de neumáticos y coeficientes de rodadura	42
Tabla 2 - Parámetros técnicos del motor Diesel	63
Tabla 3 - Principales parámetros del motor Dechamps	64
Tabla 4 - Comparativa de motores RTU	75
Tabla 5 - Comparación de motores eléctricos de inducción, imanes permanentes y reluctancia conmutada [103]	85
Tabla 6 – Parámetros típicos de algunos tipos de baterías.....	93
Tabla 7 - Comparación del coste de operación de un vehículo de gasolina, diésel y eléctrico a baterías.....	97
Tabla 8 - Comparación de características entre el motor de ciclo Atkinson y el motor Otto...	111
Tabla 9 - Comparación entre las distintas tecnologías de producción de Hidrógeno	119
Tabla 10 - Comparación entre el coste de operación de vehículos de gasolina, diésel, BEV y FCEV.....	120

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado con el objetivo de buscar soluciones reales a los principales problemas ocasionados por el automóvil en su vertiente urbana, a través de la revisión de la literatura disponible.

Para ello, en primer lugar se ha analizado cuáles son estos problemas, tanto a nivel medioambiental y energético como a nivel de desarrollo de la vida en las ciudades. Entre los encontrados destacan la contaminación atmosférica, la falta de espacio operativo en entornos urbanos, los ruidos, los accidentes de tráfico y las pérdidas de energía derivadas del uso de motores de combustión interna y del aumento de la masa de los vehículos.

Posteriormente se ha realizado un análisis de las posibles alternativas técnicas que podrían ayudar a eliminar o disminuir los problemas detectados: la reducción del peso de los vehículos; las mejoras disponibles para los motores de combustión; las soluciones híbridas, eléctricas y la pila de combustible frente a los sistemas de propulsión tradicionales; y finalmente las nuevas tecnologías de conducción inteligente.

Se ha encontrado que una sustancial reducción del peso de los automóviles es posible a través de la sustitución de materiales por otros más ligeros y nuevos diseños estructurales, mientras que la movilidad eléctrica se plantea como la principal alternativa al motor de combustión interna a medio y largo plazo. Además, la conducción autónoma y los sistemas V2V (coche a coche) y V2I (coche a infraestructura) se postulan como las principales tecnologías que permitirán disminuir en mayor grado el número de accidentes de tráfico, al mismo tiempo que contribuirán a mejorar la eficiencia energética del conjunto del sistema.

Abstract

The present Final Degree's Project has been developed with the aim of searching for solutions to the main problems generated by the automobile in its urban use. This has been done through the revision of the available literature.

In the beginning, we analyzed these problems, including issues affecting specifically the ongoing of life in cities, as well as the environmental and energy problems. Among the most important findings, it is worth outlining the atmospheric pollution, the lack of operational space in cities, the noise, the traffic accidents, and the inefficiencies caused by the use of internal combustion engines, as well as the excess of mass in vehicles.

After that we analyzed the feasible technical alternatives that could drive to the decrease or removal of these problems: the reduction of weight; the improvements available for the current internal combustion engines; the hybrid, electric, and fuel-cell solutions facing the traditional propulsion systems; and the new technologies that will provide the intelligent driving.

We have found that an important reduction of weight can be accomplished through the substitution of some materials with others lighter than them, as well as with the development of new structural solutions, and that electric mobility is set out as the most important alternative for the internal combustion engine. In addition, autonomous driving and V2V (vehicle to vehicle) and V2I (vehicle to infrastructure) systems are seen as the main alternatives that will lead to a reduction in the number of car accidents. At the same time, they will contribute to increase the overall efficiency of the whole urban transport system.

1. Objetivo

Este Trabajo de Fin de Grado pretende ser un reflejo de los retos y oportunidades a los que se enfrenta el automóvil en su vertiente urbana, así como un resumen de las capacidades técnicas que se están desarrollando para hacer frente a estos retos y oportunidades, tanto en el presente como en el futuro. Todo ello a través de la revisión de la literatura disponible.

Para alcanzar este objetivo, en primer lugar se analizará cuáles son los problemas que tienen su origen en el uso del automóvil, tanto a nivel medioambiental como a nivel urbano. También se analizará la relación coche-energía, al ser el transporte uno de los sectores con un consumo más intensivo de la misma.

Posteriormente se describirán las distintas tecnologías que se utilizan actualmente y que están directamente relacionadas con los problemas identificados, principalmente el motor de combustión interna, para pasar a desarrollar aquéllas que se plantean como opciones de futuro, y en cuyo desarrollo ya se está trabajando: los sistemas de propulsión híbridos y eléctricos, la comunicación coche a coche y coche a infraestructura, y finalmente la conducción autónoma.

Dentro de cada uno de estos puntos, se analizarán las perspectivas comerciales de las tecnologías descritas, sus ventajas e inconvenientes, y el impacto que se derivará de su implantación, para finalmente elaborar un perfil del *coche urbano del futuro* con aquellas características estudiadas que integrará para garantizar la sostenibilidad del sistema.

2. Introducción

El transporte es parte de nuestro ritmo de vida diario. Cada día miles de millones de personas utilizan distintos medios de transporte, públicos o privados, para desplazarse y satisfacer sus necesidades económicas y sociales.

Nuestra capacidad para desplazarnos está tan interiorizada que a menudo se percibe el transporte como un derecho irrenunciable que nos viene dado, que siempre ha estado a nuestro servicio y siempre lo estará. Sin embargo, el transporte, y dentro de este, la movilidad de personas, es algo muy complejo, fruto de unas necesidades propias del tiempo en el que vivimos, y con unas repercusiones nada desdeñables en aspectos tan amplios como la sociología, la economía, el uso del terreno, la salud y el medio ambiente.

No en vano, tener la capacidad de transportar personas y mercancías con facilidad es el germen de la globalización, el fenómeno que define el modo de vida de toda la civilización. Pero este hecho no es nada novedoso: ya en la Edad Antigua los romanos tomaron consciencia de la enorme influencia que el transporte tiene en la sociedad, y su importancia a la hora de integrar territorios lejanos; por eso establecieron una compleja red de calzadas con las que controlar su imperio y fortalecer las relaciones económicas entre Roma y sus provincias.

Además, según la Unión Europea, “el derecho a la movilidad de todas las personas es fundamental para lograr la integración del espacio europeo: los transportes tienen, en efecto, una dimensión social y de cohesión porque reducen las desigualdades regionales y el aislamiento, y facilitan el acceso a la movilidad de las personas con discapacidad” [1].

2.1 Algunas cifras

El transporte también tiene una importante dimensión económica. En el año 2010, este sector supuso el 4.9% del total del Valor Bruto Añadido (VBA) en la Unión de los 27, con 540 mil millones de euros. Y eso teniendo en cuenta solamente la actividad de aquellas empresas dedicadas a la provisión de transporte y otros servicios relacionados [2].

Centrándonos en el transporte de personas, los hogares de la UE gastaron en 2011 un total de 950 mil millones de euros, aproximadamente el 13% de su consumo total, en servicios relacionados con este concepto. De estos, más de la mitad (515 millones de euros) fueron destinados a la operación de vehículos privados (como la compra de combustible o las reparaciones de automóviles), el 27% fue a parar a la compra de vehículos (unos 260 mil millones de euros), y el montante que resta (176 mil millones) se utilizó para la compra de otros servicios de transporte (billetes de avión, tren, taxis...).

Además, en el año 2011 el transporte de personas intraeuropeo sumó 6.569 mil millones de pasajeros-kilómetro (pkm), lo que implica una media de 13.060 kilómetros por persona. De estos, el transporte en coche supuso el 73.4%, los vehículos de dos ruedas sumaron el 1.9%, el transporte en autocar supuso el 7.9%, el ferrocarril el 6.3% y tranvías y metros sumaron un

1.4%. El transporte por aire y mar entre países de la Unión supuso el 8.8% y el 0.6% respectivamente. Estos datos se representan en la Figura 1:

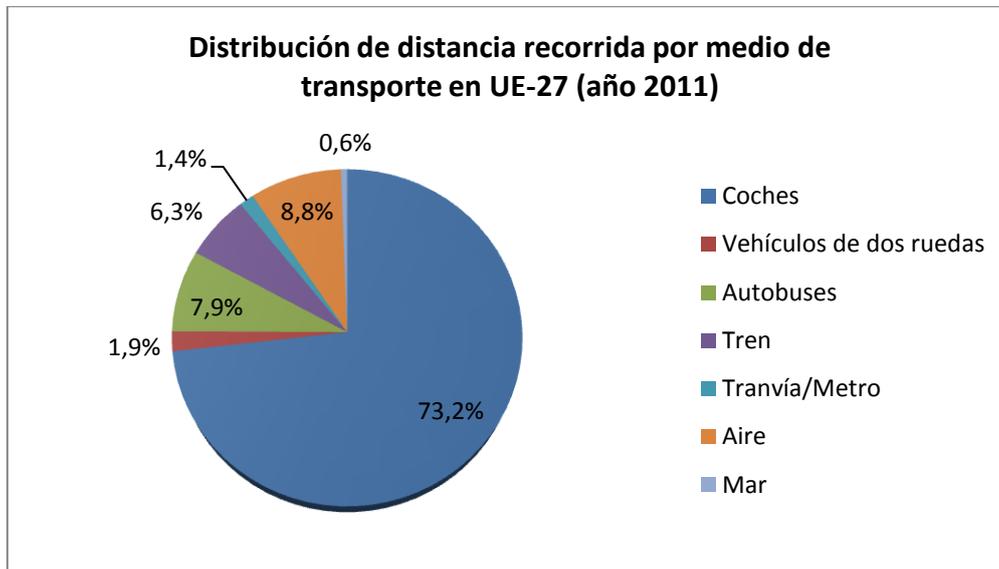


Figura 1 - Distribución de distancia recorrida por medio de transporte en la UE-27 (2011) [2]

A nivel económico no hay duda de que se trata de buenos datos. Pero estas cifras tienen aparejados otra serie de números igual de impresionantes en su magnitud cuyas implicaciones a otros niveles, como medioambientales o de salubridad, no son tan positivas. Afortunadamente, como ciudadanos cada día somos más conscientes de los problemas que acarrea el uso intensivo del coche, y cada día cobran más importancia las medidas dispuestas para paliar sus efectos.

Estamos en un momento crítico en el que la tecnología clásica del motor de combustión interna debe demostrar su capacidad para integrarse con nuevos sistemas eléctricos si quiere continuar dominando el mercado. Además, las soluciones que se planteen ahora en lo relativo a ordenación urbana, transporte público y fomento de las tecnologías menos contaminantes tendrán un potente efecto en la forma y las formas de las ciudades de mañana.

Pero estas no son las únicas medidas que hay que tomar. La educación de los ciudadanos en materia de transporte es muy importante para poner freno a sinsentidos como el que suponen los datos de ventas de SUV (Sport Utility Vehicle) y vehículos todoterreno, que se han disparado en relación al resto en los últimos años (Figura 3).

Además, a la vista de la Figura 2, y volviendo a los términos económicos, también nos encontramos en un momento crítico para el sector. Resulta llamativa la espectacular caída en las ventas netas desde 2007, fecha en la que se registraron más de 2 millones de vehículos más que en 2012. Sin duda la crisis económica es la principal culpable de esta situación, pero no está tan claro que sea la única.

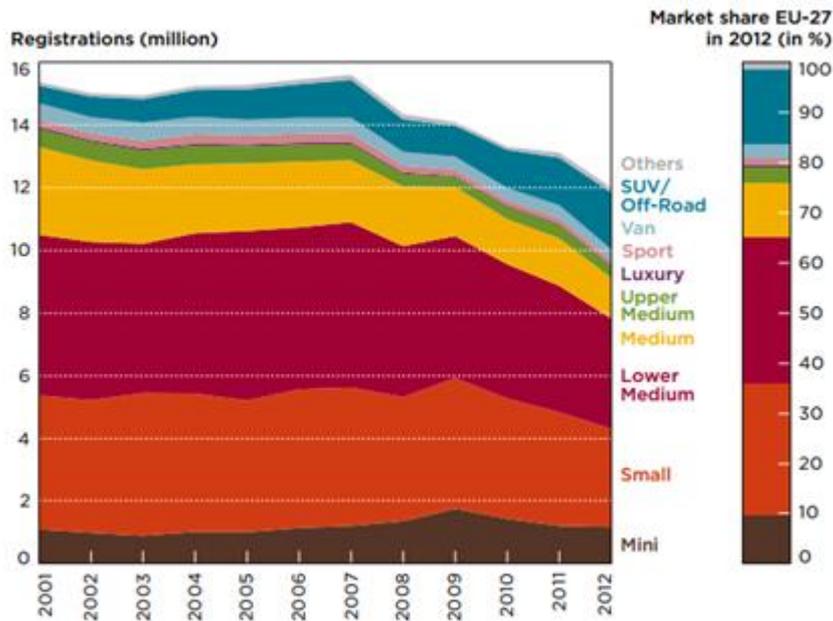


Figura 2 - Vehículos nuevos registrados en la UE por segmento [48]

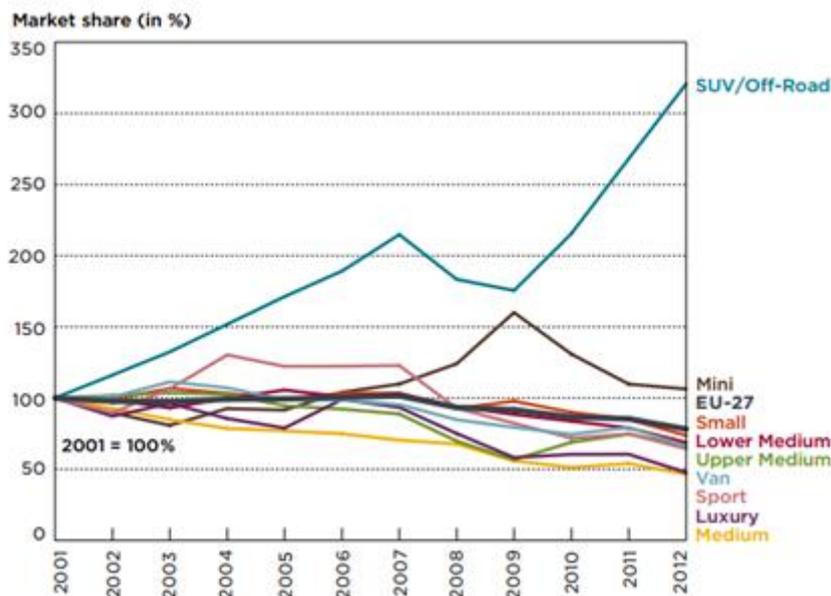


Figura 3 - Variación anual en las ventas de vehículos por segmento en Europa [48]

En los últimos años, el culto al coche entre los más jóvenes ha caído en picado, y con él, las ventas a este sector de la población. La imagen del coche como símbolo de estatus y libertad ya no es tal para la mayoría. Los jóvenes ya no compran coches, y quienes lo hacen, buscan vehículos pequeños, adaptados a la ciudad [3].

Con esta tendencia, los fabricantes tendrán que adaptarse a las nuevas formas de consumo de transporte, con coches más limpios, menos ruidosos y más inteligentes, así como a los nuevos modelos de negocio que ponen en valor el uso del alquiler y el coche compartido. No obstante, se trata de un reto al que no pueden enfrentarse en solitario. Los legisladores y

los ciudadanos también debemos aportar nuestra parte, más importante aún si cabe, para cambiar radicalmente la forma en la que nos movemos.

Afortunadamente, la tendencia es positiva hacia la concienciación y la reducción del uso del automóvil en espacios urbanos. Pero la desaparición del coche en la ciudad es una utopía. Aún hay mucho trabajo por hacer para conseguir una buena integración del coche en la ciudad, que permita la convivencia con el resto de los ciudadanos, y que fomente la *ciudad para las personas* frente a la *ciudad para los coches*. A continuación veremos qué tiene que decir la tecnología al respecto de todo esto, y cuáles serán sus contribuciones principales a lo largo de los próximos años.

3. El automóvil en la actualidad: problemas medioambientales, urbanos y accidentes.

Una de las grandes dificultades a la hora de abordar los problemas ocasionados por el automóvil se encuentra en su multidisciplinaridad. Y es que hablar de transporte privado es tanto como hablar de física, química, economía, geografía, sociología y política. El uso del coche tiene múltiples dimensiones con requerimientos específicos en cada una de estas disciplinas, e implicaciones tanto positivas como negativas en casi todas ellas que es necesario conocer.

Aunque los problemas ocasionados por el transporte privado no son nada nuevo, el nivel de preocupación respecto a los mismos ha aumentado notablemente en las últimas décadas, generando un interesante debate que marcará el futuro de la movilidad.

Con casi 0.5 vehículos ligeros per cápita (esto es, un coche o furgoneta ligera para cada dos personas), Europa está a la cabeza del mundo en lo que a posesión de vehículos para el transporte de personas se refiere [4]. Y la tendencia de crecimiento sigue siendo positiva, tal y como muestra la Figura 4.

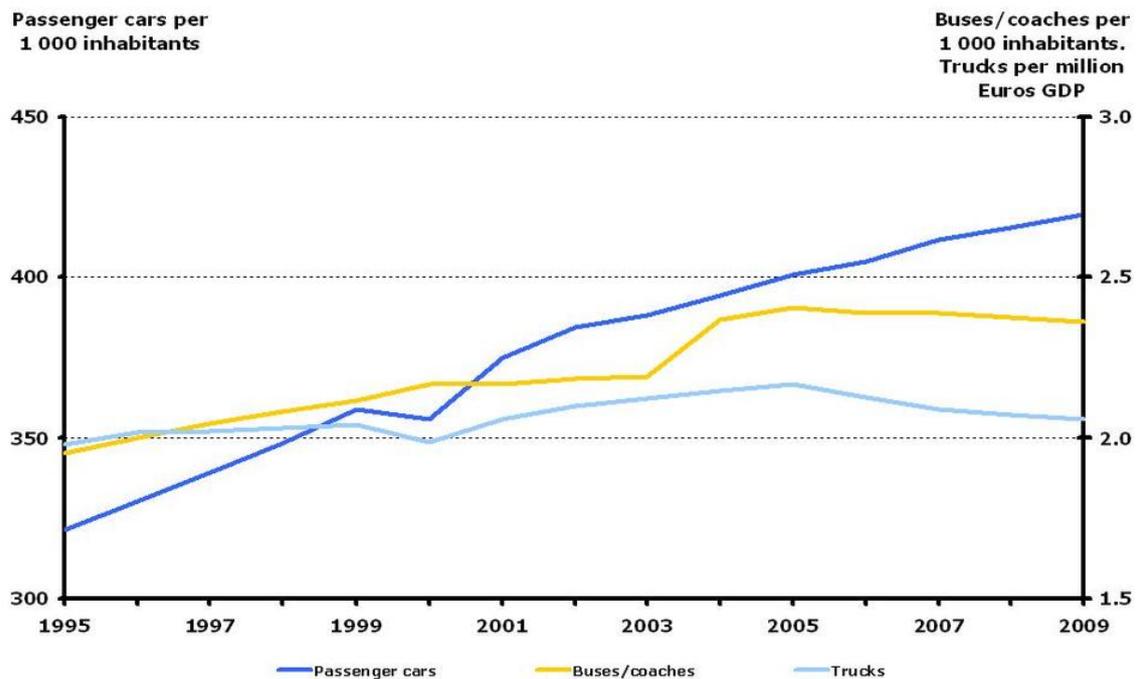


Figura 4 - Evolución del número de coches por cada 1.000 habitantes en Europa [4]

Aunque es obvio que esta tendencia debe alcanzar en algún momento un punto de saturación, aún queda margen de crecimiento, y sin embargo ya se hace palpable la insostenibilidad del sistema. Además, no sólo es susceptible de aumentar el número de vehículos por persona, sino también el número de kilómetros recorridos anualmente por cada una de ellas.

El objetivo de este capítulo es analizar algunos de los problemas que tienen su origen en el uso del automóvil como medio de transporte.

Con el objetivo de facilitar este análisis, se distinguirán dos zonas de influencia del automóvil: las áreas naturales y las áreas urbanas. Aunque en algunos casos esta distinción puede ser poco precisa, resulta útil para establecer una clasificación de las principales consecuencias.

Se entiende por áreas naturales a aquellas zonas geográficas donde la presencia humana es limitada en comparación con la vida silvestre, aunque también a aquellas zonas con baja presencia humana, pero dedicadas a la agricultura y ganadería. Por su parte, las áreas urbanas son las que forman las ciudades, y se caracterizan por una alta densidad de población, una mayor dotación de infraestructuras, y la casi total ausencia de espacios naturales frente a las zonas artificiales, construidas y utilizadas por el ser humano.

En un segundo plano quedan los núcleos de población de carácter rural, que pese a que también están influenciados por todos los puntos que se detallan a continuación, se ven afectados de manera menos agresiva por los problemas que pueden verse en las ciudades.

Por último, fuera de esta clasificación se planteará otro grave problema que conlleva el uso del automóvil: los accidentes de tráfico, que cada año se cobran decenas de miles de vidas en las carreteras.

3.1. Problemas medioambientales

El transporte por carretera es la forma de transporte más importante en la UE, y por tanto la que tiene un mayor impacto en el ecosistema europeo, tanto a nivel económico como a nivel medioambiental.

Los problemas de esta modalidad de transporte son múltiples, y no sólo están relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero que salen del tubo de escape de los vehículos equipados con motores de combustión interna. De hecho, el mayor impacto medioambiental del transporte por carretera tiene que ver con el despliegue de las infraestructuras, su explotación, y finalmente su abandono, aunque son los efectos relacionados con la contaminación del aire los que tradicionalmente han tenido un mayor impacto en los medios de comunicación y los que infligen una mayor preocupación en la sociedad, por su afección directa sobre la salud humana.

Si bien es cierto que algunas de las implicaciones medioambientales que van a estudiarse a continuación no tienen una relación directa con el objetivo de este TFG (esto es, el análisis del automóvil en entornos urbanos), resulta imprescindible tener una idea clara de todas las consecuencias, o al menos las más importantes, que estos vehículos tienen en nuestro entorno. Además, a pesar de que problemas como el consumo del terreno a nivel natural no pueden ser solucionados por las medidas que se proponen más adelante, tienen implicaciones a nivel urbano que sí pueden y deben tratar de solucionarse.

3.1.1. Consumo y fragmentación del terreno

Como es obvio, el transporte terrestre requiere la utilización directa de grandes superficies de terreno para desarrollar su actividad. Esto supone que cada año miles de hectáreas de territorio natural sean devastadas y asfaltadas, lo que tiene como consecuencia no sólo la deforestación, sino también la división de grandes áreas naturales en espacios más pequeños, a veces comunicados, con una gran afección para la vida natural que reside en ellos y un impacto significativo en los ecosistemas.

Una autopista que divide en dos un área natural supone una barrera infranqueable para la fauna de la zona, reduciendo sus posibilidades de movimiento, aislando a las poblaciones animales y limitando sus posibilidades de intercambio genético, lo que da lugar a una pérdida de la biodiversidad. En España, los espacios sin dividir entre vías interurbanas rondan los 250 km² de superficie, con lo que su efecto no es tan devastador como en otras zonas de Europa, con áreas medias inferiores a los 50 km².

Con el objetivo de paliar este efecto, se ha popularizado la instalación de pasos de fauna en forma de puentes o conductos subterráneos que permiten el cruce de los animales de forma segura, similares al que se muestra en la Figura 5. Aunque estos elementos han tenido éxito en la reducción de la mortalidad animal, solo ofrecen una solución parcial al problema, pues las áreas siguen estando aisladas en gran medida.



Figura 5 - Paso de fauna en el Parque Nacional de Banff. © Joel Sartore

Medir el impacto de la ocupación del terreno es enormemente complicado, a la vista de la multitud de datos que pueden encontrarse al respecto y las grandes variaciones entre ellos. Un estudio de la Universidad Jaume I comparó en el año 2005 las diversas fuentes de datos para intentar establecer el porcentaje de ocupación del territorio de las carreteras españolas. Las diferencias que se encontraron eran de hasta dos órdenes de magnitud: desde 621.452 ha hasta 7.403 ha, siendo el origen de ambos datos distintos organismos de la Unión Europea [5].

Finalmente, el dato obtenido a partir de fuentes nacionales, más cercano al primero, establecía la ocupación territorial en el año 2004 en 449.313 ha, el 0.9% de la superficie del país, cuatro puntos por debajo de la media de la UE: el 1.3%. Diez años después la cifra es sin duda mayor.

Del aumento del territorio dedicado a infraestructuras de transporte también se derivan otras consecuencias, como la expansión de las ciudades (lo que supone un aumento aún mayor del territorio ocupado en esas áreas, tal y como puede observarse en la Figura 6), o la contaminación ambiental de las zonas que rodean a las carreteras, que pueden tener consecuencias nocivas para las áreas naturales que las rodean.

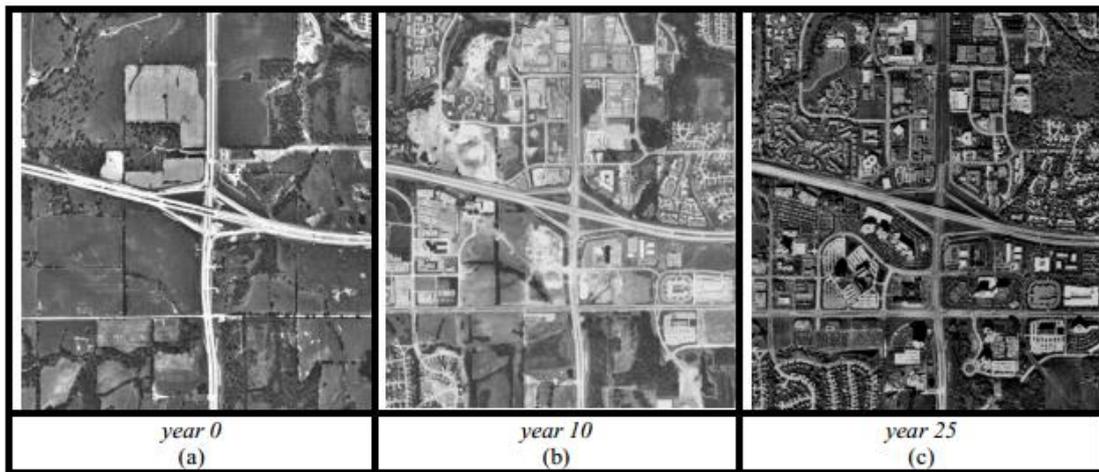


Figura 6 - Interacciones espaciotemporales entre las infraestructuras de transporte y la actividad humana [6]

Además de este consumo del terreno, también hay que tener en cuenta aquél que tiene su origen en la extracción de materias primas para la construcción y mantenimiento de las carreteras y de los propios automóviles.

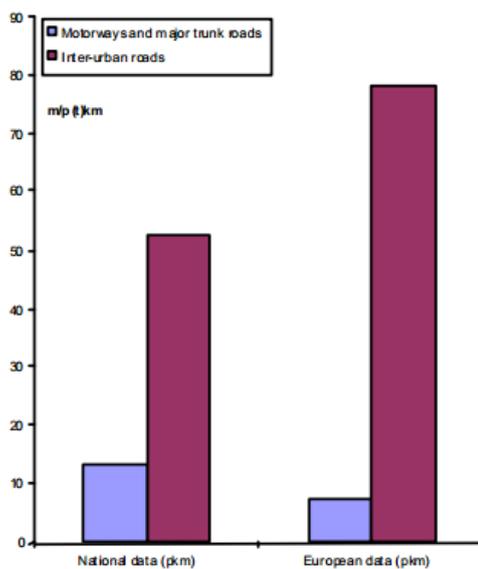


Figura 7 - Tasa de territorio ocupado en función del flujo de pasajeros en ciudades y autopistas [5]

Resulta interesante observar la tasa de territorio ocupada en función del flujo de pasajeros (los metros de carreteras construidos por cada kilómetro recorrido por cada pasajero). Tal y como puede comprobarse en el siguiente gráfico (Figura 7), desarrollado en el estudio anteriormente citado para el caso de España [5], en general, las grandes autopistas y autovías son medios de transporte tremendamente ineficientes, al mismo tiempo que se demuestra el uso intensivo de las carreteras urbanas y aquellas que circunvalan a las ciudades.

3.1.2. Impacto visual

Aunque pocas veces es tenido en cuenta, el impacto visual es un factor importante, ya que puede tener grandes consecuencias económicas, sobre todo en zonas con grandes espacios naturales de carácter turístico.

De nuevo, se trata de un problema cuyas implicaciones son difíciles de medir a priori, dado que además estas pueden cambiar a lo largo del tiempo. Como ejemplo, las líneas férreas y canales construidos durante los siglos XIX y XX, que se encontraron con una fuerte oposición en aquella época, y que en la actualidad se busca preservar debido a su carácter histórico y estético. No obstante, no parece que las carreteras vayan a adquirir ese carácter.

En cualquier caso, es necesario prever de algún modo el impacto que las nuevas infraestructuras tendrán en el entorno paisajístico antes de su construcción.

3.1.3. Degradación ecológica

La construcción y operación de infraestructuras de transporte por carretera tiene un impacto directo en los ecosistemas terrestres y acuáticos. En un prestigioso meta análisis publicado por la revista *Conservation Biology*, Trombulak *et al.* [7] concluyeron que “las carreteras de cualquier tipo ocasionan siete efectos generales [sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos]: mortalidad ocasionada por la construcción de la carretera; mortalidad debida a la colisión con vehículos; modificaciones en la conducta animal; alteración del ambiente físico; alteración del ambiente químico; dispersión de especies exóticas e incremento en el uso de áreas por humanos”.

Aunque la mortalidad animal causada por la construcción de las carreteras es difícil de medir (principalmente debido a que los animales involucrados son pequeños invertebrados e insectos), en España los atropellos son la principal causa de muerte de especies en peligro de extinción, como el lince ibérico, que en los últimos dos años ha sufrido 25 bajas debido a atropellos, haciendo que su población actual se encuentre por debajo de la registrada en 2011 [8, 9], o el lobo ibérico, con un 65% de las muertes de la especie ocasionadas en la carretera [10].

Además, según este mismo estudio, “la presencia de carreteras puede modificar el comportamiento de los animales, tanto positiva como negativamente. Esto puede suceder a través de cinco mecanismos: cambios en su zona de hábitat, alteración en los patrones de movimientos, alteración en el éxito reproductivo, alteración en el tiempo de huida y alteración del estado psicológico”.

Por ejemplo, la mayor parte de los animales salvajes, sobre todo aquellos de gran tamaño como el oso pardo [11] o de nuevo, el lobo [12], evitan acercarse a zonas próximas a las carreteras, con lo que sus hábitats, ya de por sí reducidos y aislados, quedan aún más limitados.

La presencia de carreteras también produce alteraciones en el terreno más allá de su uso y fragmentación: desde cambios en la composición y la densidad del sustrato, hasta la temperatura y la humedad del mismo.

3.1.4. Degradación del entorno químico

La degradación del entorno químico es una de las principales consecuencias derivadas de la instalación, el mantenimiento y el uso de las carreteras. Aunque a priori este punto debería estar incorporado en el apartado anterior por tratarse de una forma más de degradación del entorno ecológico, la degradación del entorno químico es la parte que ha sido estudiada en mayor profundidad, y la que tiene un impacto mayor a lo largo de la vida operativa de la infraestructura.

Las principales causas de degradación del entorno químico se deben a la incorporación a la naturaleza de cuatro elementos básicos: metales pesados, sales, compuestos orgánicos y ozono. A continuación se detallarán los tres primeros, mientras que el ozono se estudiará en el apartado correspondiente a la contaminación ambiental.

3.1.4.1. Metales pesados

El transporte por carretera es origen de una gran variedad de metales pesados en las zonas aledañas a estas. Una amplia gama de ellos se encuentra tanto en el asfalto y los demás sustratos que componen la vía, como en los vehículos que las transitan, mientras que el uso y las condiciones ambientales hacen que se esparzan más allá de los límites del arcén, pudiendo contaminar los ríos y acuíferos al ser arrastrados por las corrientes de agua.

Aunque la variedad es mayor, los estudios al respecto suelen centrarse en las cuatro especies más abundantes: el plomo, el zinc, el cobre y el cadmio. Estas especies se liberan a la atmósfera y al suelo durante la combustión, el desgaste de los neumáticos, la fuga de aceites y la corrosión de las baterías y otros elementos metálicos.

En el caso del plomo, aunque las emisiones de este metal pesado se han reducido notablemente en los últimos años (en 1990 el 76% de las emisiones totales de plomo en Europa provenían del transporte, frente al 12% actual), la alta nocividad de este elemento hace que cantidades mínimas presentes en el ambiente tengan un efecto perjudicial enorme [13].

Los metales pesados constituyen una fuente de contaminación importante, ya que se trata de elementos bioacumulativos (no pueden ser eliminados por el organismo) y biomagnificados (se acumulan a lo largo de la cadena trófica), generalmente atacan al sistema nervioso central, y en algunos casos su intoxicación puede suponer incluso la muerte del individuo afectado [14].

3.1.4.2. Sales

Aunque puedan parecer inofensivas, las sales utilizadas para evitar la formación de hielo en las carreteras tienen un impacto directo en el terreno adyacente. El exceso de sal es tóxico

para las plantas. Además, su disolución modifica el pH del terreno, y su llegada a corrientes de agua modifica el nivel de salinidad de la misma.

3.1.4.3. Compuestos orgánicos

Principalmente hidrocarburos policíclicos aromáticos. El humo de la combustión en los motores puede liberar a la atmósfera más de cien hidrocarburos policíclicos aromáticos diferentes. Además están también presentes en los alquitranes con los que se construyen las carreteras. Estos compuestos resultan tóxicos para los seres vivos que los ingieren o se encuentran en contacto con ellos (pues también pueden absorberse por vía tópica), y algunos han sido clasificados como cancerígenos.

3.1.5. Contaminación del agua y modificación de los procesos hidrológicos

La presencia de carreteras tiene un efecto directo sobre las corrientes hidrológicas cercanas. Por una parte, muchas de estas construcciones suponen cubrir parte de terrenos previamente permeables con materiales impermeables, lo que reduce la infiltración del agua y puede afectar a los acuíferos. El agua de lluvia generalmente se drena en los márgenes de las vías y se conduce rápidamente hacia la corriente fluvial más próxima, modificando su patrón y su caudal. Además, algunos estudios han demostrado que esta agua está cargada de materiales contaminantes que se derivan directamente a los ríos. Según Legret *et al* [16] se pueden distinguir dos tipos de contaminación: una crónica, que incluye sólidos en suspensión (como caucho y otros materiales procedentes de los neumáticos, o basura arrojada por los conductores a la vía), demanda química de oxígeno, hidrocarburos, zinc y plomo; y otra estacional, que incluye cloruros, sulfatos, sólidos en suspensión y otros metales pesados, debidos al uso de sales para el deshielo en invierno.

Estos problemas son difíciles de solucionar, si no imposibles, puesto que cualquier modificación en las canalizaciones afectaría a otros cursos hidrológicos, y la depuración in situ de los contaminantes tampoco resulta factible.

3.1.6. Ruidos y vibraciones

El sonido y las vibraciones son dos manifestaciones distintas de un mismo fenómeno físico: la propagación de una onda mecánica a través de un medio elástico. Ambos se distinguen en la naturaleza de la fluctuación y el medio a través del cual se transmiten: mientras que el sonido es una onda de presión que se transmite a través del aire, la vibración es una onda de desplazamiento mecánico que se propaga a través de medios sólidos. [17]

Se denomina ruido a la sensación auditiva inarticulada, desagradable y molesta para el oído [18]. Todas las formas de transporte son una importante fuente de ruido allí donde se desarrollan. La medición del ruido es algo simple, y la cantidad de ruido se expresa generalmente en dB(A), una escala de medida ponderada que da mayor peso a las frecuencias

auditivas más relevantes para el oído humano, de forma que la unidad de medida se adecue a la sensación auditiva [19].

En entornos naturales el ruido tiene consecuencias sobre la fauna, afectando a su fisiología y sus patrones de conducta y reproducción. Entre otros efectos, el ruido procedente de carreteras puede ocasionar la pérdida auditiva y la desorientación de los animales que viven a su alrededor, así como reducir el éxito de las cacerías [20,21].

En perímetros suburbanos e interurbanos con alta concentración de tráfico a altas velocidades y zonas habitadas alrededor, el problema del ruido puede paliarse con la instalación de pantallas acústicas anti ruido. Pero la instalación de las mismas a lo largo de todas las carreteras no resulta una opción viable a la hora de reducir los efectos del ruido en entornos naturales.

3.1.7. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es sin duda la forma de contaminación más estudiada, por ser la que tiene un mayor efecto sobre la salud humana y el entorno natural. Aunque la contaminación del aire es especialmente preocupante en zonas urbanas (como se verá en el siguiente punto), también tiene efectos en el entorno natural.

Los hidrocarburos de los que se compone el combustible que utilizan los motores de combustión interna están formados principalmente por cadenas de carbono e hidrógeno, por lo que su combustión total con oxígeno debería dar como únicos productos de reacción dióxido de carbono (CO₂) y agua. Sin embargo, debido a las impurezas presentes en estos hidrocarburos y a la composición de los gases de la atmósfera (21% de oxígeno frente a un 78% de nitrógeno y un 1% de otros gases), resulta inevitable la formación de otros subproductos, como óxidos de nitrógeno (NO_x).

Dado que la combustión de los hidrocarburos no es perfecta, también se forman en este proceso monóxido de carbono (CO) y materia particulada, que se liberan a la atmósfera junto con los gases anteriormente descritos y los hidrocarburos inquemados.

A nivel medioambiental, todos estos gases (y algunos más que se describirán a continuación) pueden agruparse en función de los dos efectos más importantes en los que participan: el efecto invernadero y la lluvia ácida. Aunque la mayor parte de estos gases también resultan nocivos para la vida animal cuando se expone a ellos, su alta capacidad de dispersión y baja concentración en la naturaleza hace que este efecto pueda despreciarse.

3.1.7.1. Precursores del efecto invernadero

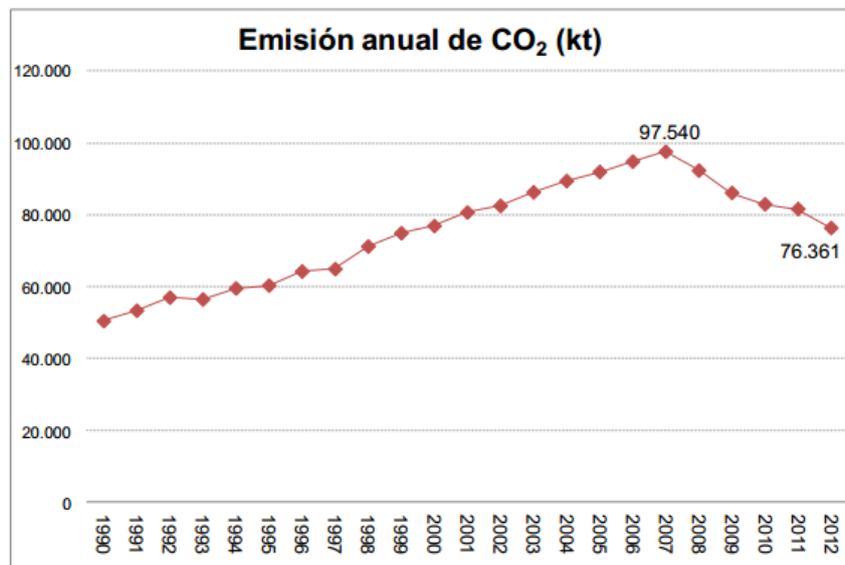
El efecto invernadero es el fenómeno mediante el cual determinados gases de entre los que componen la atmósfera de la Tierra retienen parte de la energía radiante que esta emite como cuerpo caliente. El efecto invernadero es un proceso natural, sin el cual la vida en la Tierra no sería posible tal y como la conocemos, pues toda su superficie estaría a unos -18 °C.

Debido a la actividad humana, algunos de los gases que generan este fenómeno (conocidos como Gases de Efecto Invernadero, GEI) han ido aumentando su concentración en la atmósfera a lo largo de la historia, contribuyendo a un aumento de la temperatura de la superficie terrestre, con efectos sobre los ecosistemas y las condiciones climáticas en la Tierra.

Los GEI de larga permanencia y origen antropogénico son el CO₂, el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los CFCs. De estos, los tres primeros están presentes en los gases de escape de los vehículos tradicionales con motor de combustión interna.

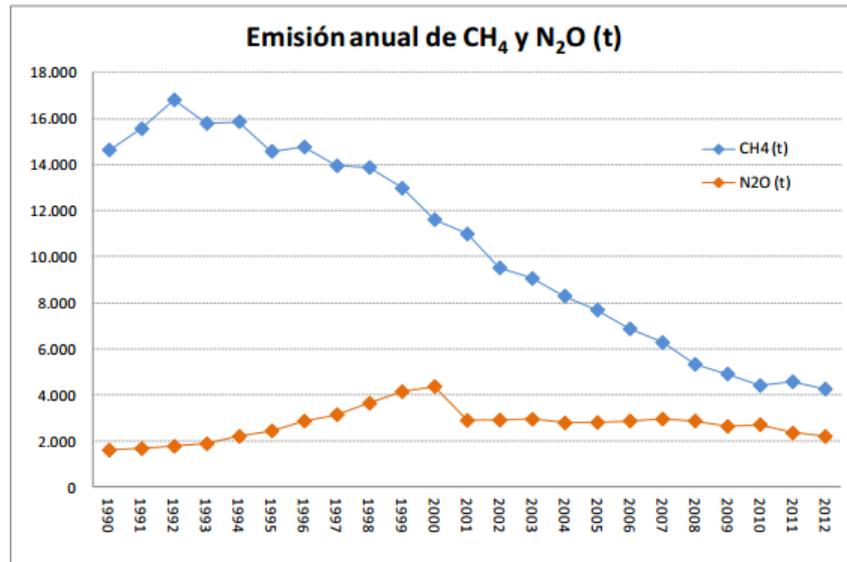
De todos ellos, las emisiones de CO₂ son las que tienen mayor importancia, debido a que el volumen total de gas emitido es mucho mayor que el resto. Así, aunque el potencial de calentamiento atmosférico del metano es 25 veces superior al del CO₂ para un horizonte de 100 años (y hasta 75 veces superior para 5 años), las emisiones CH₄ con origen en el transporte por carretera apenas superaron las 4.000 toneladas en el año 2012 en España, frente a las más de 76 millones de toneladas de CO₂. Lo mismo sucede con el N₂O, un gas con un altísimo potencial de efecto invernadero (hasta 298 veces más que el CO₂ [23]), pero cuyas emisiones apenas superaron las 2.000 toneladas en el año 2012.

En los gráficos que se muestran a continuación (Figura 8 y 9) puede verse la evolución de las emisiones de los distintos GEI con origen en el transporte por carretera en España entre los años 1990 y 2012.



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera (MAGRAMA) hasta 2010 y estimaciones con datos CNE entre 2011 y 2012

Figura 8 - Emisiones anuales de CO₂ (kt) [24]



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera (MAGRAMA) hasta 2010 y estimaciones con datos CNE entre 2011 y 2012

Figura 9 - Emisiones anuales de CH4 y N2O (t) [24]

Tal y como puede observarse, las emisiones de los tres tipos de GEI estudiados han sufrido un crecimiento negativo en los últimos años, pero la explicación de dicha tendencia es bien distinta para cada uno de los casos.

- La caída de las emisiones de N₂O tiene un origen directo en las mejoras tecnológicas introducidas en los vehículos, como la instalación de catalizadores, así como en la prohibición de la venta de gasolina con plomo en el año 2001 y en el endurecimiento de las normativas anticontaminación europeas.
- Algo similar sucede en el caso de CH₄, aunque en este caso también tiene efecto la mejora en los procesos de refinado de los carburantes, que producen combustibles más limpios, de mejor calidad y capacidad de combustión, y que dan lugar a una menor cantidad de hidrocarburos inquemados.
- Finalmente, en el caso del CO₂ también son notables las mejoras técnicas introducidas en los últimos años para reducir las emisiones de este gas contaminante. Sin embargo, el brusco descenso a partir de 2007 tiene un origen directo en la crisis económica. Así, es muy probable que en condiciones macroeconómicas similares a las que había antes de 2007, las emisiones de CO₂ hubieran seguido la misma curva ascendente, lo que refleja que aún hay un amplio camino por recorrer.

No obstante, es importante destacar que mientras los vehículos sigan funcionando mayoritariamente con MCI, la reducción total de estas emisiones sólo tendrá lugar previa reducción del parque automotriz, ya que las emisiones de CO₂ son inevitables en este sentido.

3.1.7.2. Precursores de la lluvia ácida

Se denomina lluvia ácida al conjunto de las precipitaciones que presentan altas concentraciones de sustancias acidificantes, como ácido sulfúrico y ácido nítrico. Aunque hay algunos fenómenos naturales como las erupciones volcánicas o la descomposición de la

materia orgánica que pueden dar lugar a la lluvia ácida, la mayor parte de estas precipitaciones tienen un carácter marcadamente antropogénico. [25]

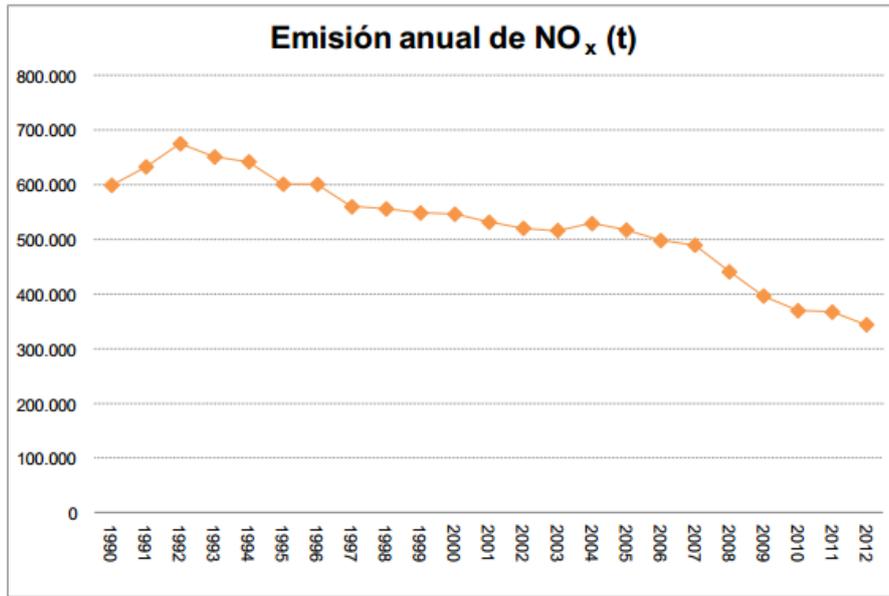
Generalmente, la lluvia presenta un pH ligeramente ácido, de aproximadamente 5.65, debido a la presencia de ácido carbónico, cuyo origen es el CO₂ atmosférico. Se considera que la lluvia es ácida cuando presenta un pH menor que 5, y en algunos casos puede llegar a 3, el nivel de pH del vinagre.

Los efectos de la lluvia ácida en la naturaleza son múltiples. Por una parte, la lluvia ácida tiene un efecto directo en los cauces hidrológicos y los acuíferos al acidificar el agua que estos contienen. Esto a su vez tiene efectos indeseados, como la absorción de aluminio, que puede resultar tóxico para la fauna que habita esas aguas. Además, la lluvia ácida también puede atacar a las plantas en función de su resistencia a los ambientes corrosivos, llegando incluso a inhibir la capacidad de reproducción de algunos árboles, así como reaccionar con los nutrientes del suelo, impidiendo su correcta absorción.

Los principales precursores de la lluvia ácida son los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre y el trióxido de azufre. De estos, es el trióxido de azufre el que tiene una mayor capacidad acidificante. Sin embargo, en el caso de los automóviles, las emisiones más importantes son las de NO_x.

Se denomina NO_x a todo el espectro de óxidos de nitrógeno, una amplia gama de gases que se generan al combinarse el oxígeno y el nitrógeno del aire durante la combustión. Aunque su efecto sobre la lluvia ácida no es el más preocupante de cuantos tienen, suponen más de la mitad de las emisiones de gases acidificantes en peso, y uno de los principales objetivos de reducción a la hora de introducir nuevas medidas tecnológicas y catalizadores.

Esto ha supuesto que las emisiones de NO_x se hayan reducido notablemente en las últimas décadas. Tal y como puede verse en la Figura 10 (página siguiente), que analiza la evolución de estas emisiones en España entre los años 1990 y 2012, la caída se ha acrecentado a partir del año 2007. De nuevo en este caso a los avances tecnológicos hay que añadirles el efecto de la crisis económica. Aún así, la tendencia es positiva y no hay indicios de que vaya a cambiar una vez comience la recuperación económica, sino todo lo contrario, aunque aún hay un gran margen de mejora.



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera (MAGRAMA) hasta 2010 y estimaciones con datos CNE entre 2011 y 2012

Figura 10 - Emisiones anuales de NOx en España (t) [24]

Tradicionalmente se ha incluido también entre las emisiones precursoras de la lluvia ácida propias de los vehículos al óxido de azufre (SO₂). Sin embargo, la normativa actual en Europa es muy restrictiva respecto al contenido de azufre en los carburantes, estando limitado este a 10 ppm. Así, las emisiones de SO₂ del transporte por carretera apenas representaban el 0.7% de las emisiones totales de SO₂ en la Unión Europea en el año 2008 [27], y en el último informe, correspondiente a datos de 2011 [28], ni siquiera aparece como una fuente perceptible de SO₂. Además, en este mismo informe se indica que la reducción de las emisiones desde el año 1990 es superior al 99%. La distribución de emisiones de SO₂ por fuente en Europa está representada en la Figura 11.

Distribución de Emisiones de SO2 en Europa por fuente 2008-2011 (CEE)

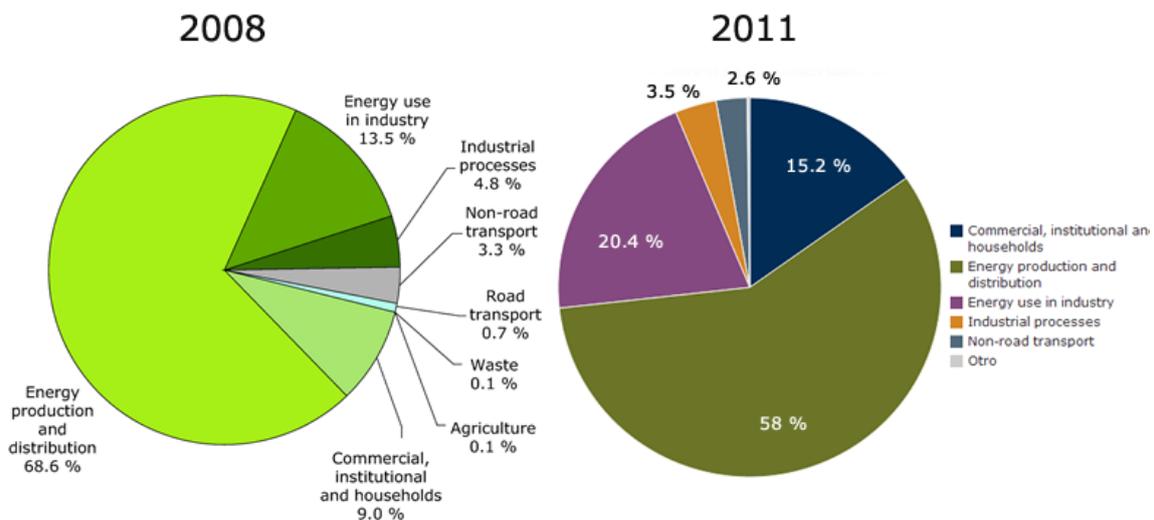
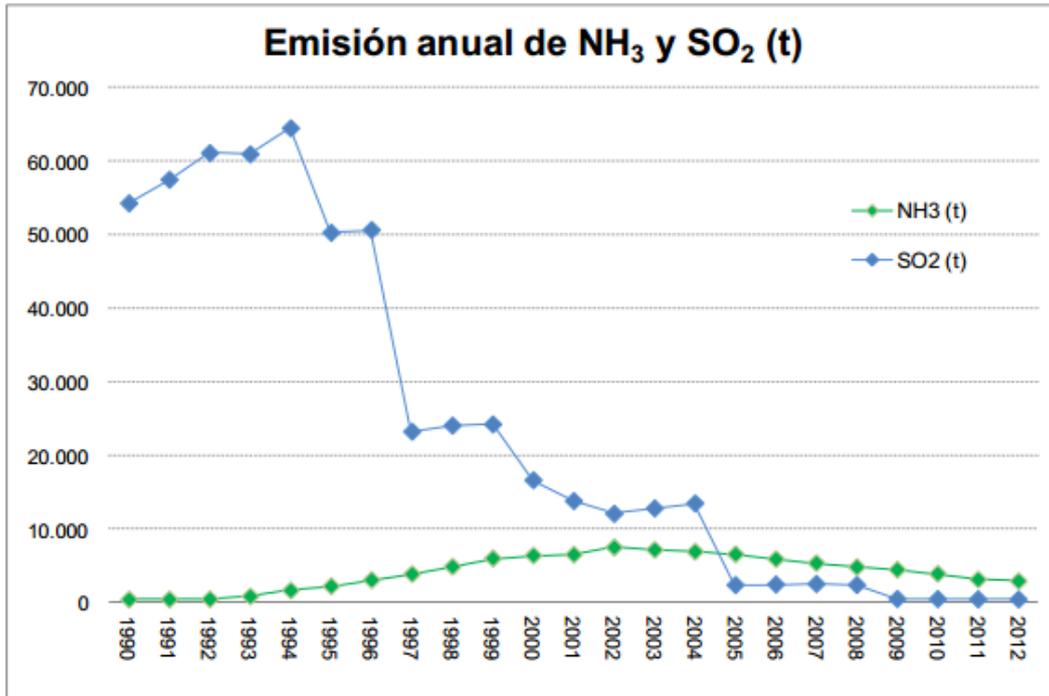


Figura 11 - Comparación de emisiones de SO2 en Europa por origen [27, 28]

Lo mismo sucede con el amoníaco, un agente acidificante cuyas emisiones han sufrido un brusco descenso en las últimas décadas debido a la mejora de los procesos tecnológicos, y cuyas emisiones se encuentran cercanas a cero en la actualidad, tal y como se puede observar en la Figura 12.



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera (MAGRAMA) hasta 2010 y estimaciones con datos CNE entre 2011 y 2012

Figura 12 - Emisiones anuales de NH3 y SO2 (t) [24]

3.2. Problemas urbanos

Los problemas estudiados anteriormente estaban referidos exclusivamente al entorno natural. Sin embargo, el transporte por carretera, y más específicamente el transporte personal, tiene unas implicaciones aún mayores en áreas urbanas, donde se localiza la mayor parte de la actividad. En la mayor parte de los casos, estas implicaciones tienen una relación directa con las explicadas en el epígrafe anterior, aunque con sus particularidades.

En cualquier caso, las implicaciones que se exponen a continuación son las que tienen una mayor importancia para el desarrollo de este TFG, puesto que no se debe olvidar que el objetivo final no es sino buscar las alternativas más adecuadas a las que se imponen en la actualidad para optimizar el transporte privado en las ciudades.

Pero antes de pasar a analizar estos problemas, también es conveniente echar un vistazo al pasado para descubrir que los problemas ocasionados por el transporte en las ciudades no son sólo una cosa del presente.

3.2.1. Antecedentes históricos

Los vehículos automóviles con motor de combustión interna no sólo no son el primer medio de transporte que ocasiona problemas en la vida en las ciudades, sino que a su aparición a mediados del siglo XIX, junto con el tranvía eléctrico, se presentaron como la solución más ecológica y salubre al gran problema del transporte del momento: el caballo.

Para ilustrar el problema que suponían los caballos en las áreas urbanas de finales del siglo XIX, el mejor ejemplo se encuentra en Nueva York, donde unos 200.000 equinos se hacinaban en las calles para dar servicio a una población de 3 millones de personas.

Con una producción media de entre 14 y 16 kilogramos diarios de estiércol por caballo, cada día se acumulaban en las calles de Nueva York alrededor de 3.000 toneladas de excremento animal. Dato al que hay que sumarle los efectos indirectos por la presencia de ratas, moscas y otros animales indeseables que, atraídos por el exceso de comida, superpoblaron las calles de la ciudad.

Entonces la aparición del automóvil, junto con el tranvía eléctrico, supuso la panacea, la salvación de la ciudad. Un nuevo medio de transporte ecológico, símbolo de la limpieza y el progreso, cuya presencia se incrementó exponencialmente con el paso de los años, pasando a sustituir al caballo como principal medio de transporte... y también como principal fuente de problemas. [29]

3.2.2. Consumo de espacio

El consumo de espacio es uno de los principales problemas que el transporte privado ocasiona en las ciudades. Sólo es necesario salir a la calle para darse cuenta de algo evidente: la mayor parte del suelo público está dedicado al automóvil. No sólo las calles han de tener unas dimensiones lo suficientemente grandes como para permitir el paso de los vehículos, sino que a esta demanda de espacio de circulación hay que añadirle otra igual de importante: la demanda de espacio para aparcamiento.

En casi todas las grandes ciudades, la falta de aparcamiento es una restricción en el uso de los vehículos privados, así como una fuente indirecta de contaminación ambiental, al suponer la búsqueda de aparcamiento una parte importante del trayecto.

Además, la proliferación de zonas de aparcamiento subterráneas o edificios dedicados son sólo una solución parcial al problema, pues siguen ocupando un espacio de gran valor que en otra situación podría aprovecharse para otro fin.

Según datos de la European Parking Association [31], se calcula que en hay alrededor 40.9 millones de plazas de aparcamiento registradas, tanto públicas como privadas, entre los 19 países que conforman la asociación, y estiman en unos 190 millones el número de aparcamientos no registrados. Suponiendo unas dimensiones medias de 4.40x2.20 m, esto implica unas 223,5 mil hectáreas de valioso suelo urbano desaprovechado.

3.2.3. Congestión del tráfico

Los atascos en las áreas urbanas de los grandes núcleos de población también son una consecuencia directa del problema de consumo de espacio: la demanda de espacio para circular es mayor que el espacio disponible para dicha actividad, de forma que las vías de transporte no tienen capacidad para gestionar todo el volumen de tráfico que desea hacer uso de ellas.

El problema de la congestión es especialmente importante a la entrada y a la salida de las grandes ciudades, en las carreteras que circunvalan las grandes capitales y sirven de interconexión entre sus distintos puntos geográficos.

Uno de los principales problemas a la hora de abordar la congestión en estos puntos se debe a la retroalimentación: los atascos se producen en momentos puntuales del día, como las horas de entrada y salida del trabajo. La presencia de atascos hace que muchas personas que en condiciones más favorables irían a trabajar en transporte privado hagan uso del transporte público. Sin embargo, cuando el operador decide aumentar la capacidad de la vía, la mayor oferta de espacio produce un efecto llamada a muchas de estas personas que no utilizaban el vehículo privado por la simple existencia del atasco, aumentando así el número de usuarios de la carretera hasta el punto en el que los atascos vuelven a convertirse en una constante.

Esto mismo sucede en el caso de los aparcamientos: el aumento de la oferta de parking ejerce un efecto llamada en muchos usuarios que se abstenían de usar el coche por la ausencia de espacio para aparcar, de forma que la oferta no es capaz de satisfacer a la demanda de forma sostenible.

Además, de nuevo en un símil con la búsqueda de aparcamiento, los atascos son también una importante fuente de ineficiencias energéticas en la operación de los vehículos privados, así como el origen de buena parte de las emisiones de gases de efecto invernadero en las ciudades.

3.2.4. Contaminación atmosférica

En entornos urbanos, el mayor problema medioambiental derivado de la utilización de medios de transporte privados se encuentra en la contaminación atmosférica. No en vano, este tipo de contaminación es responsable de la muerte de más de 7 millones de personas cada año en todo el mundo. [30]

Con anterioridad se han enumerado algunos de los gases emitidos por el tubo de escape de los vehículos equipados con MCI y sus consecuencias medioambientales. En todos los casos se trata de compuestos con múltiples efectos, que en grandes concentraciones pueden resultar nocivos para la salud de las personas. Esta es precisamente su principal consecuencia en las ciudades, donde debido a la gran cantidad de tráfico, las emisiones se acumulan en el ambiente, dando lugar a concentraciones importantes de estos gases que posteriormente son inhalados por los ciudadanos.

Cuando estos contaminantes se acumulan, se produce el denominado *smog* fotoquímico. La palabra *smog* deriva de los términos anglosajones *smoke* (humo) y *fog* (niebla), y define claramente este efecto: una neblina oscura formada principalmente por ozono troposférico, material particulado, NO_x y VOCs.

Los contaminantes que forman el *smog* fotoquímico tienen su principal origen en las industrias y el transporte. Bajo unas determinadas condiciones atmosféricas (inversión térmica), estos contaminantes no se dispersan, sino que se acumulan en las capas más bajas, dando lugar a “boinas” de contaminación que cubren el cielo de las ciudades, tal y como puede apreciarse en la Figura 13.



Figura 13 - Smog fotoquímico en Madrid [32]

3.2.4.1. Dióxido de carbono

A pesar de su nocividad como precursor del calentamiento global y de ser el gas de escape por excelencia, los efectos del dióxido de carbono en las ciudades no son preocupantes. La exposición a concentraciones inferiores a las 20.000 ppm (una concentración varios órdenes de magnitud superior a la que suele darse en las ciudades) no ha reportado efectos negativos en la salud humana. [33]

3.2.4.2. Óxidos de nitrógeno

Además de ser precursores de la lluvia ácida, tal y como se indicó anteriormente, la presencia de NO_x en el ambiente también tiene efectos adversos para la salud humana. Por ejemplo, el dióxido de nitrógeno puede irritar las vías respiratorias y exacerbar las enfermedades del sistema respiratorio. Además, los NO_x son precursores del ozono troposférico, y su capacidad para reaccionar con algunos compuestos puede derivar en agentes mutagénicos y cancerígenos [34].

Por su parte, el monóxido de nitrógeno puede reaccionar con la hemoglobina, dando lugar a la metahemoglobina, un compuesto que no libera el oxígeno en los tejidos.

Algunos estudios también han demostrado que los niños que se encuentran expuestos continuamente a NO₂ tienen mayores probabilidades de desarrollar problemas respiratorios.

3.2.4.3. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono emitido por los automóviles tiene su origen en la combustión incompleta del carburante. Se trata de un gas incoloro e inodoro que resulta tóxico al respirarlo, puesto que es capaz de pasar a la sangre a través del sistema respiratorio y combinarse con la hemoglobina, dando como resultado carboxihemoglobina. Este compuesto es incapaz de transportar oxígeno a través del cuerpo, por lo que la exposición a grandes concentraciones de CO puede llegar a causar incluso la muerte. Además, el CO es un importante precursor del ozono troposférico.

Tal y como puede comprobarse en la Figura 14, las emisiones anuales de CO se han visto reducidas en España desde el año 1992, cuando alcanzaron su pico, gracias a la obligatoriedad de instalar catalizadores en los motores de gasolina a partir de 1993 y en los diesel a partir de 1997.

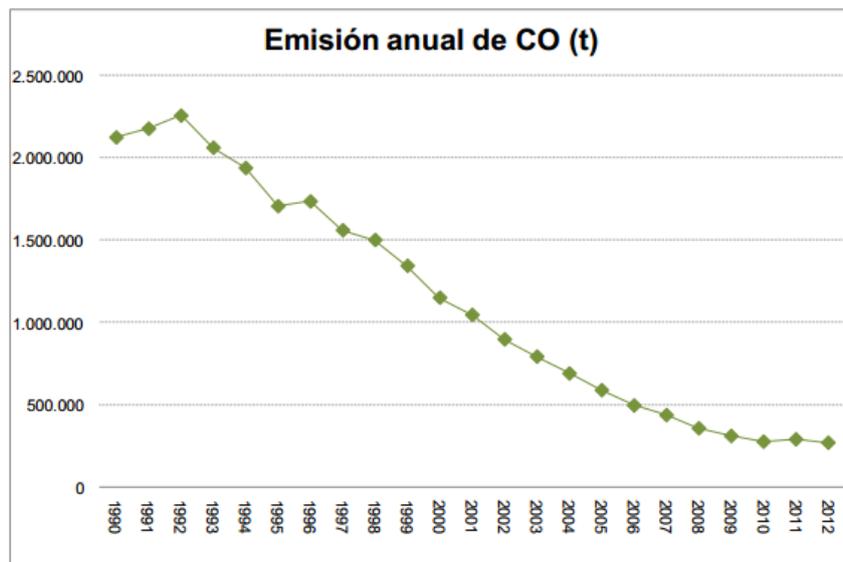


Figura 14 - Emisiones de CO en España (t) [24]

3.2.4.4. Compuestos orgánicos volátiles

Generalmente denominados VOCs por sus siglas en inglés. Se trata de una serie de hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente, o que son muy volátiles a dicha temperatura. Aunque algunos VOCs tienen origen natural, los que ocupan este caso se originan por la combustión incompleta de los carburantes. Estos compuestos también son precursores del ozono troposférico, pero además algunos de ellos pueden resultar nocivos para la salud, con distintas consecuencias, como problemas respiratorios, irritación de ojos y garganta, o efectos psiquiátricos, como irritabilidad o dificultad para la concentración. Algunos como el benceno pueden tener también efectos cancerígenos.

Las emisiones de VOCs se han reducido enormemente en los últimos años, de nuevo gracias a la obligatoriedad de la instalación de catalizadores y a las mejoras tecnológicas. El auge de los biocombustibles también ha contribuido a su reducción. [35]

3.2.4.5. Ozono troposférico

El ozono troposférico no es un contaminante emitido directamente por los automóviles, sino que se forma por la reacción de algunos gases de escape con el oxígeno y la luz solar. Como ya se ha indicado con anterioridad, estos precursores del ozono troposférico son principalmente los NO_x (que actúan como catalizadores), el monóxido de carbono y los VOCs. También actúan como precursores del ozono los óxidos de azufre, aunque tal y como se indicó en el punto 3.1.7.2 (pg. 24), las emisiones de SO₂ son tan reducidas en la actualidad que no suponen un riesgo.

El ozono troposférico tiene graves efectos en el sistema respiratorio, y la exposición a bajas concentraciones de este gas durante periodos de tiempo más o menos prolongados (entre 6 y 7 horas) tiene como consecuencia una importante bajada de la función pulmonar en personas sanas, y más aún en aquellas afectadas por enfermedades del sistema respiratorio, como el asma. [36]

3.2.4.6. Materia particulada

También denominada PM por sus siglas en inglés. Se conoce como materia particulada al conjunto de partículas sólidas o líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera. La materia particulada está formada por pequeños trozos o gotas de distintos compuestos, como cenizas, sales, VOCs condensados o gotas de ácido. Estas partículas pueden introducirse en el sistema respiratorio a través de la respiración normal, con graves efectos en la salud humana.

La materia particulada se clasifica en función del tamaño, aumentando su nocividad a medida que este disminuye. El principal problema se encuentra en las partículas más finas (entre 10 y 2.5 micras de diámetro o menos), que pueden abrirse paso hasta las zonas más profundas de los pulmones, bloqueando su capacidad e induciendo daños en los tejidos. La materia particulada es también origen de enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón. Además, al contrario de lo que ocurre con el resto de contaminantes, se han registrado daños en la salud para todos los niveles de concentración de partículas, no existiendo un valor umbral. [37]

Existe una estrecha relación entre la materia particulada y las muertes prematuras en ambientes urbanos, por lo que se trata del principal problema a erradicar. Además, la materia particulada también tiene otros efectos, como su contribución a la formación del smog fotoquímico.

3.2.5. Ruidos y vibraciones

El ruido procedente del tráfico es una de las principales causas de contaminación acústica en las ciudades. Los vehículos automóviles generan ruido a través de diversas fuentes: el motor, la transmisión, el contacto rueda-carretera, el claxon... Aunque la contaminación acústica puede parecer en cierto modo un problema menor, lo cierto es que, en humanos, la

exposición a ruidos superiores a 75dB(A) (ruido típico en una calle transitada) puede tener efectos directos en la salud, desde un aumento del estrés o el insomnio a la pérdida crónica de la audición [38].

El tránsito de vehículos también puede inducir vibraciones en los edificios cercanos a las carreteras, debido generalmente a las irregularidades del terreno. No obstante, no se ha demostrado que estas vibraciones tengan efectos negativos sobre las estructuras de los edificios ni sobre la salud humana.

3.3. Accidentes de tráfico

Los accidentes de tráfico son uno de los más graves problemas a los que se enfrenta el transporte personal. Aunque ningún medio de transporte está libre de accidentes y el número de víctimas mortales está altamente correlacionado con el número de pasajeros que transportan cada año, los medios de transporte personal (automóviles y motocicletas principalmente) tienen una alta tasa de mortalidad en comparación con otros medios por carretera, como el tranvía o el autobús.

Además estos medios de transporte no sólo resultan peligrosos para quienes los utilizan, sino que también están involucrados en la mayor parte de los accidentes en los que la víctima es un peatón (la mayoría en el caso de entornos urbanos).

En las Figuras 15 y 16 se observa la distribución de muertes a los 30 días por medio de transporte en Europa, tanto en términos totales como en entornos urbanos. En ellas se puede apreciar la supremacía del automóvil en ambos casos.

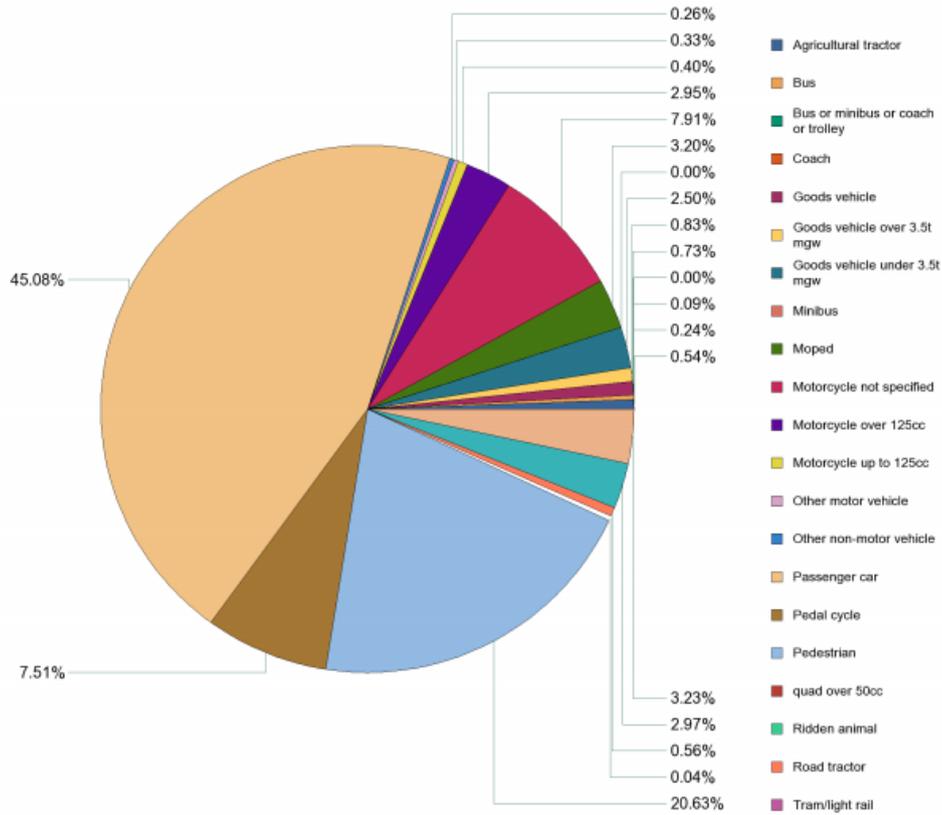


Figura 15 - Distribución del total de muertes a los 30 días por medio de transporte en Europa (Datos 2009-2012) [39]

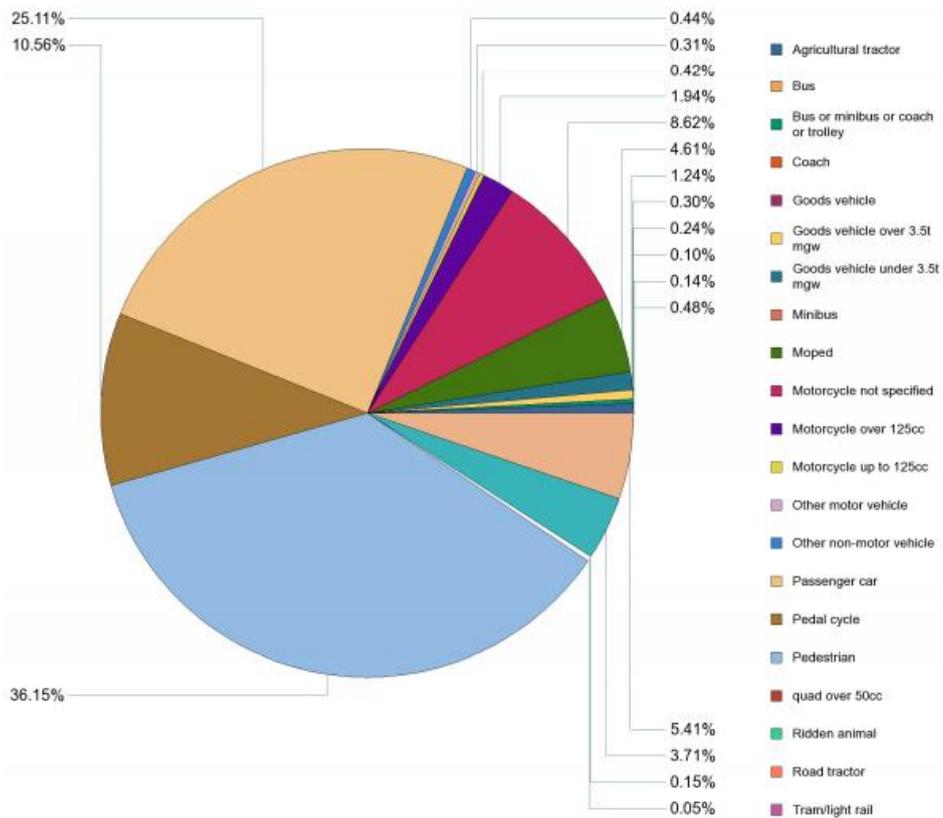


Figura 16 - Distribución de muertes a los 30 días por medio de transporte en Europa en entornos urbanos (Datos 2009-2012) [39]

Afortunadamente, las medidas de seguridad obligatorias introducidas en las últimas décadas, como el uso del airbag y el cinturón de seguridad, así como las mejoras estructurales y en los materiales en los que están fabricados los vehículos, han conseguido reducir enormemente el número de víctimas mortales.

Aún así, tal y como se observa en la Figura 17, en el año 2013 más de 26.000 personas perdieron la vida en Europa debido a los accidentes de tráfico, una cifra equivalente a la población de una ciudad pequeña. Además, por cada muerte registrada se registraron 4 discapacidades inhabilitantes permanentes (como daños cerebrales o a la médula espinal), 8 lesiones serias (como la pérdida de una extremidad) y 50 lesiones menores. Aunque estas cifras corresponden al total de vías, es importante destacar que el 61 % de todos los accidentes y el 36 % de aquellos en los que se registran víctimas mortales tienen lugar en zonas urbanas. [181]

Se trata sin duda de números inaceptables, a los que ni el sector, ni la población, ni los legisladores pueden resignarse, y que evidencian que aún queda un gran camino por recorrer en lo que a seguridad respecta.



Figura 17 - Evolución de las muertes por accidentes de tráfico en Europa 2001-2013 y objetivo hasta 2020 [40]

4. El automóvil y la energía: principales ineficiencias

En el apartado anterior se han comprobado los efectos adversos que las formas actuales de transporte personal tienen tanto en el medio ambiente como en el desarrollo de la vida en las ciudades, así como los accidentes de tráfico. Sin embargo, estos problemas no son los únicos a los que se enfrentan los automóviles. Existe uno de mayor calado, directamente relacionado con muchos de los mencionados antes, al que también es necesario dar solución: el uso de la energía.

Y es que los medios de transporte privados utilizados actualmente han demostrado ser tremendamente ineficientes en lo que al uso de la energía se refiere. Así, el objetivo de este capítulo es dar visibilidad a este problema, para posteriormente analizar en los siguientes puntos cuáles son los avances tecnológicos que podrían contribuir a frenar este despilfarro.

Para clasificar estas ineficiencias es posible atenerse a su origen, de forma que se tienen:

- **Ineficiencias internas:** debidas a la gestión de la energía en el interior del vehículo (pérdidas de energía entre el tanque de combustible y las ruedas).
- **Ineficiencias externas:** son aquellas a las que la energía disponible en las ruedas debe hacer frente para que el vehículo pueda desplazarse.

La mejora de la eficiencia energética resulta fundamental no sólo para el futuro del automóvil, sino también para el futuro económico de Europa. Tal y como puede observarse en la Figura 18, el transporte, casi totalmente dependiente de los combustibles fósiles (de los que la mayor parte proceden de importaciones), es el segundo sector por consumo de energía final en Europa, con 287.1 Mtoe (aproximadamente $3.3 \cdot 10^9$ MWh), de las que el 81.7 % se corresponden al transporte por carretera (tanto de personas como de mercancías).

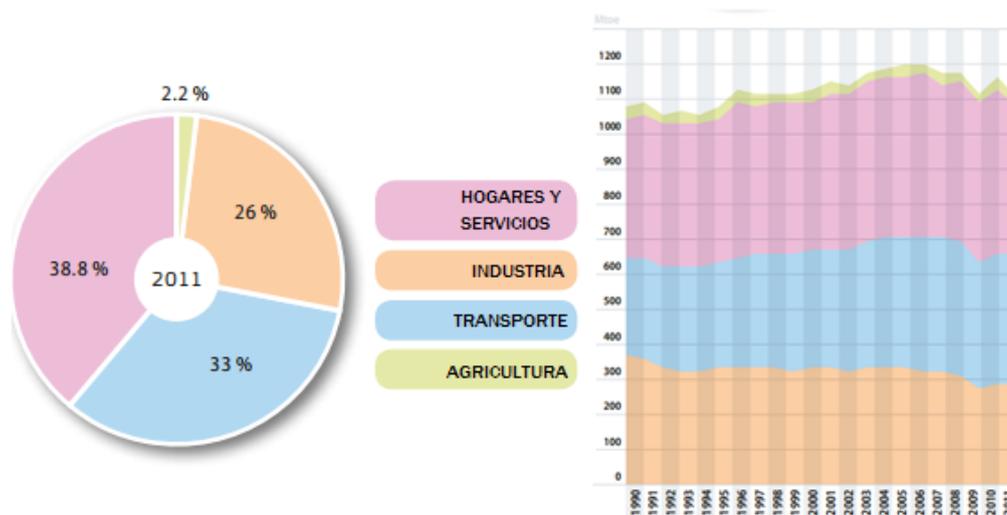


Figura 18 - Consumo de energía en Europa por sector [2]

4.1. Fuentes de ineficiencias

En un vehículo, la mayor parte de las pérdidas de energía (en torno al 80 %) se dan a lo largo de la cadena cinemática, esto es, en el conjunto de los elementos que transforman el combustible en trabajo útil en las ruedas, así como en los componentes que permiten la operación del vehículo (bombas, compresor, alternador...). Generalmente, de la energía presente en el combustible, sólo un 20 % aproximadamente se utiliza para hacer frente a las cargas externas que se oponen al movimiento del automóvil.

Diversos estudios han cuantificado las pérdidas en cada fase, obteniendo resultados que varían ligeramente en función de los vehículos analizados. Con propósito ilustrativo, la Figura 19 muestra el flujo de energía simplificado desde el depósito de combustible hasta las ruedas. No obstante, cabe señalar que las proporciones varían en función de muchos factores, principalmente el tipo de motor utilizado (los motores diésel son sustancialmente más eficientes que los motores de gasolina).

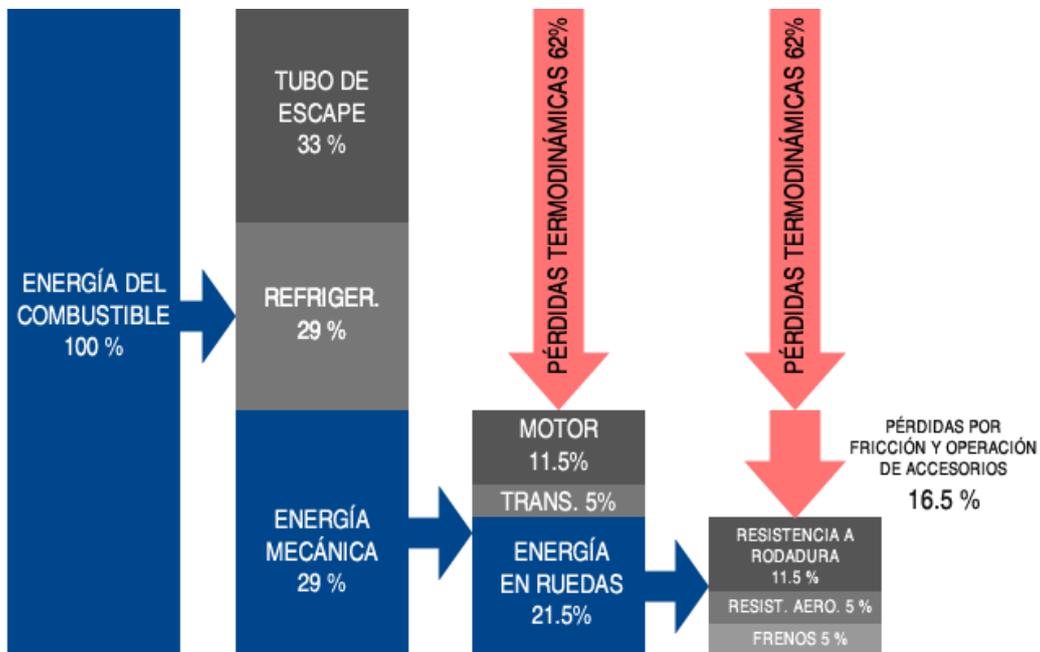


Figura 19 - Flujo de energía en un vehículo con MCI (adaptado de [42])

A partir de estos datos es sencillo identificar dónde se encuentran las mayores posibilidades para mejorar la eficiencia. Así, el conjunto del sistema de propulsión es el que tiene el mayor margen, seguido por las resistencias al avance.

Dado que el sistema de propulsión está formado por todos los elementos que van desde el depósito a las ruedas, para su análisis se han dedicado dos capítulos exclusivos: por una parte, uno destinado al estudio de los motores de combustión interna, el propulsor que incorporan la mayoría de los vehículos actuales y al que se hace referencia en el gráfico anterior; y por otra, uno destinado a las nuevas tecnologías que buscan sustituir a este tipo de motores.

Para el caso de las resistencias al avance, a continuación se analizará qué parámetros tienen mayor influencia en ellas, para posteriormente ofrecer también soluciones al respecto.

En primer lugar se estudiarán los parámetros que contribuyen al consumo de combustible según la siguiente relación (Ecuación 1) [43]:

$$CC = \frac{\int c_e \cdot P \cdot dt}{\int v \cdot dt} = \frac{\int c_e \cdot \left(\frac{F_t \cdot v}{\eta}\right) \cdot dt}{\int v \cdot dt}$$

Ecuación 1

Donde: CC = Consumo de Combustible [l/km]

C_e = Consumo específico del motor [l/kWh]

P = Potencia del motor [kW]

t = Tiempo [h]

v = Velocidad instantánea [km/h]

F_t = Fuerza tractora [kN]

η = Rendimiento de la transmisión

Se asume que el consumo específico del combustible en función de la carga y la velocidad son conocidos y no dependen del resto de parámetros. Así, suponiendo la operación de un vehículo a una velocidad determinada durante un periodo de tiempo dado, la fuerza tractora es la única variable que determina las diferencias en el consumo.

Esta fuerza tractora es la suma de las fuerzas a las que el motor tiene que hacer frente para mover el vehículo, es decir, la suma de las fuerzas resistivas de rodadura y resistencia aerodinámica más la fuerza necesaria para acelerar la masa del vehículo. Estas fuerzas se corresponden con el último escalón del gráfico anterior, donde la fuerza de aceleración se transforma en la fuerza de frenado, al tratarse de energía disipada.

En la Figura 20 se muestra un diagrama con las fuerzas mencionadas:

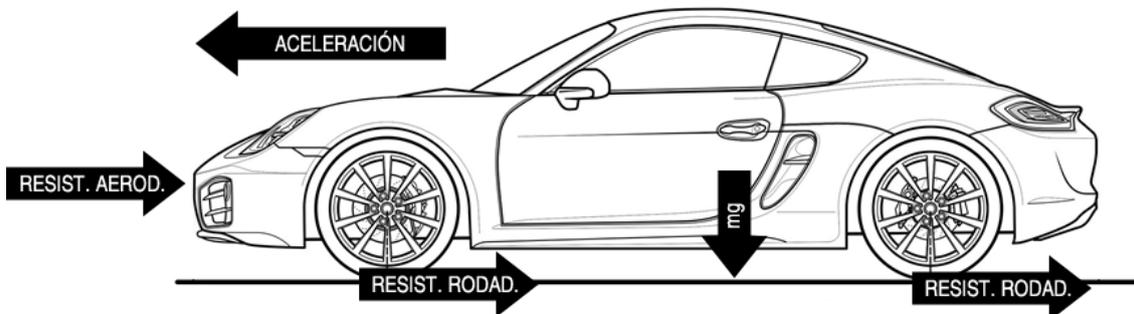


Figura 20 - Diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo en aceleración. Ilustración original: Porsche.

Así, se tiene que la fuerza total obedece a la Ecuación 2:

$$F_t = F_{ROD} + F_{ACE} + F_{AER} = (\gamma \cdot mg) + (ma) + \left(\frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A\right)$$

Ecuación 2

Donde: F_{ROD} = Resistencia a la rodadura [N]

F_{ACE} = Resistencia inercial a la aceleración [N]

F_{AER} = Resistencia aerodinámica [N]

γ = Coeficiente de resistencia a la rodadura

m = Masa del vehículo [kg]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

a = Aceleración del vehículo [m/s^2]

C_x = Coeficiente aerodinámico

ρ = Densidad del aire [kg/m^3]

A = Área frontal del vehículo [m^2]

v = Velocidad instantánea del vehículo [m/s]

Observando los parámetros anteriores puede verse que existen cuatro puntos de acción sobre los que se puede actuar: el coeficiente de resistencia a la rodadura, la masa del vehículo, el coeficiente aerodinámico y el área frontal.

De todos ellos, la masa es la que tiene una mayor importancia en el medio urbano, donde las velocidades máximas que se alcanzan son bajas y el efecto de la resistencia a la rodadura y la fuerza de aceleración son muy superiores a la resistencia aerodinámica.

A continuación se estudiarán cada uno de ellos.

4.2. Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura es la fuerza que se opone al movimiento de rodadura de un cuerpo sobre una superficie. Esta fuerza está asociada principalmente a los mecanismos de histéresis en el interior del neumático, que disipa parte de la energía al deformarse en el contacto rueda-carretera, y es proporcional a la masa del vehículo. [44]

Las pérdidas de potencia originadas por la resistencia a la rodadura se deben a:

- Pérdidas por histéresis en el neumático (90%).
- Rozamiento entre el neumático y la superficie de rodadura cuando se producen deslizamientos (8%).
- Resistencias debidas al contacto con el aire interior y exterior (2%). [45]

La histéresis en los neumáticos se debe a su composición de caucho, un material viscoelástico que, cuando se deforma, almacena una cierta cantidad de energía como deformación elástica, disipando el resto en forma de calor. [46]

Debido a la naturaleza de la histéresis y a la complejidad de los neumáticos actuales, el estudio de este fenómeno es asimismo complejo, ya que sobre él tienen influencia una gran cantidad de variables, tanto de diseño del neumático y la calzada como de operación. Así, algunos de los parámetros que afectan al coeficiente de resistencia a la rodadura son:

- Tipo de estructura del neumático. Neumáticos radiales ofrecen coeficientes de resistencia a rodadura más pequeños.
- Espesor de la banda de rodadura. A mayor espesor, mayor histéresis, y por tanto mayor resistencia a la rodadura.
- A medida que aumenta la velocidad aumenta el coeficiente de rodadura, sobre todo a partir del valor máximo para el que se ha diseñado el neumático.
- Temperaturas más altas favorecen la reducción del coeficiente de rodadura.
- El aumento de la carga supone un aumento del coeficiente de rodadura. [45]

El impacto que la resistencia a rodadura tiene en el consumo de combustible ha sido estudiado en diversas investigaciones, con resultados distintos en cada caso. En general, se calcula que una reducción del 10% de la resistencia a rodadura daría lugar a variaciones en el consumo de combustible de entre el 1.5% y el 2%. [47]

La Figura 21 muestra los resultados de una simulación realizada por el International Council on Clean Transportation (ICCT) para comprobar la relación existente entre las emisiones de CO₂ y las diferentes clases de neumáticos según su coeficiente de resistencia a rodadura, tal y como se definen en la normativa de la UE. Para realizar la simulación se utilizaron las características de un vehículo del segmento B con motor de gasolina de inyección directa, combustión estequiométrica, turbocompresor, y una transmisión de 6 velocidades y doble embrague. El ciclo de conducción simulado se corresponde con el ciclo de homologación mixto.

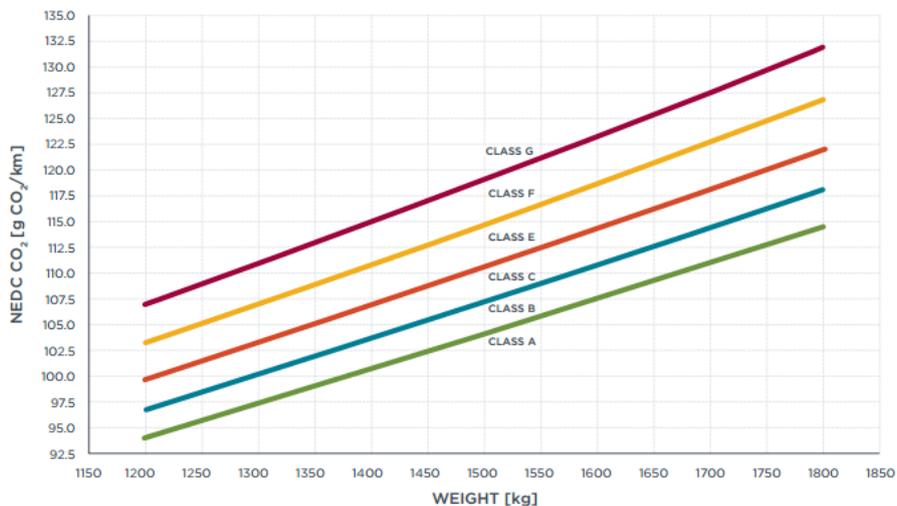


Figura 21 - Relación entre emisiones de CO₂ y clases de neumáticos según la normativa europea [47]

Las clases de de neumáticos mostradas en la Figura 21 quedan definidas por los coeficientes de resistencia a la rodadura mostrados en la Tabla 1:

Clase	$\gamma \cdot 10^3$
A	<6.5
B	6.6 – 7.7
C	7.8 – 9
D	No se utiliza
E	9.1 – 10.5
F	10.6 – 12.0
G	>12.1

Tabla 1 - Clases de neumáticos y coeficientes de rodadura

Con el objetivo de reducir la resistencia a rodadura, los fabricantes de neumáticos han desarrollado compuestos con reducidos coeficientes de rodadura, cuya principal característica es la incorporación de sílice en el caucho. No obstante, en este aspecto no existe un gran margen de mejora por parte de los fabricantes. Sí existe en cambio un amplio espacio para la concienciación de los consumidores, no sólo hacia la compra de este tipo de neumáticos, sino también hacia el mantenimiento de los mismos en condiciones óptimas, como la presión, que siempre debe ser aquella para la que han sido diseñados.

Aún así, hay margen para la reducción de la resistencia a rodadura a través de la reducción del peso del vehículo, una característica a la que es proporcional, y cuyo estudio se detalla a continuación.

4.3. Ineficiencias por exceso de masa

El peso ¹medio de los coches destinados al transporte de pasajeros vendidos en Europa en el año 2012 fue de 1.330 kg [48]. Dado que el peso medio de un europeo adulto es de 70.8 kg [49], tomando una tasa de ocupación media de 1.65 personas por vehículo (esta tasa oscila entre 1.5 y 1.8 pasajeros para los distintos países de la UE [50]) se tiene que utilizar un coche en Europa supone mover 1.447 kg para transportar tan sólo 117 kg.

Anteriormente se ha comprobado que, a igualdad de condiciones, un mayor peso implicará utilizar una mayor cantidad de energía para desplazar un vehículo, puesto que tanto las fuerzas de inercia que ha de vencer el motor como la resistencia a rodadura son proporcionales a este parámetro. A la vista de estos datos, resulta evidente que el simple uso de un automóvil es un ejercicio energéticamente muy ineficiente.

Esta ineficiencia es irresoluble, y se da para todos los medios de transporte. Sin embargo, en el coche resulta especialmente gravosa, dada la baja relación *masa del vehículo / masa de los ocupantes* que existe. Por suerte -o por desgracia-, en la reducción del peso de los automóviles hay aún un gran espacio de mejoras con grandes posibilidades para disminuir tanto el consumo como las emisiones asociadas.

¹ A lo largo de este capítulo se hace referencia en numerosas ocasiones al peso de los vehículos. Realmente, de lo que se está hablando en todos los casos es de masa, aunque para facilitar la lectura se utiliza este término, mucho más extendido en el lenguaje común.

Sin embargo, a pesar del empeño de los fabricantes por desarrollar estructuras ligeras y utilizar materiales resistentes de baja densidad, como la fibra de carbono o el aluminio, la tendencia del mercado es hacia el aumento del peso de los vehículos a lo largo del tiempo. El gráfico que se presenta a continuación (Figura 22) muestra el peso medio de los vehículos vendidos en algunos países de la UE entre los años 2001 y 2012, así como la media para el conjunto de los 27. En él se observa cómo, a pesar del descenso puntual que se produjo en el año 2009, la tendencia positiva se ha recuperado, y la masa media de los vehículos vendidos continúa en aumento.

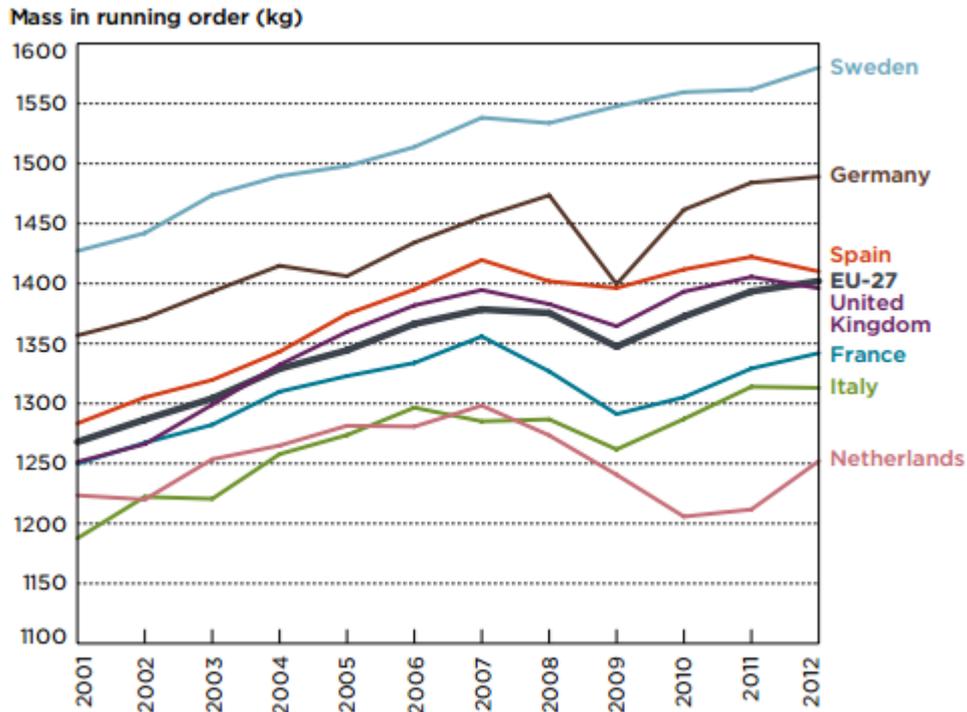


Figura 22 - Evolución de la masa media de los vehículos vendidos en Europa por países [48]

Esta tendencia no sólo evidencia un movimiento del mercado hacia la adquisición de coches más grandes y pesados, algo que, tal y como se vio en la introducción, está ocurriendo, sino también que el peso medio de los automóviles de todos los segmentos, excepto el de los todoterrenos y SUV, se ha incrementado paulatinamente a lo largo de la última década, en torno a un 1% anual.

La evolución de estos datos para el mercado europeo se muestra en la Figura 23.

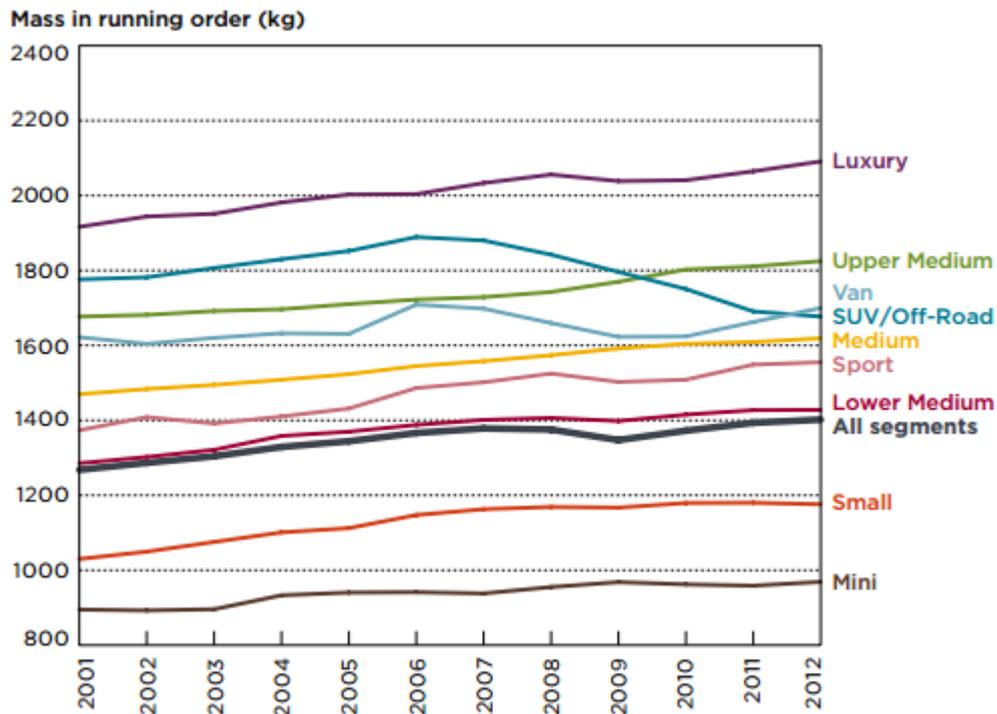


Figura 23 - Evolución de la masa media de los vehículos vendidos en Europa por segmento [48]

Las causas de este aumento de peso son evidentes cuando se comparan dos versiones de un mismo modelo de vehículo fabricadas en años muy distanciados. Por ejemplo, un Volkswagen Golf de primera generación (Mk1, 1974) pesaba en torno a los 800 kg en vacío, mientras que todas las variantes de la última versión (Mk7, 2013) superan ampliamente los 1.300 kg. Sin duda la mejora en las condiciones de seguridad y confort y la tendencia al crecimiento del volumen disponible tienen un impacto enorme a la hora de pasar por la báscula.

Este es un problema serio, ya que la correlación masa-emisiones de CO₂ (y por tanto masa-consumo de combustible) es muy fuerte. En la gráfica de la Figura 24 (página siguiente) se aprecia perfectamente este efecto. Aquí también puede observarse el efecto positivo que las medidas para aumentar la eficiencia de los motores y reducir las pérdidas de energía han tenido a lo largo de los años para todos los tamaños de vehículo.

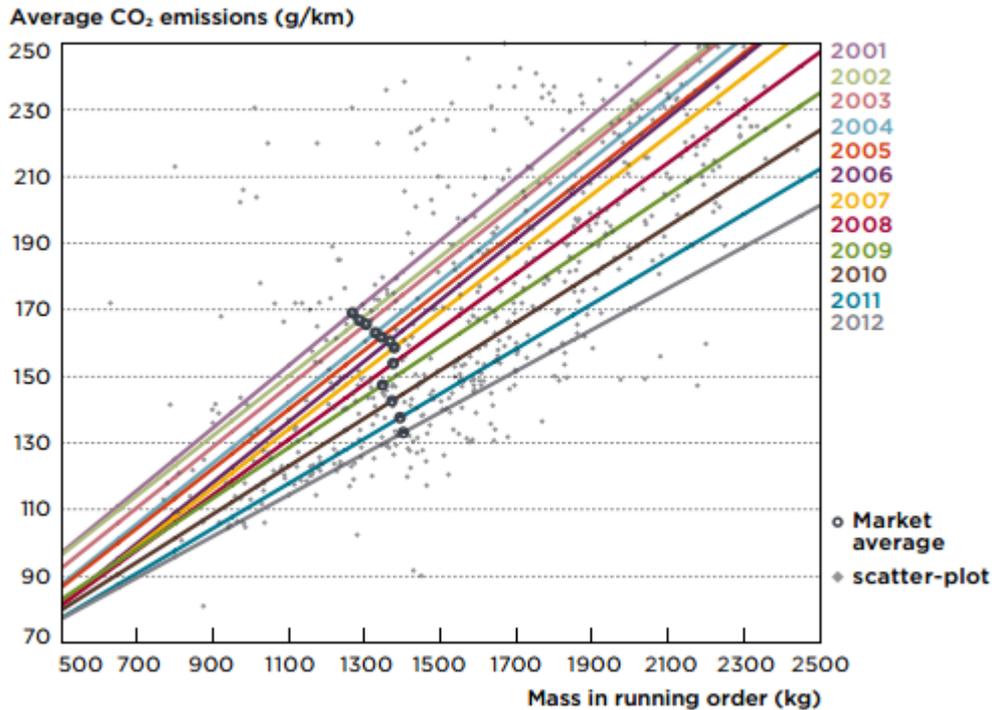


Figura 24 - Correlación entre la masa y el consumo de combustible para la serie 2001-2012 [48]

Con todo esto, está claro que una reducción del peso tiene potencial para reducir el consumo de combustible de un vehículo. No obstante, resulta difícil cuantificar el efecto directo que el *adelgazamiento* tiene sobre este parámetro, ya que los factores a tener en cuenta son múltiples, y dependen tanto de cada modelo en particular como de las características del ciclo de conducción empleado en la evaluación, etc.

Así, aunque existen multitud de estudios al respecto, la variedad en los resultados es bastante amplia. En algunos casos se reportan mejoras en el consumo de entre el 4.5 y el 8 % por cada reducción del peso del 10 %. En otros se habla de reducciones de entre 0.15 y 0.7 litros/100 km por cada 100 kg eliminados. [51]

A la hora de ahorrar peso en nuevos vehículos, existen distintos medios a través de los cuales puede actuarse. Se podría establecer una clasificación en tres puntos principales:

1. Sustitución de materiales por otros de menor densidad y/o mayor resistencia específica.
2. Rediseño de los vehículos enfocado a la reducción de masa, con volúmenes inferiores y estructuras más ligeras.
3. Aprobación de medidas que fomenten la compra de vehículos pequeños en perjuicio de los grandes.

A continuación se desarrollarán los puntos primero y segundo. El tercero tiene un carácter puramente político, y poco puede hacerse en ese sentido desde el ámbito de la ingeniería.

4.3.1. Incorporación y sustitución de materiales ligeros.

En la actualidad, el principal material del que están compuestos los coches es el acero. Según datos de la Organización Internacional de Constructores de Automóviles, este material suponía hasta un 64% de la masa de un vehículo medio en 2010, seguido por los plásticos (21%) y metales no ferrosos, principalmente aluminio (7%) [52]. En la Figura 25 se muestra la distribución de componentes de un automóvil medio en el año 2010 por material de fabricación.

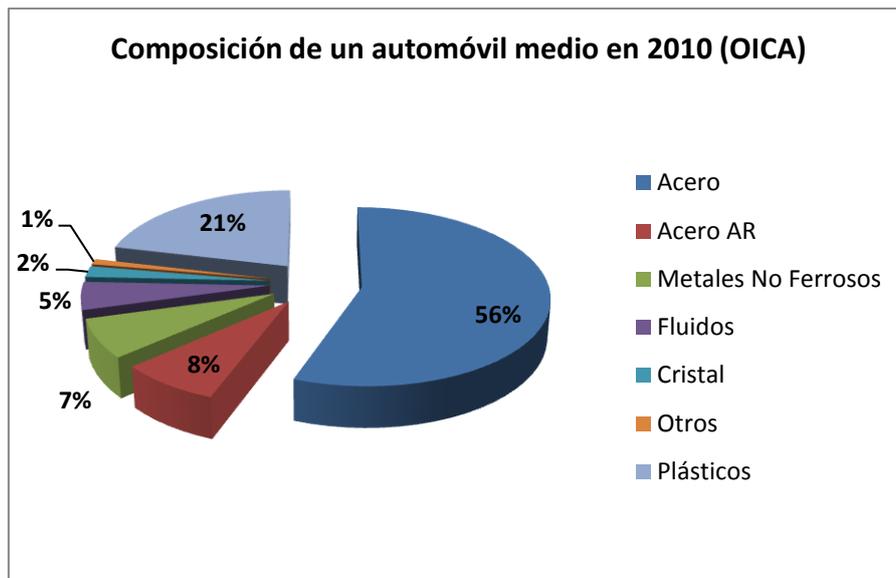


Figura 25 - Composición de un automóvil tipo en 2010 [52]

A pesar de que se trata de un material con muy buenas propiedades mecánicas, el acero tradicional (de baja resistencia) cada vez se está viendo sustituido en mayor medida por nuevas aleaciones de alta resistencia, así como por aluminio, principalmente, aunque también por nuevos compuestos poliméricos y fibra de carbono reforzada en vehículos más avanzados. No obstante, la sustitución de materiales no es una tarea sencilla, y su viabilidad depende tanto de factores técnicos como económicos.

A continuación se describen algunos de estos materiales alternativos que podrían contribuir a una reducción de pesos en los automóviles, así como el impacto que tendría su implantación en nuevos vehículos.

4.3.1.1. Aceros

El principal uso del acero en automóviles se encuentra tanto en la estructura como en la carrocería. La aplicación de variantes de alta resistencia permite reducir la sección de los elementos estructurales para una rigidez dada, reduciéndose por tanto el peso del conjunto. En la Figura 26 se muestra la aplicación del acero en la estructura de un Audi A3.



Figura 26 - Uso de distintos aceros en la estructura de un Audi A3 (modificado de Audi)

Los aceros de alta resistencia son aquellos cuyo límite elástico se encuentra entre los 210 y los 550 MPa, considerándose de ultra alta resistencia cuando superan los 550 MPa. Se distinguen de los aceros tradicionales en su composición, al presentar elementos de aleación, y en el empleo de tratamientos térmicos para su conformado.

El uso del acero cuenta con múltiples ventajas frente a otros metales. Por ejemplo, la incorporación de aceros de alta resistencia permite seguir utilizando la infraestructura existente en las fábricas actuales. Otra característica de gran importancia es su soldabilidad. [53]

Algunos estudios calculan que el uso intensivo de acero de alta resistencia podría llevar a reducciones de peso del 35% en algunos componentes. [54] Otros, como el realizado por el Instituto Internacional del Hierro y el Acero, cifran las posibles reducciones en el conjunto del chasis en el 25%.

4.3.1.2. Aluminio

El aluminio es un material muy ligero, cuya densidad apenas alcanza un 35 % de la del acero (2.700 kg/m^3 frente a 7.850 kg/m^3). Además es un material con un alto límite elástico y resistencia a la tracción, aunque con un relativamente bajo módulo de Young.

La aplicación del aluminio en la actualidad se encuentra sobre todo en piezas fundidas, como el bloque motor, la transmisión o las llantas. En piezas estructurales, la diferencia de peso entre una viga de acero y una de aluminio con las mismas propiedades mecánicas se reduce, puesto que las peores propiedades mecánicas del aluminio obligan a utilizar perfiles de mayor tamaño.

Además, el aluminio es más difícil de ensamblar que el acero, y requiere de una combinación de técnicas que incluyen fijaciones mecánicas, uniones adhesivas y soldaduras MIG o TIG.

A pesar de todo, existen modelos de automóviles en el mercado con chasis de aluminio. Por ejemplo, Audi lleva más de dos décadas perfeccionando su tecnología ASF (Audi Space Frame) [56], una estructura de aluminio de alta resistencia que ha incorporado en los modelos A2, A8 y R8, y con la que ha conseguido reducciones de peso de hasta el 40 %. Por su parte, Land Rover ha desarrollado un monocasco de aluminio para su última versión del Range Rover Sport, que reduce el peso un 39% respecto al modelo anterior, fabricado con una estructura de acero. [57]

No obstante, cabe destacar que el aluminio es un material más caro que el acero. Los modelos anteriormente citados son automóviles *premium*, orientados a un tipo de clientes con alto poder adquisitivo, pero parece improbable que estas estructuras vayan a imponerse en automóviles de carácter más generalista.

4.3.1.3. Magnesio

El magnesio es el metal más ligero de cuantos existen, y su aplicación en sustitución del acero o el aluminio puede dar lugar a reducciones de peso del 60% y el 20% respectivamente, manteniendo la rigidez.

No obstante, su uso es muy reducido en la actualidad, y su expansión está limitada por el alto precio (hasta un 75% más caro que el acero y un 33% más caro que el aluminio) y los retos técnicos que es necesario acometer para su uso en determinadas aplicaciones. En la actualidad, los coches contienen entre 5 y 6 kg de magnesio [58]. En el año 2005 esta cifra era de 3.5 kg, y la industria esperaba alcanzar los 160 kg en 2020, una cifra que supondría reducir el peso total de los vehículos en un 15% [59], pero que parece imposible en la actualidad.

4.3.1.4. Materiales compuestos de matriz polimérica

Los materiales poliméricos suponen hasta un 21% del peso de un vehículo, y principalmente se encuentran en el interior del mismo. No obstante, el desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica está dando lugar a su uso en aplicaciones estructurales.

Destacan el uso de polímeros reforzados con fibra de vidrio, fibras naturales, y sobre todo fibra de carbono (CFRP).

Los dos primeros tienen una resistencia mucho menor que la fibra de carbono, pero su precio también es muy inferior, por lo que es probable que su uso se extienda en vehículos de bajo coste. No obstante, es en la fibra de carbono en la que se encuentra el mayor potencial de reducción de peso, puesto que con ella pueden conseguirse estructuras con la misma rigidez y resistencia que el acero pero con reducciones de peso de hasta un 50%. [54]

El primer monocasco de CFRP para un vehículo de producción masiva ha sido desarrollado por BMW para su modelo i3, y ya se encuentra en el mercado. El ahorro conseguido está entre los 250 y los 350 kg [60], que en este caso compensan el sobrepeso producido por las baterías,

al tratarse de un vehículo híbrido enchufable. En la Figura 27 se muestra una imagen de este monocasco que da una idea muy clara de su ligereza.



Figura 27 - Monocasco del BMW i3 (BMW)

Este tipo de chasis se han utilizado con anterioridad en otro tipo de automóviles, generalmente superdeportivos enfocados al lujo y la entrega de máximas prestaciones, con producciones muy limitadas y precios estratosféricos.

4.3.2. Rediseño de los vehículos hacia la reducción de masa

La segunda estrategia para reducir la masa de los vehículos es el rediseño de los mismos con este propósito. Esto no solo implica el desarrollo de nuevos modelos estructurales (que generalmente están asociados con el uso de nuevos materiales, como la estructura en forma de panal de abeja del BMW i3 que se observa en la Figura 28), sino también la reconfiguración de los modelos para reducir su tamaño total. Vehículos de menor tamaño no sólo tendrán un chasis más ligero, sino que también incorporarán sistemas de propulsión más reducidos.



Figura 28 - Estructura en forma de panal de abeja del BMW i3 (BMW)

También existe una gran oportunidad para la reducción de peso en el interior, donde los *extras* acumulan sistemas como el navegador, el reglaje eléctrico de los asientos o la calefacción integrada en los mismos. Todo este aumento en el confort va en perjuicio de una mayor eficiencia energética. Asimismo los sistemas de seguridad pasiva y los dispuestos para reducir las emisiones también tienen un considerable impacto en el peso total del vehículo. De hecho, estos sistemas son la principal contribución al aumento de la masa desde los años 80, con más de 200 kg extra [61]. Este efecto puede apreciarse en la Figura 29, que muestra una evolución en la distribución del peso en automóviles para el mercado estadounidense desde 1975 hasta el año 2010.

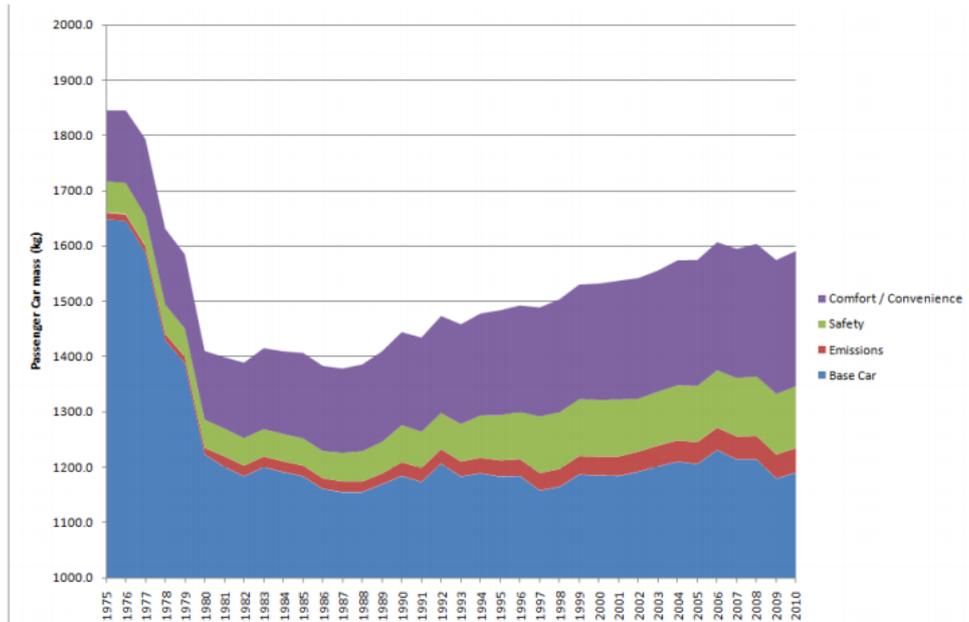


Figura 29 - Evolución de la distribución de masas en un automóvil por función [61]

En el futuro, buena parte de la masa destinada a sistemas de seguridad pasiva podría verse reducida gracias a la incorporación de sistemas de comunicación coche a coche y coche a infraestructura, mecanismos de detección de peatones, y finalmente la integración y el despliegue de sistemas de conducción autónoma, que se estudiarán en el capítulo 7 de este TFG.

No obstante, los mecanismos de seguridad pasiva seguirán siendo necesarios a corto y medio plazo, hasta que una importante fracción del parque automovilístico en uso incorpore estos sistemas.

4.4. Pérdidas por resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica es la principal fuente de pérdidas de energía en conducción por carretera, pero su variación con el cuadrado de la velocidad hace que su contribución se reduzca abruptamente en ciclos urbanos.

Reducir la resistencia aerodinámica es posible a través de dos parámetros: el coeficiente de resistencia aerodinámica C_x y el área frontal del vehículo. Este último sólo depende del

tamaño del coche, por lo que automóviles más pequeños conducirán a menores pérdidas por resistencia aerodinámica.

Existen cuatro mecanismos que contribuyen al aumento de la resistencia aerodinámica:

- Resistencias de presión en el flujo exterior: contribuyen en más del 70%.
- Resistencias de rozamiento en el exterior: contribuyen en más del 10%.
- Resistencia interna: contribuye hasta el 10%.
- Resistencia de densidad en el flujo exterior: contribuye más del 10%. [62]

La resistencia de densidad es originada por los salientes (retrovisores, antena...) y puede reducirse con medidas como la sustitución de espejos por modelos más aerodinámicos o incluso cámaras integradas en la carrocería, la eliminación de las barras portaequipaje... Además, todos estos elementos también contribuyen a aumentar el área frontal del vehículo.

Otras posibles mejoras se encuentran en el carenado de las ruedas y los bajos, así como en la optimización de los perfiles. No obstante esto último es algo que ya se realiza para cada modelo. En las últimas décadas los fabricantes han puesto especial atención en la mejora de las capacidades aerodinámicas de los vehículos, con un uso intensivo del túnel del viento en sus desarrollos.

Con la incorporación de todas estas medidas, un prototipo funcional listo para entrar en producción como el Volkswagen XL1 (Figura 30) ha conseguido un C_x de tan sólo 0.189 [63], frente al estándar de la industria, que se encuentra alrededor de 0.3. No obstante, parece improbable que coeficientes aerodinámicos tan bajos vayan a imperar en los modelos futuros. Los principales motivos son dos: el encarecimiento del desarrollo de los vehículos y la reducción de la funcionalidad asociada a algunos perfiles. El XL1, por ejemplo, apenas llega a los 1.15 metros de altura máxima (frente a los 1.54 de un Volkswagen Golf, un modelo de dimensiones contenidas), y su habitabilidad interior es mínima.



Figura 30 - Volkswagen XL1 en el túnel del viento (Volkswagen)

En general, se estima que el consumo de combustible se reducirá en torno al 1.5 % gracias a la incorporación de mejoras aerodinámicas [64]. Esta cifra está calculada para el uso de un

automóvil en todos los entornos. En zonas urbanas, con bajas velocidades, la reducción sería muy inferior, y en términos reales, casi insignificante.

4.5. Conclusiones

El peso es la principal característica de un automóvil que puede mejorarse con el objetivo de reducir las ineficiencias externas al vehículo en entornos urbanos. Su efecto tanto sobre las fuerzas de inercia a las que el motor debe sobreponerse para acelerar, como sobre la resistencia a la rodadura, hacen que el potencial de reducción sea muy amplio.

En vehículos tradicionales con MCI es posible una reducción del peso de entre un 20-38% a medio plazo a través de la sustitución de materiales pesados por otros más ligeros de alta resistencia [65], así como eliminando una parte de los sistemas de confort y seguridad pasiva. Además, sería posible una reducción mayor en el peso, de hasta un 50%, si se produjera un abaratamiento de las tecnologías de producción de CFRP que permitieran su uso intensivo en automóviles utilitarios de bajo precio. Incluso se podrían conseguir mayores reducciones en la masa total del parque automovilístico si el mercado se desplazara hacia segmentos de menor tamaño.

Partiendo del peso medio actual de los vehículos vendidos en Europa, 1.330 kg, una reducción de la masa del 25% (330 kg) podría suponer una mejora en el consumo de entre 0.5 y 2.3 l/100 km. No obstante, alcanzar estas cifras dependerá de la limitación en los sistemas de confort y seguridad, así como en la concienciación de los usuarios en el uso de neumáticos de baja resistencia a la rodadura.

Frente a esto, el potencial de reducción del consumo a través de las mejoras en el coeficiente de rodadura se encuentra alrededor del 1.5%-2% por cada diez puntos porcentuales de reducción de dicho coeficiente, mientras que la optimización del coeficiente aerodinámico apenas llevará a reducciones del 1.5% en usos mixtos, lo que en términos reales significa que en entornos urbanos este potencial es despreciable.

5. Motores de combustión interna

El objetivo de este capítulo es realizar un breve repaso a los Motores de Combustión Interna (MCI), la tecnología más importante en el mundo de la automoción, que ha definido su historia desde su aparición, y que previsiblemente seguirá jugando un papel decisivo en los próximos años.

Los MCI son la fuente de potencia que emplea casi el 100% de los vehículos que se encuentran en circulación en la actualidad, tanto para el transporte de pasajeros como de mercancías. Casi la totalidad de los coches, autobuses, camiones, aviones y barcos utilizan motores de combustión interna para desplazarse, siendo el tren (incluyendo en este término a tranvías, metros, etc.) el único medio en el que la electricidad juega un papel relevante actualmente.

El MCI es por tanto un habitante común de las ciudades, y una de las principales tecnologías que hace posible el transporte dentro de ellas. No obstante, también se trata de la principal fuente de problemas, lo que pone en riesgo su supremacía frente a otras tecnologías emergentes, como la propulsión eléctrica con baterías. Aún así, su desaparición parece improbable, al menos a corto plazo, y todo indica que aún le queda una importante trayectoria por recorrer.

DEFINICIÓN: Se denomina Motor de Combustión Interna a los motores que aprovechan directamente la energía química almacenada en el combustible, a través de la combustión del mismo, transformándola en energía mecánica. Al contrario de lo que ocurre en otros motores, como la máquina de vapor, este proceso se realiza sin modificaciones intermedias. [66]

Los MCI pueden clasificarse en función de la continuidad de su combustión. Así, tenemos dos grandes grupos:

- **Motores de Combustión Interna Intermitentes:** dentro de esta clasificación, se pueden establecer una división en función de la forma de desplazamiento:
 - De desplazamiento alternativo.
 - De desplazamiento rotativo (Wankel).
- **Motores de Combustión Interna Continua** (turbinas de gas).

En el campo de la automoción, los motores más importantes son los MCI Intermitentes de desplazamiento alternativo, y por tanto serán a los se preste especial atención en este capítulo.

5.1. Introducción a los motores de combustión interna alternativos

El funcionamiento de los MCI alternativos se basa en la combustión de un carburante, líquido o gaseoso, con el aporte de aire atmosférico en un recinto cerrado denominado cilindro, para obtener potencia en un eje. Esta combustión genera variaciones cíclicas de volumen y presión en el interior del cilindro, lo que provoca el movimiento de un émbolo o pistón alojado en él, que está acoplado a su vez a un cigüeñal, obteniendo finalmente un movimiento rotativo.

Este funcionamiento cíclico implica un proceso de renovación de la carga en cada ciclo a través del cual se expulsan los gases de escape del ciclo anterior y se admite la nueva mezcla de aire fresco y combustible para el nuevo ciclo.

Existen múltiples tipos de MCI alternativos, así como diversas formas de clasificarlos. Generalmente se establecen dos: en función del tipo de ignición, y en función de la forma en la que se produce la renovación de la carga:

- En función del tipo de ignición:
 - Motores de Ignición Forzada (MIF): necesitan una chispa para iniciar la combustión.
 - Motores de Ignición Espontánea (MIE): el inicio de la combustión se produce al alcanzarse la temperatura de ignición en el cilindro debido a la compresión de los gases.

- En función de la renovación de la carga:
 - Motores de 4 tiempos: el ciclo se completa en cuatro carreras del émbolo. La admisión y el escape se controlan mediante válvulas.
 - Motores de 2 tiempos: el ciclo se completa en dos carreras del émbolo. No se requieren válvulas, ya que la admisión y el escape responden a un proceso de barrido de los gases.

5.1.1. Motores de dos y cuatro tiempos

5.1.1.1. Motores de dos tiempos

Los motores de dos tiempos son aquellos que realizan las cuatro etapas del ciclo termodinámico (admisión, compresión, explosión y escape) en una sola vuelta del cigüeñal. En estos motores, la admisión y la expulsión de los gases se realiza a través de unos orificios denominados lumbreras, que carecen de válvulas, siendo el pistón el que abre y cierra las lumbreras en función de su posición.

En la Figura 31 pueden observarse las operaciones que dan lugar al ciclo de dos tiempos. Posteriormente también se detalla la descripción de cada una de ellas.

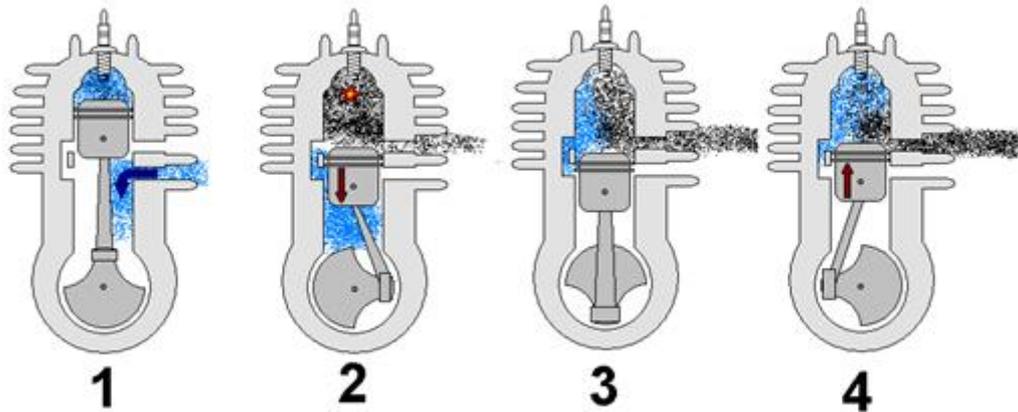


Figura 31 - Motor de combustión interna de dos tiempos [67]

1. Cuando el émbolo se encuentra en el PMS, la lumbrera de admisión permanece abierta.
2. Se produce la ignición de la masa de gases correspondiente al ciclo anterior. El descenso del pistón descubre la lumbrera de escape por la que sale el gas caliente, arrastrando a los gases frescos hasta la parte superior.
3. Los gases frescos ocupan la cámara de combustión a medida que los gases de escape salen al exterior.
4. El ascenso del pistón cierra la lumbrera de escape mientras comprime los gases frescos. En su ascenso descubrirá la lumbrera de admisión.

5.1.1.2. Motores de cuatro tiempos

En los motores de cuatro tiempos, el ciclo termodinámico se completa en cuatro carreras del pistón, o lo que es lo mismo, en dos vueltas del cigüeñal. Así, en cada carrera del pistón sucede una operación distinta. Estas operaciones son (para un motor de gasolina):

1. Admisión: El pistón comienza a descender desde el PMS, instante en el que se abre la válvula de admisión para dejar pasar hasta el cilindro el aire fresco. Esta válvula se cierra cuando el émbolo llega al PMI.
2. Compresión: El pistón comienza su ascenso desde el PMI. Ambas válvulas están cerradas, por lo que el gas se comprime. Cuando el pistón alcanza de nuevo el PMS, una chispa provoca la explosión del combustible, empujando de nuevo el pistón hasta el PMI.
3. Expansión: El pistón desciende desde el PMS hasta el PMI por el efecto de la explosión.
4. Escape: Una vez alcanzado el PMI, la válvula de escape se abre. De nuevo el pistón asciende hasta el PMS, empujando en su recorrido a los gases de escape hacia el exterior.

El funcionamiento de este ciclo puede observarse en la Figura 32.

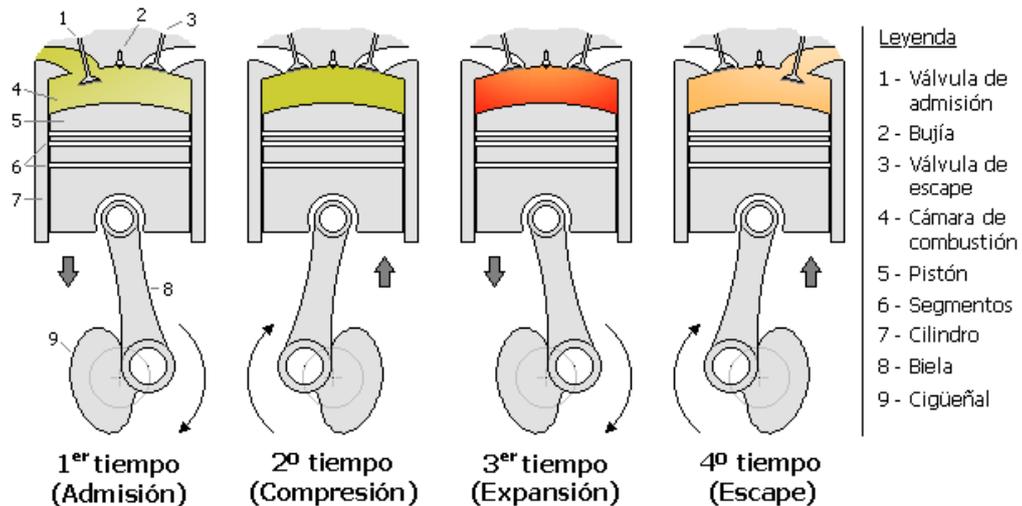


Figura 32 - Funcionamiento de un motor de cuatro tiempos de gasolina [67]

Los motores de cuatro tiempos son más complejos que los motores de dos tiempos, ya que, entre otras cosas, y como se ha indicado anteriormente, los segundos no precisan de válvulas, ni del mecanismo asociado a su funcionamiento. Además, al producirse una explosión por cada dos vueltas del cigüeñal, la potencia desarrollada por los motores de cuatro tiempos es inferior que la de un motor de dos tiempos de la misma cilindrada, y su par es más irregular.

No obstante, se trata de motores más eficientes, con un consumo de combustible inferior, y que no precisan de aceite durante la combustión. Esta es la razón por la que todos los vehículos propulsados por MCI utilizan motores de cuatro tiempos: los motores de dos tiempos tienen consumos demasiado elevados, y sus emisiones no se adecúan a la normativa.

5.1.1.3. Motores de dos tiempos en automoción

Si bien en los años 50 y 60 fueron populares los modelos de Saab que utilizaban motores de dos tiempos (Figura 33), la marca sueca los abandonó definitivamente en 1967 por un nuevo modelo de 4 tiempos. [69]

Ford intentó recuperar esta tecnología en 1992, para lo cual desarrolló un proyecto de I+D en colaboración con el motorista Orbital con el objetivo de probar estas mecánicas en su modelo Fiesta. En esa ocasión se trataba de un motor tricilíndrico que cubicaba 1.2 litros y era capaz de entregar 82 CV a 5.000 rpm, con unos consumos de combustible de 4.8, 6.5 y 7.0 l/100 km a 90 km/h, 120 km/h y en circuito urbano respectivamente, así como un consumo de aceite de 4 litros cada 20.000 km. Se construyeron 25 unidades piloto, pero el proyecto no salió adelante. [70, 71]

En los años 90 también Chrysler trabajó para desarrollar esta tecnología, con un proyecto de investigación que duró 7 años y que abandonó en 1997 por la incapacidad de cumplir las normativas de emisiones, principalmente de NOx, cada vez más restrictivas.

El último esfuerzo conocido para resucitar esta tecnología vino de manos de Lotus en el año 2009, con la presentación en el Salón del Automóvil de Ginebra de su concepto Omnivore. Se trata de un motor monocilíndrico de inyección directa, que incorpora un sistema VCR (relación de compresión variable), lo que le permite funcionar con casi cualquier combustible,

propiedad de la que recibe el nombre [72]. Además, aparentemente Omnivore conseguía eliminar el problema de las emisiones característico de los motores de dos tiempos.

“A 2000 rpm y una PME indicada de 2.7 bar, el consumo específico indicado alcanzado es aproximadamente un 10% mejor que los MIF de inyección directa guiada actuales. Los resultados de emisiones son unas impresionantes 20 ppm en el caso de los NOx para cargas inferiores a los 2.3 bar, y las emisiones de hidrocarburos inquemados y monóxido de carbono son similares a las de un motor de cuatro tiempos equivalente”. [73]

La tecnología empleada por Omnivore se explica con mayor detalle posteriormente, en los puntos dedicados a las tecnologías VCR y HCCI.

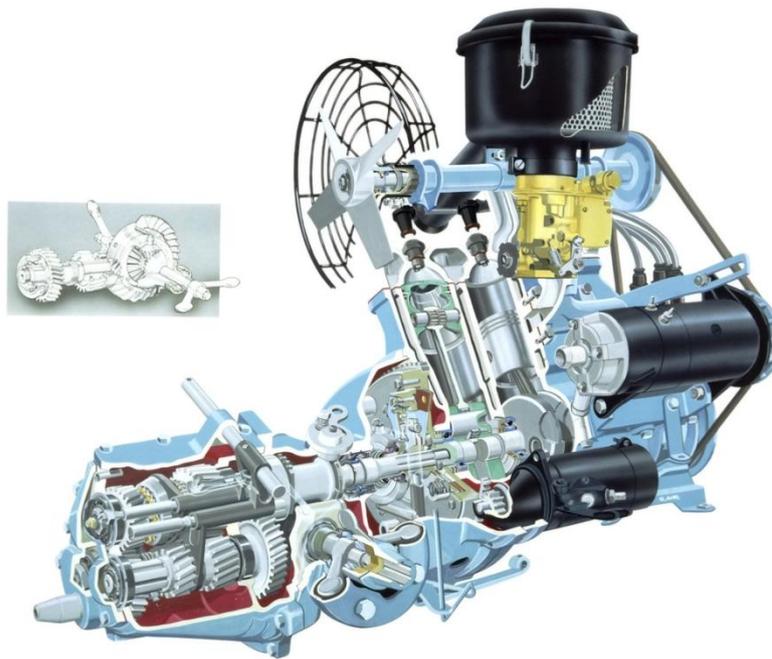


Figura 33 - Motor tricilíndrico de dos tiempos que equipaba el Saab 96 (Saab)

5.1.2. Motores de ignición forzada e ignición espontánea

5.1.2.1. Motores de ignición forzada (MIF)

Se denominan Motores de Ignición Forzada (MIF) a aquellos motores que requieren de una chispa para iniciar la combustión de la mezcla de aire y combustible.

Tradicionalmente, los MIF eran motores de gasolina que seguían el ciclo termodinámico de Otto. Sin embargo, el combustible no tiene por qué ser gasolina, puesto que estos motores también suelen aceptar el uso de GLP, GNC, metanol, hidrógeno y/o etanol.

5.1.2.2. Motores de ignición espontánea (MIE)

Al contrario de lo que sucede con los MIF, los Motores de Ignición Espontánea (MIE) no necesitan el aporte de una chispa para iniciar la combustión, sino que esta se produce cuando la temperatura de la cámara de combustión alcanza la temperatura de ignición del combustible a través de la compresión del aire.

5.2. Repaso histórico a los motores de combustión interna

5.2.1. Historia del motor de gasolina

Los primeros diseños conceptuales para utilizar gas caliente en vez de vapor como medio de trabajo en motores se remontan a las últimas décadas del siglo XVIII. Sin embargo, no fue hasta la primera mitad del siglo XIX cuando surgieron los primeros intentos serios de poner en práctica las ideas teorizadas anteriormente.

En el año 1860, el inventor belga Jean Joseph Étienne Lenoir patentó el primer motor de combustión interna: un modelo de dos tiempos, atmosférico, que utilizaba gas de coque como combustible. De ignición forzada por chispa eléctrica, giraba a 200 rpm y apenas alcanzaba una eficiencia térmica del 4 por ciento.

A pesar de todo, el invento tuvo una buena acogida. El motor desarrollaba una potencia de aproximadamente 2 kW, y Lenoire consiguió vender casi 500 unidades. Este hecho le animó en 1863 a intentar desarrollar un vehículo de tres ruedas propulsado por su motor [Figura 34]. Desafortunadamente, en este caso el éxito fue escaso: el motor pesaba 4 toneladas, el consumo de combustible era inasumible, y apenas llegó a recorrer 11 km en 3 horas. Aún así, este vehículo sirvió como base para futuros desarrollos.



Figura 34 - Jean Étienne Lenoir en el primer vehículo con MCI

Así, el uso de MCI en el mundo de la automoción no se popularizaría hasta años más tarde, con la llegada del motor de cuatro tiempos. Un invento del ingeniero francés Alphonse Eugène Beau, conocido como Beau de Rochas, que patentó en 1862.

Los desarrollos de Beau de Rochas nunca pasaron del plano teórico, pues el ingeniero nunca puso interés en llevar a la práctica su invento, y por eso no es a él a quien se recuerda como padre del motor de cuatro tiempos, sino al alemán Nicolaus August Otto, que desarrolló y perfeccionó la idea para crear la base de lo que hoy se conoce como Ciclo Otto.

El Ciclo Otto es el ciclo termodinámico que se aplica en el funcionamiento de los motores que llevan su nombre, y en su forma ideal sigue la curva de la Figura 35:

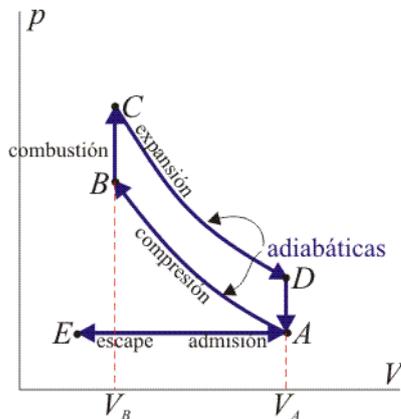


Figura 35 - Ciclo Otto teórico

- EA: Admisión a presión constante.
- AB: Compresión adiabática de los gases en la cámara de combustión.
- B: Encendido de los gases.
- BC: Combustión de los gases a volumen constante.
- CD: Expansión adiabática de los gases en la cámara de combustión.
- D-A-E: Escape.

La fama de Otto no comenzó con el motor de cuatro tiempos, sino con un modelo de dos tiempos que presentó en la Exposición Universal de París de 1867, donde ganó el Gran Premio.

Cuatro años después del lanzamiento al mercado de dicho motor en 1868, Otto formó la Gasmotorenfabrik Deutz AG. Al equipo de esta nueva empresa se incorporaron los ingenieros Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, dos de los pioneros de la industria automotriz mundial, cuya importancia se tratará posteriormente.

Así, en la primavera de 1876, Otto patentó su primer motor de combustión interna de cuatro tiempos, que introducía también el concepto de la combustión estratificada, una innovación que no se popularizaría hasta los años 70 del siglo XX, con el propósito de reducir las emisiones de gases de escape nocivos.

Este primer motor funcionaba también con gas. Tenía una eficiencia térmica del 17 %, y una ratio peso/potencia de 250 g/W, lo que lo convertía en un motor muy ligero para los estándares de la época. El motor entregaba una potencia de 6 kW, unos 8 CV, a 160 rpm, y trabajaba con una relación de compresión de 2.6 y un dosado de 1/9.

La siguiente innovación crítica para el desarrollo de la industria automovilística fue la implementación de la gasolina como combustible para estos motores, un desarrollo que llegó de la mano de Daimler y Maybach tras abandonar la empresa de Otto en 1882.

Se trató de un paso decisivo, ya que la gasolina es un combustible con unas características muy superiores a las del gas de coque. En condiciones ambiente, su densidad energética es entorno a 1.600 veces la de este gas, y su estado líquido lo hace más fácil de manejar.

El primer prototipo funcional desarrollado por Daimler y Maybach vio la luz en 1883, y sirvió como base para el modelo de 0.462 litros y 820 W refrigerado por agua que en 1886 montaron en un carruaje de tres ruedas.

Paralelamente a estos sucesos, aunque de forma independiente, el ingeniero Karl Friedrich Benz, desarrolló su propio motor de dos tiempos, al que sucedió uno de cuatro tiempos que patentó en 1886, tras caducar la patente de Otto. Este motor pesaba sólo 96 kg, tenía un solo cilindro de 0.954 litros de capacidad y rendía 500 W a 250 rpm.

Benz instaló su motor en un coche triciclo en julio de 1886, antes de que Daimler y Maybach hicieran lo propio con el suyo, marcando uno de los hitos más importantes y más recordados de la historia de la automoción: el nacimiento del *Benz-Patent Motorwagen* (Figura 36).



Figura 36 - Karl Benz y Josef Brecht en el Motorwagen

A partir de este punto, el Motor de Combustión Interna sufrió una evolución gradual, surgiendo cada vez más variantes destinadas a su aplicación en automóviles.

En 1901, Daimler presentó el que muchos consideran el primer automóvil moderno de la historia: el Mercedes 35.

El Mercedes 35 (Figura 37) montaba un motor de cuatro tiempos y cuatro cilindros, con 5.9 litros de cilindrada, que proporcionaba 35 CV a 950 rpm. Se trataba de un bloque de aluminio de apenas 230 kg, enfriado por agua gracias a un moderno radiador en forma de panal de abeja, origen de los que se utilizan actualmente.

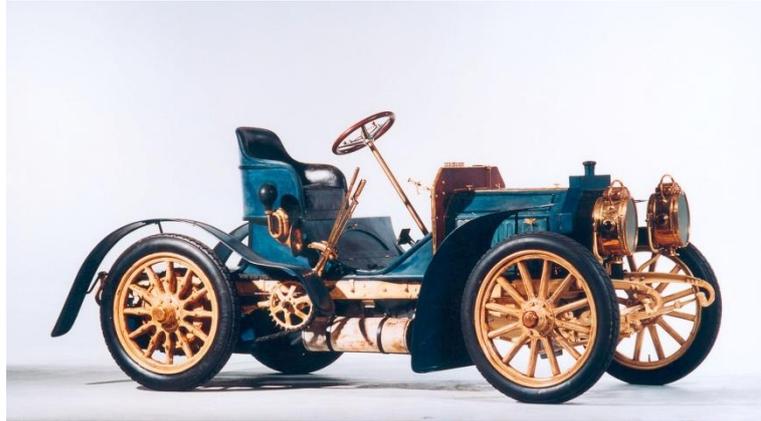


Figura 37 - Mercedes 35

No obstante, la supremacía del MCI frente a la máquina de vapor o el motor eléctrico como tecnología de propulsión para los automóviles no se confirmó hasta la entrada en el mercado del Ford Model T en 1908. Al final de su producción, este coche había superado los 15 millones de unidades vendidas, una cifra impensable para su tiempo.

5.2.2. Historia del motor diésel

El desarrollo del MCI de Ignición Espontánea (MIE), popularmente conocido como motor diésel, es el segundo hito más importante en la historia del automóvil. Este motor debe su nombre a su inventor, el ingeniero alemán Rudolf Diesel.

Hubo dos motivos principales que condujeron a Diesel a desarrollar su motor: por una parte, la obsesión desde temprana edad por conseguir una máquina mucho más eficiente que las existentes en la época, capaz de acercarse al ciclo ideal de Carnot. Tal y como el propio Diesel explica en su libro *Die Entstehung des Dieselmotors (El génesis del motor Diésel, 1913)*:

«Cuando mi estimado maestro, el profesor Linde, explicó a su audiencia en el Politécnico de Munich en 1878, durante su clase de termodinámica, que la máquina de vapor transforma en trabajo efectivo sólo entre el 6 y el 10% del poder calorífico de su combustible; cuando explicó el teorema de Carnot y apuntó que con un cambio de fase isotérmico todo el calor se convertiría en trabajo, yo apunté en el margen de mi cuaderno: “Estudiar si no es posible realizar en la práctica el ciclo isotérmico”. Ahí, en ese momento, me propuse el reto. Aún no había invento, ni siquiera la idea de uno. A partir de entonces, la idea de convertir en realidad el ciclo ideal de Carnot dominó mi existencia. Abandoné la escuela, pasé a la práctica; tenía que ganarme un lugar en la vida. La idea me perseguía incesantemente».

La segunda de las razones que motivaron a Diesel a poner en práctica sus conocimientos tenía carácter político. Enormemente influenciado por las teorías de los socialistas utópicos franceses de la época, Diesel abogaba por un nuevo orden socioeconómico descentralizado, con un sector financiero y un tejido productivo basado en sociedades cooperativas. Diesel creía firmemente que la descentralización de la industria en pequeños negocios mejoraría la

calidad de vida de las personas, y veía en su motor al aliado perfecto para alcanzar esta situación: una fuente de potencia barata y eficiente, capaz de hacer competitiva una manufactura a pequeña escala.

Para alcanzar su sueño de desarrollar una máquina que replicara el ciclo de Carnot lo más fielmente posible, Diesel pensó en un ciclo teórico en el que un volumen de aire 9 veces superior al necesario para quemar completamente el combustible se comprimiría hasta el punto en el que se alcanzaran las condiciones de autoignición del combustible. En ese momento se produciría la inyección y el encendido del mismo.

Según los cálculos de Diesel, a partir de ese punto, el calor generado por la combustión debería equilibrarse con la bajada de la temperatura producida por la expansión, resultando en un proceso isotérmico. Para ello, el combustible tendría que introducirse progresivamente, de forma que el calor de la combustión sólo reemplazara a aquél perdido en el proceso expansivo.

En 1893, Diesel estaba dispuesto a construir un primer prototipo de su motor, para lo cual buscó el apoyo financiero de dos industriales: Friedrich Alfred Krupp y Heinrich von Buz, directores generales de dos empresas que dieron lugar a dos gigantes que aún hoy sobreviven: Krupp AG (actualmente ThyssenKrupp AG) y MAN AG.

Para entonces, Diesel había abandonado las ideas de la compresión isotérmica primero, y de la expansión isotérmica después, convencido de que la única opción era la combustión a presión constante. Así, el ciclo ideal quedaba como se indica en la Figura 38.

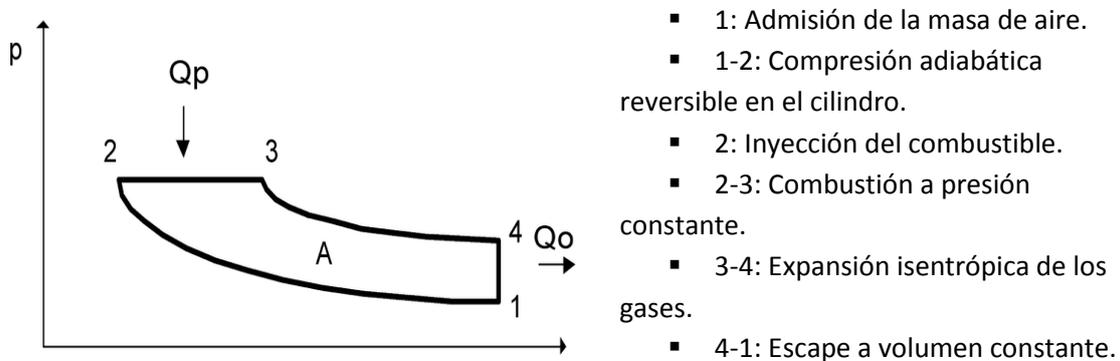


Figura 38 - Ciclo diesel teórico

Siguiendo estas nuevas especificaciones, Diesel construyó su primer motor en 1893. Sin embargo, el prototipo resultó ser un fracaso, pues no era capaz de funcionar con su propia potencia. Una segunda versión del motor estuvo lista a principios de 1984. Aunque en este caso se trataba de un modelo funcional, su funcionamiento dejaba mucho que desear: la combustión se producía más tarde de lo debido, y las detonaciones eran frecuentes.

No obstante, Diesel utilizó este motor como banco de pruebas para distintos combustibles, y aunque en algunos momentos obtuvo una respuesta satisfactoria, el rendimiento siempre resultaba demasiado bajo, lo que llevó al ingeniero a desarrollar un nuevo modelo.

Este segundo prototipo estuvo listo en mayo de 1895, y su funcionamiento resultó ser muy satisfactorio. En julio de ese mismo año, los ensayos dieron como resultado una eficiencia total del 20%, y con gran optimismo, Diesel recomendó la fabricación en serie y comercialización del modelo.

Sin embargo, antes de dar este paso, se tomó la decisión de fabricar un tercer prototipo (Figura 39), que estuvo listo en 1896, y que en un primer momento arrojó resultados aún más esperanzadores: una eficiencia térmica del 32% y una eficiencia mecánica del 76%, que dieron como resultado una eficiencia global del 24%. Las pruebas que dieron lugar a las especificaciones oficiales del motor se desarrollaron en febrero de 1897, y los resultados obtenidos fueron los indicados en la Tabla 2.

Potencia máxima	13.5 kW (18 CV)
Régimen a potencia máxima	154 rpm
Rendimiento térmico	34.7 %
Rendimiento mecánico	75.5 %
Rendimiento neto	26.2 %
Presión máxima	3.44 MPa
Peso	4.5 T
Potencia específica	333 g/W

Tabla 2 - Parámetros técnicos del motor Diesel

Más adelante en ese mismo año, una nueva serie de tests arrojaron un rendimiento neto superior al 30%, lo que contrastaba con los rendimientos máximos de los motores de ciclo Otto de la época, que se encontraban entre el 14 y el 17 %.

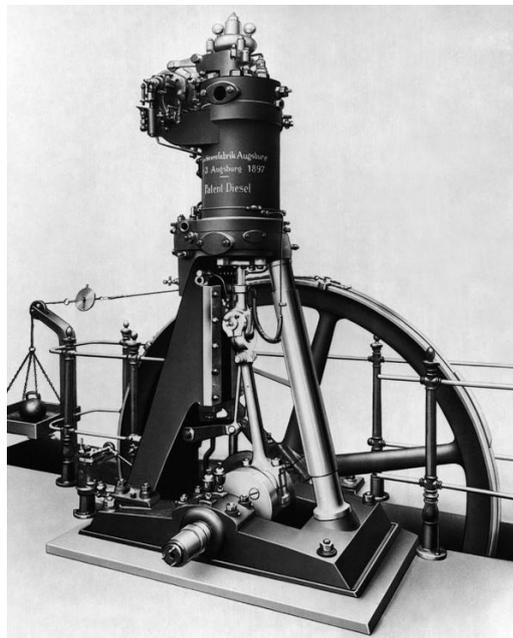


Figura 39 - Tercer prototipo desarrollado por Diésel, expuesto en el Deutches Museum (MAN Bildarchiv)

Aunque aparentemente el motor estaba completo para su comercialización, aún faltaba determinar cuál era el combustible más adecuado para la operación del mismo. Anteriormente se habían realizado pruebas con diversos hidrocarburos, tanto líquidos como gaseosos, aunque el objetivo de Diesel siempre fue que el combustible empleado perteneciera al primer grupo.

Para establecer comparaciones entre los diversos combustibles se utilizó el queroseno como referencia. En diciembre de 1897 se realizaron las pruebas con un hidrocarburo proveniente de EE.UU., el gasóleo, que pronto demostró tener unas capacidades superiores a las del queroseno, imponiéndose como la principal fuente de energía del motor diesel.

A pesar de sus excelentes capacidades, el motor diesel no lo tuvo fácil para introducirse en el tejido industrial, ya que los modelos de producción en serie resultaron ser muy poco fiables. Un hecho que afectó a los fabricantes, que vieron cómo las acciones de sus empresas se desplomaban.

Pero una vez superados los principales retos técnicos, la introducción del motor diesel en los medios de transporte fue un paso natural. Sus inicios tuvieron lugar en los barcos y submarinos, donde la mayor eficiencia se traducía en una menor necesidad de combustible a bordo. Pronto sustituyeron a las máquinas de vapor, y las mejoras que han sufrido a lo largo de las décadas han hecho que en la actualidad sigan siendo la principal fuente de potencia en estos vehículos. [76]

Después de la II Guerra Mundial, los motores diesel se lanzaron a la conquista del ferrocarril, sustituyendo en poco tiempo a casi todas las locomotoras de vapor que se encontraban en funcionamiento en aquél momento.

En el caso de los vehículos de carretera, la espera fue mayor. Sin embargo, aunque Diesel no era un gran aficionado al automovilismo y nunca mostró interés por evolucionar su motor hacia ese campo, estaba convencido de que la tecnología llegaría. No en vano, dos semanas antes de su muerte, Diesel escribió una carta a su cuñado en la que decía que *“aún tengo la firme convicción de que llegará el motor para automoción, y entonces daré la tarea de mi vida por finalizada”*.

El primer motor diesel adaptado para el transporte por carretera fue obra de Heinrich Dechamps. Presentado en 1908, se trataba de un modelo de cuatro cilindros en línea refrigerado por aire, y estaba pensado para el transporte pesado (Figura 40). A pesar de que le valió a su autor el Gran Premio en la Exposición Mundial de Bruselas de 1910, nunca llegó a propulsar ningún vehículo. Sus especificaciones se muestran en la Tabla 3.

Principales parámetros del motor de Dechamps	
Potencia máxima	22 Kw
Régimen a máxima potencia	800 rpm
Cilindrada	5.7 l

Tabla 3 - Principales parámetros del motor Dechamps



Figura 40 - Motor de Heinrich Dechamps

El primer coche llegó años después de la mano del ingeniero Hermann Dörner, que en 1923 fundó su propia empresa para fabricar vehículos pequeños propulsados por motores de 10 CV de potencia, pero el negocio no funcionó.

13 años después, en el Salón del Automóvil de Berlín de 1936, las empresas Mercedes-Benz y Hanomag presentaron sendos coches equipados con motores diésel: el Mercedes-Benz 260D y el Hanomag Rekord 15K. El éxito de ambos modelos fue escaso, y durante años los coches diésel representaron una fracción mínima del parque automovilístico mundial.

De hecho, aún tendrían que pasar 30 años para que la tecnología diésel resultara atractiva a ojos del consumidor. Sucedió en 1976, poco después de la primera crisis del petróleo (1973), cuando los precios del crudo casi se cuadruplicaron. Entonces Volkswagen presentó una versión diesel del Golf con 1.47 litros de cilindrada y 37 kW de potencia a 5.000 rpm que revolucionó el mercado y animó al resto de fabricantes a incorporar este tipo de mecánicas en sus modelos.

5.2.3. Situación actual

A partir de aquí la historia es conocida. El uso de ambos tipos de motores se incrementó con el paso del tiempo, a medida que lo hizo el parque automovilístico mundial. En la actualidad se estima que hay 1.200 millones de vehículos circulando por las carreteras de todo el mundo, y la mayor parte de ellos equipan esta tecnología. En el año 2035 esta cifra podría llegar a los 2.000 millones, lo que multiplicará los problemas desarrollados en el punto 3. [77]

5.3. Tendencias actuales en los MCI

La complejidad de los MCI, el enorme conocimiento que se posee acerca de ellos, su vasta usabilidad y el potencial de mejora que aún encierran, hacen que existan una infinidad de proyectos de investigación que tienen como principales objetivos aumentar su eficiencia y sus prestaciones al mismo tiempo que disminuyen las emisiones de gases contaminantes.

Si a esto le unimos que existen una multitud de posibilidades tecnológicas para dar solución a un mismo problema, el resultado es que en la actualidad hay tantas líneas de investigación y tecnologías emergentes como fabricantes de motores y centros de investigación hay en el mundo.

Sin embargo, también aquí existen tendencias, y algunas tecnologías han recibido una especial atención por parte de los fabricantes, existiendo una gran cantidad de proyectos en marcha con resultados prometedores. Entre ellas destacan el downsizing de los motores, que busca reducir la cilindrada de los mismos y aumentar la eficiencia a través de la sobrealimentación; los motores VCR, con capacidad para modificar la relación de compresión de los cilindros; los HCCI, que unen conceptos de los tradicionales ciclos Otto y Diésel; y los motores de combustión adiabática (pseudoadiabática en realidad), que buscan reducir a la mínima expresión las pérdidas de calor en la cámara de combustión, idealizando lo máximo posible el ciclo real.

5.3.1. Downsizing

Se denomina *downsizing* a la actual tendencia que existe en el desarrollo de motores, que busca maximizar el rendimiento y la economía de combustible gracias a la combinación de pequeñas cilindradas y mecanismos de sobrealimentación del motor sin que exista una pérdida de prestaciones asociada.

El *downsizing* no es por tanto una tecnología en sí misma, sino que podría definirse como la búsqueda del motor más pequeño capaz de desarrollar unas determinadas prestaciones, aunando todas las tecnologías disponibles. Se trata de la tendencia imperante actualmente en todas las marcas, tal y como demuestran las Figuras 41 y 42, en las que se representa la media de la cilindrada y el número de cilindros de distintos fabricantes a lo largo de los años para sus modelos vendidos en Europa.

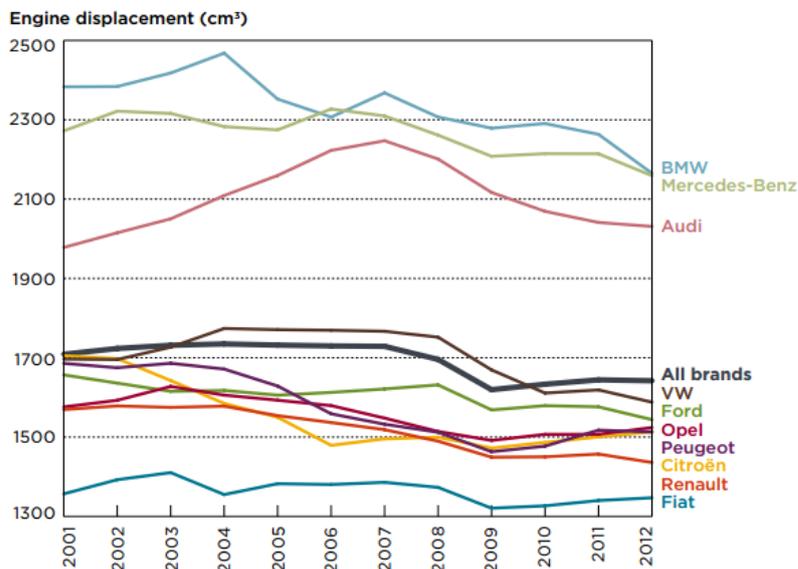


Figura 41 - Cilindrada de los vehículos vendidos en Europa entre 2001 y 2012 por fabricante [48]

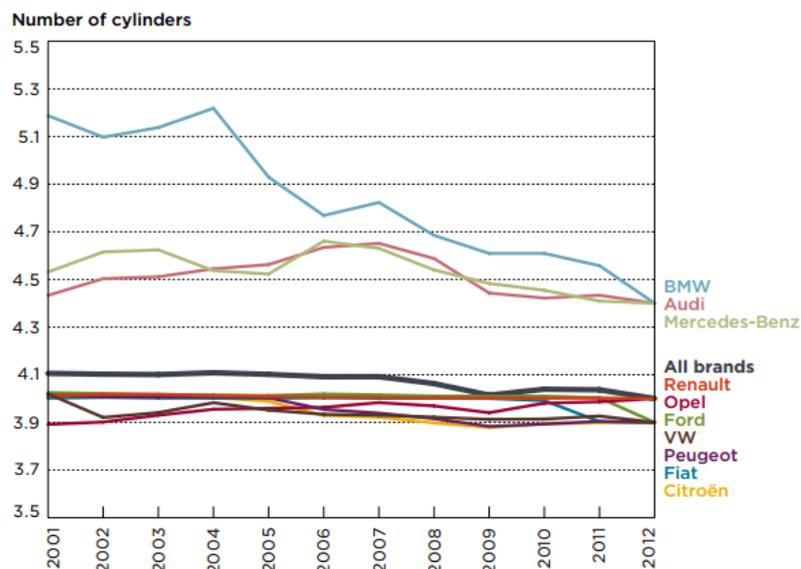


Figura 42 – Nº de cilindros de los vehículos vendidos en Europa entre 2001 y 2012 por fabricante [48]

La ventaja de los motores pequeños frente a motores con mayor cubicaje y número de cilindros es que los primeros tienen consumos inferiores a cargas medias y bajas, puesto que trabajan con menos masa de aire y combustible, y además tienen menores pérdidas por fricciones mecánicas. Esta ventaja, no obstante, se pierde cuando el motor trabaja a plena carga, puesto que el esfuerzo que tendrá que realizar el motor para poder extraer una potencia considerable será mayor que el que tendría que realizar otro motor de mayor capacidad.

Esto no es un problema en entornos urbanos, donde los motores trabajan casi siempre a cargas bajas. Además, un motor más pequeño aporta la ventaja adicional de tener un peso más reducido y un volumen total inferior.

Para alcanzar prestaciones similares a las de un motor más grande, los motores aprovechan las últimas tecnologías en inyección, distribución de válvulas variable, y sobre todo sobrealimentación, a través de compresores o turbocompresores.

Las tecnologías de sobrealimentación se utilizan para mejorar el llenado de los cilindros a través de un aumento de la presión del aire, lo que consigue que la masa de aire o mezcla en el interior de la cámara de combustión sea mayor de la que se conseguiría con un motor de aspiración natural (atmosférico). Esto da lugar a un aumento del par motor producido en cada carrera, y en última instancia, a más potencia, tal y como puede observarse en la Figura 43, en la que se comparan dos motores de origen Volkswagen, uno sobrealimentado (en rojo) y otro de aspiración natural (azul).

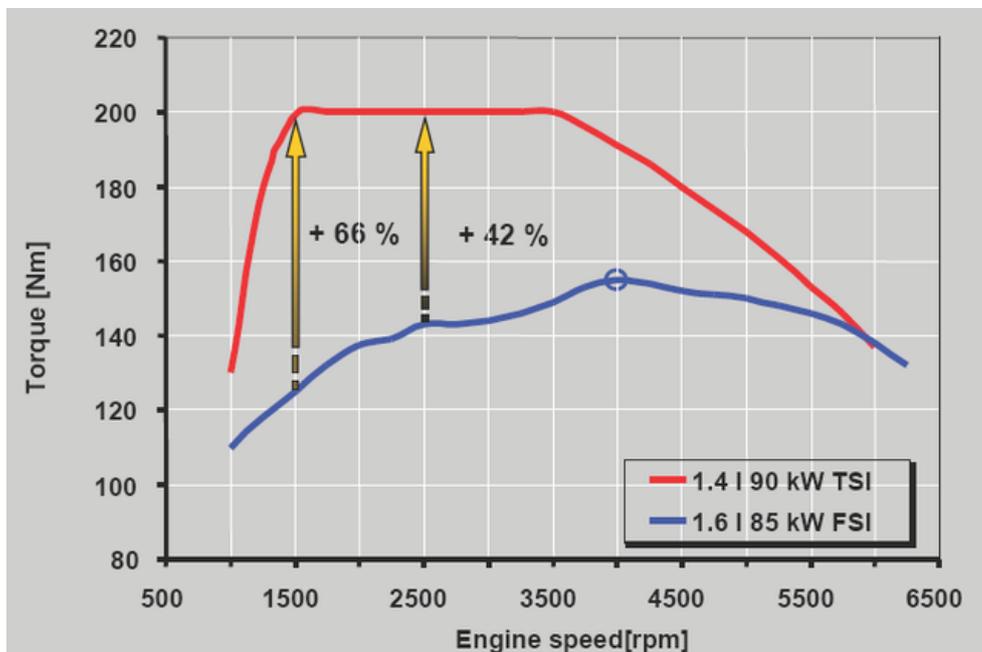


Figura 43 - Comparación entre las curvas de par de los motores VW 1.4 L TFSI (sobrealimentado) y VW 1.6 L FSI (atmosférico) [79]

El principal exponente del downsizing es el motor Ford 1.0 EcoBoost (Figura 44), que con tan sólo tres cilindros y 1 litro de capacidad consigue entregar hasta 140 caballos [80] en su versión más avanzada. Aunque esta variante aún no se comercializa, sí lo hacen las de 100 y 120 CV, con una gran acogida. De hecho, desde su lanzamiento en 2011, Ford ha recogido

durante tres años consecutivos el premio al Mejor Motor del Año [81], y ha tenido que doblar la producción de este motor desde las 500 unidades diarias previstas hasta las 1.000 que fabrica en la actualidad [82].

Montado sobre la plataforma de su modelo Fiesta (segmento B), el Ford 1.0 EcoBoost de 100 CV consigue marcar un consumo de 4.5 l/100 km en el ciclo de homologación mixto, con unas emisiones de CO₂ de tan sólo 105 g/km [83].

Para ello emplea un turbocompresor, inyección directa del combustible y un sistema de refrigeración con termostatos independientes para la culata y el radiador, que permite un calentamiento más rápido del líquido refrigerante para reducir las ineficiencias en el arranque.



Figura 44 - Ford 1.0 L EcoBoost (Ford)

En relación con lo estudiado en el epígrafe 4 de este TFG, los motores que aplican los principios del *downsizing* aportan también la ventaja de que sus dimensiones totales son mucho más reducidas, lo que disminuye las necesidades de espacio en el vano motor al mismo tiempo que se aligera la masa total del vehículo, disminuyendo las fuerzas inerciales a las que tiene que hacer frente, así como la resistencia a rodadura.

5.3.2. Motores con relación de compresión variable (VCR)

La relación de compresión en un MCI es uno de los parámetros más importantes que definen el motor. La relación de compresión se define como la relación entre los volúmenes máximo y mínimo del cilindro, esto es, cuando el pistón se encuentra en el punto muerto inferior (PMI) y el punto muerto superior (PMS) respectivamente. Este valor representa por tanto la proporción en volumen que se comprime la mezcla de aire y combustible en los motores de ciclo Otto, o el aire en los motores diésel, dentro del cilindro. [84]

En general, la relación de compresión está limitada por el tipo de motor y las características del combustible. Así, en el caso de los motores de ciclo Otto, donde el encendido se fuerza con una chispa, las relaciones de compresión no suelen superar el 12:1, ya que relaciones mayores podrían provocar la detonación de la mezcla. Por su parte, en los motores Diésel, las relaciones de compresión normales son mucho mayores, llegando a los 22:1, lo que garantiza que se alcancen las condiciones que permiten la autoignición del combustible en la cámara de combustión.

Además, la relación de compresión está directamente relacionada con el rendimiento del ciclo termodinámico: cuanto mayor sea la diferencia entre las presiones máxima y mínima, mayor será dicho rendimiento. Por eso es importante que la relación de compresión del motor sea aquella que proporcione la mayor presión máxima admisible en cada momento. Esta relación entre la relación de compresión y el rendimiento puede verse en las Ecuaciones 3 y 4, que muestran el rendimiento térmico de los ciclos Otto y Diésel ideales respectivamente.

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad \eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)}$$

Ecuación 3

Ecuación 4

Donde: r = relación de compresión.

r_c = relación de corte (relación de volúmenes antes y después de la inyección).

γ = coeficiente de dilatación adiabática (1.4 para gases ideales).

El inconveniente para alcanzar este objetivo se encuentra en que, en los motores tradicionales, la relación de compresión es un parámetro fijo. Esto significa que, en motores de ciclo Otto, la relación de compresión es un factor limitante de la potencia máxima: puesto que esta se consigue aumentando la masa de mezcla aire-combustible que entra en el cilindro, una relación de compresión mayor supondrá que la máxima cantidad de mezcla que puede admitir el cilindro sin que se produzca la detonación es inferior a la que podría admitir para una relación de compresión menor.

Este es el problema que pretenden solucionar los motores con relación de compresión variable, una tecnología experimental que a través de diversos métodos consigue modificar las dimensiones geométricas de la cámara de combustión para adaptar la relación de compresión a los requerimientos del motor en cada instante.

Además, esta capacidad para modificar las dimensiones de la cámara de combustión lleva asociada otra ventaja: la posibilidad de utilizar casi cualquier combustible, al adaptarse el motor a las características de cada uno.

Se trata de una tecnología prometedora en la que casi todos los fabricantes de automóviles llevan años trabajando, con éxito variable.

En el año 2000, Saab presentó su motor SVC con tecnología VCR (Figura 45), que utilizaba una culata pivotante para conseguir las variaciones de volumen en el cilindro. Con tan sólo 4 grados de rotación, la relación de compresión pasaba de 8:1 a 14:1, una relación imposible

para un funcionamiento continuo del motor, pero óptima en momentos en los que la potencia requerida es baja.

El SVC es un motor sobrealimentado, con una presión máxima de soplado de 2.8 bar. Tiene 5 cilindros, cubica 1.598 cm³, y es capaz de rendir una potencia máxima 225 CV a 6.000 rpm y un par máximo de 305 Nm a 4.000 rpm. Todo esto con unas emisiones un 30% inferiores a las de un motor similar cuando trabaja a bajas potencias. [82]

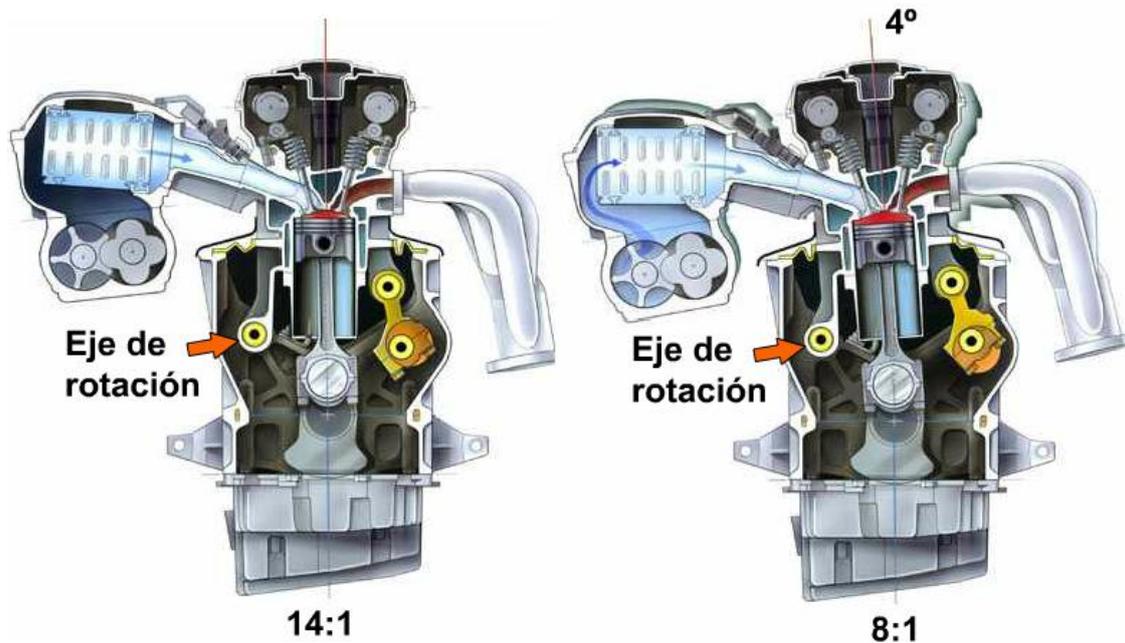


Figura 45 - Motor Saab SVC. Comparación de posiciones (Saab)

En el caso del motor de dos tiempos *Omnivore* presentado por Lotus en el año 2009, al que se ha hecho referencia con anterioridad, la variación en el volumen de la cámara de combustión también se conseguía mediante el desplazamiento de la culata, aunque en este caso en dirección vertical respecto a la dirección principal del cilindro.

Debido a la menor complejidad mecánica del motor de dos tiempos, en este caso pueden aumentarse los desplazamientos mucho más que en el anterior, consiguiendo relaciones de compresión mínimas de 10:1 y máximas de 40:1.

En la Figura 46 se muestra una ilustración del motor *Omnivore* con sus posiciones máxima y mínima superpuestas. En la página web que se adjunta en la referencia se encuentra un modelo interactivo en el que se puede comprobar el funcionamiento de mismo.

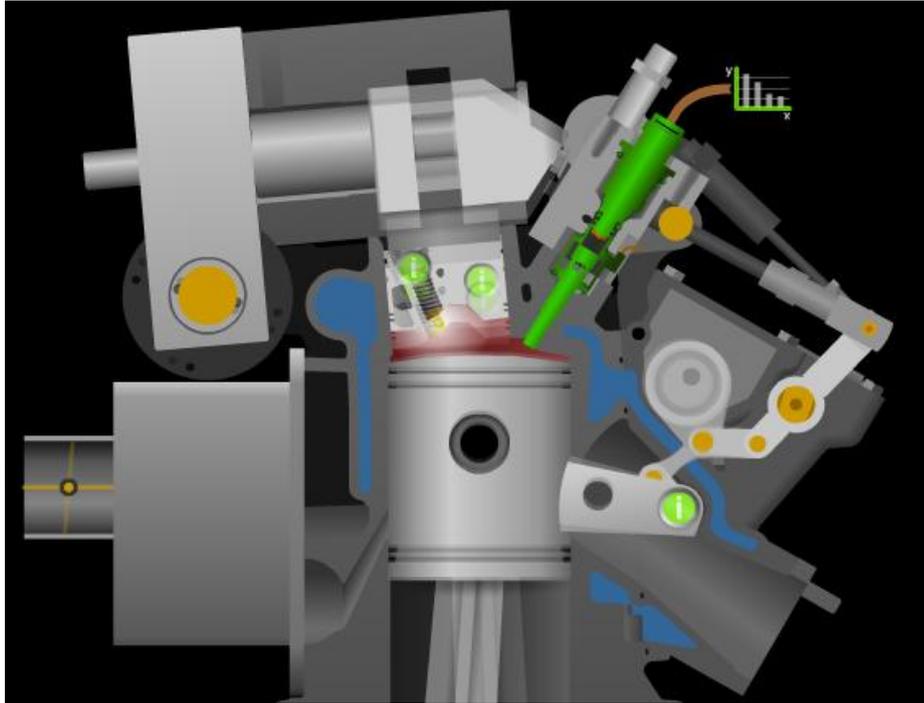


Figura 46 - Motor Omnivore de Lotus [86]

No obstante el desplazamiento de la culata no es el único medio disponible para aplicar esta tecnología.

La firma especializada en ingeniería de automoción FEV presentó en el año 2012 una biela dinámica que gracias a un sistema hidráulico permite modificar la altura de la cabeza del pistón (Figura 47). El objetivo de esta tecnología es conseguir un motor con VCR que mantenga las características constructivas de un motor tradicional.

FEV realizó las pruebas de su prototipo en un motor de gasolina con una relación de compresión original de 9.6:1, obteniendo una relación mínima de 8:1 y una máxima de 14:1.

No obstante, las mayores reducciones en las emisiones de CO₂ (-5.9% para un ciclo de homologación NEDC) se consiguieron para una configuración en la que las relaciones máxima y mínima eran de 8:1 y 13:1 respectivamente. Asimismo, FEV calcula que estas emisiones podrían llegar a reducirse hasta un 7.1% en motores más pequeños, fruto del downsizing extremo, en los que las relaciones de compresión variarían entre 8:1 y 12:1.

La principal desventaja de este sistema es la enorme complicación que adquiere la biela, un elemento mecánico muy básico en su origen, barato y fácil de fabricar.

En cualquier caso, al igual que los motores previamente descritos, no se trata más que de un prototipo, cuyas capacidades aún han de demostrarse si quiere llegar al mercado en algún momento.

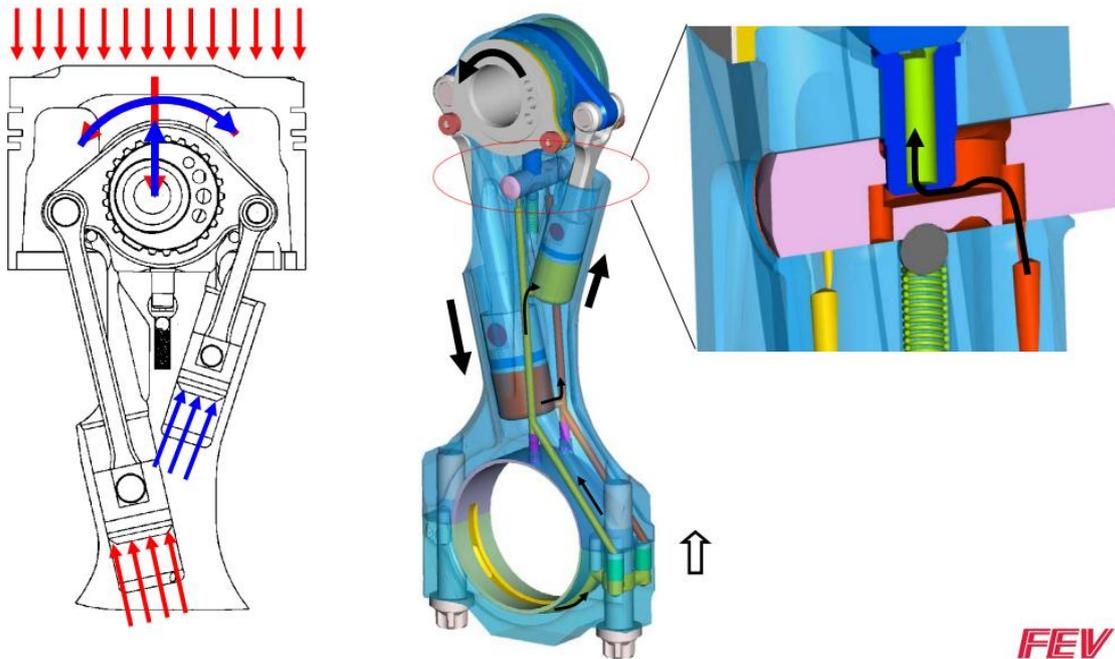


Figura 47 - Biela de dimensiones variables para motor VRC [87]

5.3.3. Motores de carga homogénea encendida por compresión (HCCI)

Los motores de carga homogénea encendida por compresión, popularmente conocidos como HCCI por sus siglas en inglés (homogeneous charge compression ignition) son motores que combinan características de los ciclos Otto y Diésel tradicionales.

En los motores HCCI la mezcla del combustible con el aire se realiza fuera de la cámara de combustión, del mismo modo que sucede en los motores de gasolina. Sin embargo, siguiendo el modo de funcionamiento de los diésel, la ignición no se fuerza con una chispa, sino que se induce al alcanzarse las condiciones de autoignición en el cilindro.

No obstante, la mezcla con la que operan los motores HCCI no es estequiométrica como sucede en los motores de gasolina, sino muy pobre. Y del mismo modo que sucede en los motores diésel, carecen de válvula de mariposa, por lo que el gasto de aire en el motor siempre es máximo, utilizando el dosado como medida de variación de la carga.

Una vez dentro del cilindro, la mezcla se comprime hasta el punto de autoignición, con relaciones de compresión que varían entre los 20:1 y los 30:1. Gracias a la homogeneidad de la mezcla, esta inflamación se produce al mismo tiempo en todo el volumen del cilindro, por lo que, al contrario de lo que ocurre en los motores de inyección directa, no hay propagación de la llama ni estratificación de la combustión.

En la Figura 48 puede observarse una ilustración comparativa entre la combustión en motores de gasolina (de inyección indirecta), diésel y HCCI.

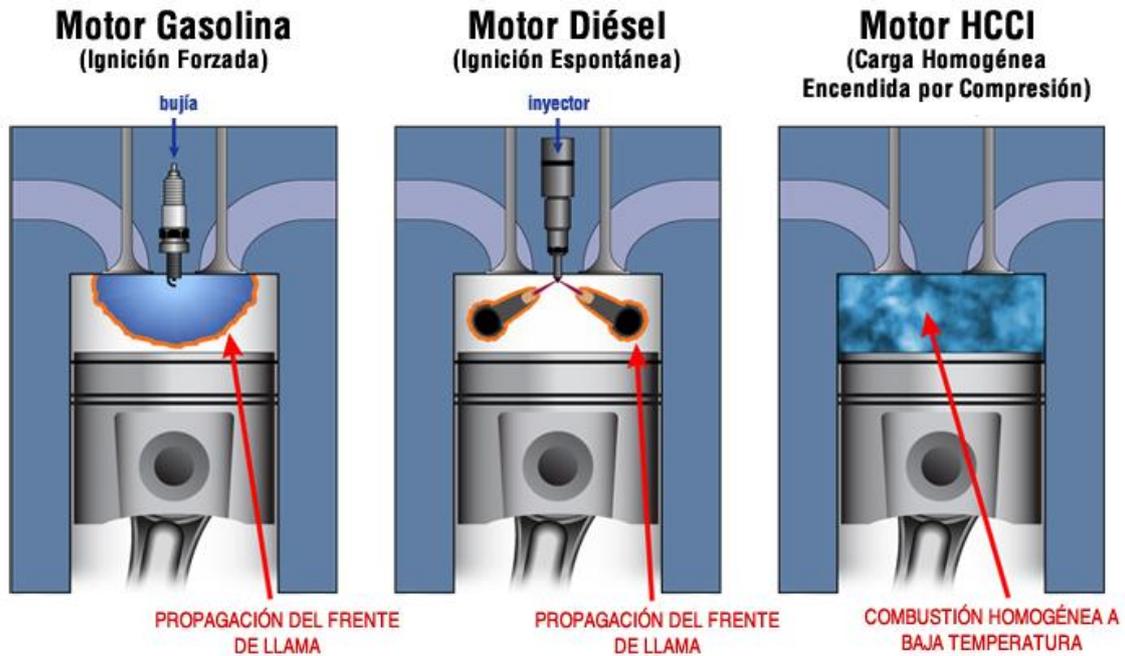


Figura 48 - Comparación entre la combustión en MIF, MIE y HCCI - Adaptado de [88]

Entre las ventajas de esta tecnología destacan las siguientes [89]:

- Alto rendimiento térmico: El rendimiento térmico del motor es mayor que el de un motor de gasolina de prestaciones similares, y similar al conseguido por los motores diésel.
- Reducción de NOx: El uso de mezclas pobres consigue reducir la temperatura máxima alcanzada en el cilindro, que se sitúa en un punto inferior al crítico para la producción de óxidos de nitrógeno.
- Reducción de partículas: La homogenización de la mezcla antes de entrar al cilindro, junto con la ignición descentralizada, hacen que la combustión sea también homogénea, resultando un proceso mucho más limpio en el que no se generan partículas ni hidrocarburos inquemados.
- Posibilidad de utilizar distintos combustibles.

No obstante, los motores HCCI tampoco carecen de inconvenientes. En primer lugar, su potencia específica (relación entre la potencia del motor y su cilindrada) es más baja que la de un motor diésel comparable, aunque este punto no resulta demasiado relevante para su uso en entornos urbanos.

El principal problema tiene que ver con el control del punto de autoignición de la mezcla. Este control, fundamental para una correcta operación del motor, se consigue en los motores de gasolina mediante el encendido por chispa, y con la inyección del combustible en los motores diésel. Sin embargo, en este tipo de motores, el control directo no es posible, lo que puede dar lugar a un mal funcionamiento.

Dado que el parámetro que mayor influencia tiene en el encendido es la relación de compresión, los desarrollos en motores HCCI a menudo se combinan con la tecnología VCR desarrollada en el punto anterior. La capacidad para modificar la relación de compresión en

función de las condiciones del motor podría resultar un buen mecanismo de control del punto de ignición en este tipo de motores. Por eso ambas investigaciones suelen ir de la mano, y tanto el motor Saab SVC como el *Omnivore* de Lotus empleaban la tecnología HCCI. También se ha propuesto la inyección directa de gasolina como posible solución a este problema.

Otros demostradores de la tecnología HCCI los encontramos en los motores DiesOtto de Mercedes-Benz, GCI de Volkswagen (las siglas CGI hacen referencia a Gasoline Compression Ignition. No confundir con el Mercedes-Benz 350 CGI, donde las mismas siglas significan stratified-Charge Gasoline Injection) y el Hyundai 1.8-L GDCI (de Gasoline Direct-Injection Compression Ignition).

El Mercedes-Benz DiesOtto se presentó en el Salón del Automóvil de Ginebra de 2007, montado sobre un prototipo híbrido denominado F-700 (un anticipo de la siguiente generación del Clase S). Se trata de un bloque de 4 cilindros y 1.8 litros que rinde 238 CV de potencia y 400 Nm de par máximo (no se especifica a qué régimen) gracias a un sistema de doble turbo y distribución variable. [90]

El GCI de VW también se presentó en 2007, y en aquél momento su estado de madurez era mayor que el de cualquier modelo presentado con anterioridad. Este motor está construido sobre la base de un 1.6l FSI de 4 cilindros y 115 CV modificado, e incorpora un sistema de distribución variable procedente de Audi. En este caso, el motor sólo funciona en modo HCCI en un rango determinado de carga: hasta 2.000 rpm y 2.0 bar de PME. A partir de este punto, funciona como un motor de gasolina tradicional, por lo que incorpora bujías. [91]

Volkswagen planeaba tener esta tecnología lista para su salida al mercado en cinco años. Sin embargo, desde su presentación no ha vuelto a haber informaciones oficiales acerca de nuevos avances en el sistema. Aunque se especulaba que la versión VII del Golf, presentada en 2013, dispondría de este tipo de motores, finalmente no fue así. Aun así, es digno de destacar que el modelo que servía como banco de pruebas para el motor estaba homologado para circular por carretera.

En el caso del Hyundai GDCI, el prototipo se ha desarrollado en colaboración con la empresa Delphi y la Universidad de Wisconsin-Madison. Es importante destacar que los ingenieros de Hyundai no consideran el GDCI como un modelo de HCCI, y de hecho las diferencias son significativas. No obstante, encaja en parte de la concepción, y dado que sus semejanzas son superiores a las diferencias, se ha decidido incluirlo en este apartado por razones organizativas. [92]

En el modelo GDCI, la combustión obedece a la fórmula “generalmente estratificada pero localmente estequiométrica”. Para conseguir este tipo de combustión, el motor utiliza tanto inyección directa como indirecta. Hyundai aún no ha hecho públicas las especificaciones del motor, más allá de la relación de compresión (14.8:1) y algunos datos de emisiones (NOx inferiores a 0.2 g/kW), aunque espera obtener como resultado de la investigación un modelo de 1.8 litros que supere en rendimiento a un motor diésel de 2 litros de prestaciones similares.

5.3.4. Motores adiabáticos y pseudo-adiabáticos

Los motores adiabáticos son el santo grial de los motores de combustión interna. Se trata de motores que no necesitan refrigeración, al no existir intercambio de calor con el exterior, y que por tanto se adecúan perfectamente al ciclo Otto ideal [93]. En teoría, un motor con estas características podría alcanzar un rendimiento térmico cercano al 70%, el máximo posible en el ciclo Otto (Figura 49). Pero sólo en teoría, porque el motor adiabático es un modelo ideal que, por cuestiones obvias, no se puede llevar a la práctica.

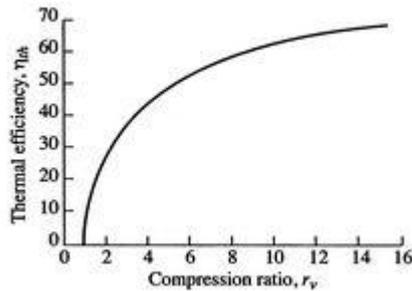


Figura 49 - Curva de rendimiento del ciclo Otto en función de la relación de compresión

Sin embargo, algunos fabricantes no se resignan, e incluso se atreven a plantear el motor adiabático como un objetivo de futuro. Tal es el caso de Mazda con su plan *SkyActiv*. Desafortunadamente, su única especificación al respecto de cómo conseguir esto es el aislamiento térmico del motor, lo que hace pensar que aún no han encontrado la fórmula para ello.

En el lado opuesto se encuentra Revolutionary Technologies United (RTU), una firma de ingeniería que afirma haber conseguido ya la combustión pseudoadiabática en su motor eFone, con el que lograría rendimientos cercanos al máximo teórico anteriormente mencionado.

El motor que presenta RTU tiene como base un modelo Audi de 5 cilindros en línea y 2.5 litros de cilindrada, que ha modificado para entregar 814 CV y 1.000 Nm de par máximo, con un consumo mixto de tan sólo 5.3 litros/100 km. Se trata de unos datos muy significativos en comparación con los que ofrece ese mismo motor en sus configuraciones comerciales en el VW Jetta y el Audi TT, tal y como se puede observar en la siguiente tabla comparativa (Tabla 4) y en la Figura 50.

Tabla 4 - Comparativa de motores RTU

VW Jetta	Audi TT RS	RTU eFone
168 CV	336 CV	814 CV
230 Nm	450 Nm	1.000 Nm
8.9 L/100 km	9 L/100 km	5.3 L/100 km
Sistema de refrigeración líquida	Sistema de refrigeración líquida	Circuito de agua sin radiador
Tª de escape > 1.000 °C	Tª de escape > 1.000 °C	Tª del gas de escape 351 °C
Estándar de emisiones Euro IV	Estándar de emisiones Euro V	Sin necesidad de convertidor catalítico

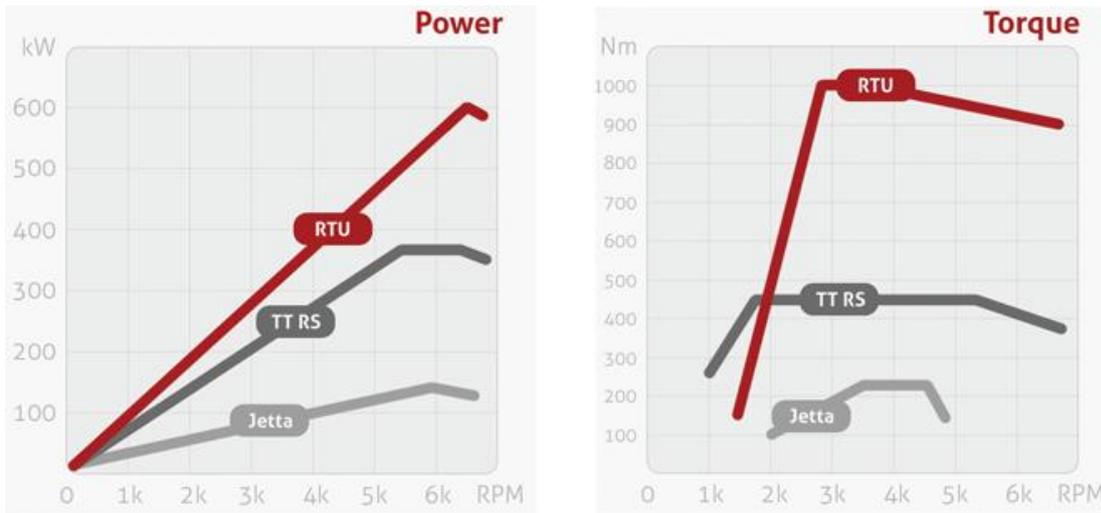


Figura 50 - Curvas de potencia y par del motor eFone (RTU)

Desde RTU justifican estas cifras con una serie de mejoras introducidas: la modificación de los pistones, los aros de los mismos y otras piezas que no especifican; el colector de admisión completo; la ECU; y el enfriamiento del aire a la entrada del motor hasta los -20°C . Sin embargo, no hablan de que se hayan realizado labores de aislamiento del motor, por lo que el parámetro más importante en este caso sería la citada refrigeración del aire.

Desafortunadamente, tampoco indican cómo consiguen una reducción de temperatura lo suficientemente grande como para reducir la temperatura máxima de la combustión hasta el punto en que no resulte necesario el uso de un radiador, y la temperatura de los gases de escape se reduzca a la mitad.

Los datos son tan sumamente esperanzadores que la intuición lleva a pensar que se trata más de un ejercicio de creatividad que de un motor funcional. No obstante, desde RTU afirman haber obtenido los datos presentados en la tabla anterior en un banco de pruebas. Aún así, sigue pareciendo improbable que un motor de estas características pueda llevarse al terreno comercial.

5.3.5. Conclusiones

Tal y como se ha estudiado en los puntos anteriores, existen tecnologías innovadoras que permitirán un desarrollo más profundo de los motores de combustión interna, con importantes reducciones del consumo y las emisiones. No obstante, algunas de estas innovaciones, como los motores VRC y HCCI, aún podrían tardar años en alcanzar el mercado. Otras, como la combustión adiabática, se encuentran aún más lejos. En el caso del *downsizing*, que ya se está aplicando, las ventajas son evidentes, y buena prueba de ello es la grata acogida que los motores reducidos están teniendo tanto entre los consumidores como entre los fabricantes.

No obstante, en entornos urbanos, aunque estas tecnologías permitirían reducir algunos de los problemas mencionados en el punto 3 (sobre todo los relativos a contaminación

atmosférica), se trata tan sólo de una solución parcial, que en todo caso se vería eclipsada con un aumento en el número de vehículos en circulación.

Por eso, aunque el motor de combustión interna seguirá presente en la mayor parte de los automóviles que se fabriquen en las próximas décadas, resulta necesario profundizar aún más en la investigación de nuevos mecanismos de propulsión que contribuyan a la reducción de su uso, tanto en términos absolutos como relativos.

La tendencia actual se encuentra sobre todo en los coches eléctricos e híbridos. Ambas tecnologías se estudiarán en el siguiente capítulo.

6. Sistemas de propulsión alternativos: vehículos eléctricos, híbridos, con pila de combustible y de gas comprimido.

Se denominan vehículos eléctricos a aquellos que emplean uno o varios motores eléctricos como elemento de propulsión, con independencia de la fuente de electricidad que utilicen. Así, esta fuente puede ser un paquete de baterías, un motor de combustión interna que actúa como generador (en cuyo caso se denominan vehículos híbridos), una pila de hidrógeno e incluso paneles fotovoltaicos acoplados a la carrocería del coche.

A pesar del auge que han experimentado en los últimos años, por su concepción, los vehículos eléctricos no son una tecnología tan innovadora como pueda parecer. Los propulsores eléctricos se han utilizado durante décadas en vehículos tan variopintos como carretillas industriales, sillas de ruedas o carritos de golf. Tampoco su uso en automoción es algo especialmente novedoso: los primeros coches eléctricos se desarrollaron a principios del siglo XIX, aunque no fue hasta finales de los años 80 de ese mismo siglo cuando surgieron los primeros prototipos funcionales.

Sin embargo, desde finales de los años 90 del siglo pasado, esta tecnología ha salido a la palestra como adalid de la movilidad sostenible y solución a casi todos los problemas ocasionados por el motor de combustión interna, principalmente en entornos urbanos.

Silenciosas y limpias (al menos in situ), las tecnologías de propulsión eléctrica parecen encerrar la clave que permitirá al sector de la automoción mantenerse como principal proveedor de servicios de movilidad también en las ciudades. Sin embargo, el desarrollo y la implantación de estas tecnologías no carecen de problemas. El principal tiene que ver con su gestión de la energía: las baterías, caras, pesadas y con una baja autonomía, aún no permiten una operación eficiente de estos vehículos, y la falta de infraestructuras de recarga ha lastrado históricamente su ritmo de adopción.

El objetivo de este capítulo es analizar las diferentes alternativas que se están desarrollando para fomentar la movilidad eléctrica, sobre todo desde el punto de vista de su gestión de la energía. Forma también parte del objetivo de este capítulo abordar el tema desde un punto de vista crítico, que permita identificar no sólo las bondades, tan ensalzadas en los últimos tiempos, sino también los problemas y restricciones que puedan dificultar su implantación a gran escala o puedan derivarse de ella.

También se hace referencia en el último punto de este capítulo la tecnología emergente que supone el vehículo con motor de aire comprimido, un concepto en el que han estado trabajando varias marcas durante los últimos años, con buenas características para convertirse en una alternativa real a los vehículos eléctricos en algunas situaciones.

6.1. Clasificación de los vehículos eléctricos

El concepto de vehículo eléctrico² (EV, de *Electrical Vehicle*) es muy amplio, ya que el único requisito para integrar a un coche en esta categoría es que utilice uno o varios motores eléctricos como elemento de propulsión.

Los vehículos eléctricos pueden clasificarse de distintas formas. Por ejemplo, en función del motor, pueden ser de corriente continua (DC) o corriente alterna (AC). Sin embargo, para el propósito de este capítulo, se seguirá la clasificación más extendida, de acuerdo a la forma en la que la energía se almacena en su interior.

Según este criterio existen tres tipos básicos de vehículos eléctricos (Figura 51):

- **Vehículo eléctrico a baterías** (también conocido como BEV por sus siglas en inglés, *Battery Electric Vehicle*). En este tipo de vehículos la energía se almacena en un pack de baterías que deben ser recargadas utilizando una fuente de corriente externa. Se trata de vehículos “cero emisiones”, ya que al no disponer de motor térmico, no emiten ningún tipo de gas de escape.
- **Vehículo eléctrico híbrido** (HEV por sus siglas en inglés, *Hybrid Electric Vehicle*). Al contrario de lo que ocurre con los BEV, los HEV incorporan un motor térmico que, dependiendo de su configuración, puede actuar sólo como generador de electricidad para los motores eléctricos (HEV en serie), o como propulsor alternativo para el vehículo (HEV en paralelo). En ambos casos, toda la energía o parte de ella se almacena en forma de energía química del combustible.
- **Vehículo con pila de hidrógeno** (FCEV, de *Fuel Cell Electric Vehicle*). Este tipo de vehículos tienen una pila de combustible que transforma el hidrógeno almacenado en un depósito en corriente eléctrica. Algunos autores consideran los FCEV como un tipo de vehículos híbridos, ya que almacenan la energía en un depósito de combustible y generan la electricidad en el interior del propio automóvil. Sin embargo, las diferencias son tan grandes que puede considerarse una tecnología independiente.



Figura 51 - Clasificación de Vehículos Eléctricos

Antes de continuar con una descripción más detallada de cada uno de estos tipos de vehículos, resulta necesario explicar, al menos de forma breve, cuáles son las características

² Como se ha indicado en la introducción del capítulo, el concepto de vehículo eléctrico no sólo hace referencia a los coches eléctricos. Sin embargo, de forma habitual estos conceptos se utilizan como sinónimos, y así se hará a lo largo de este capítulo.

principales de los tres elementos que comparten todos ellos: el motor eléctrico, la frenada regenerativa y las baterías.

6.2. El motor eléctrico

6.2.1. Generalidades

El motor eléctrico es el elemento principal en un vehículo eléctrico, el componente clave que da origen a todas sus ventajas cuando se compara con un automóvil convencional. En primer lugar, porque funciona con electricidad, lo que significa que no emite ningún tipo de gas de escape a la atmósfera de forma directa, hecho que elimina de un plumazo una gran parte de los problemas del MCI. Además, al no tratarse de un motor térmico, su rendimiento no está limitado por el ciclo de Carnot. De hecho, los motores eléctricos alcanzan eficiencias superiores al 90% sin ningún tipo de problema, estando los valores normales entre el 85 % y el 97 % [96]. Pero estas no son las únicas razones.

Comparado con un MCI de similares prestaciones, un motor eléctrico es más pequeño y ligero, más barato de fabricar y mucho más simple. Apenas requiere mantenimiento, casi no emite calor, y tampoco produce vibraciones perceptibles para los ocupantes del automóvil. Su entrega de la potencia es suave, sin oscilaciones ni discontinuidades, lo que le permite carecer de volante de inercia. Y su funcionamiento es óptimo desde el primer momento.

Además, sus curvas de potencia y par se adecúan a las necesidades de un automóvil mucho mejor de lo que lo hacen las de un motor térmico. Esto algo que puede comprobarse analizando la Figura 52, en la que se representan ambas gráficas para dos motores Nissan de 109 CV, uno eléctrico (Nissan Leaf, en rojo), y otro de 4 cilindros gasolina de 1.6 litros (en violeta), que podrían considerarse equivalentes.

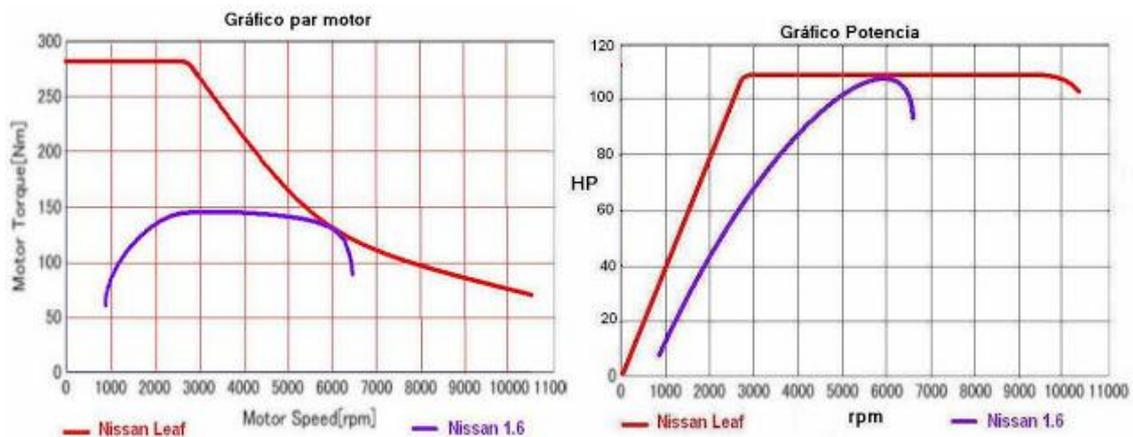


Figura 52 - Comparación entre las curvas de potencia y par de motores Nissan [Nissan]

El primer punto digno de destacar tiene que ver con el ralentí. Este concepto hace referencia al mínimo régimen de giro que un motor de combustión necesita para mantenerse en funcionamiento. Por debajo de este punto crítico, la explosión en el interior de un cilindro no consigue generar la suficiente rotación para alcanzar el siguiente punto de ignición, lo que

hace que el motor se pare. Durante el arranque, esto se soluciona con un motor (eléctrico), que es el encargado de aportar la energía inicial para vencer las resistencias internas del MCI. Una vez arrancado, el motor térmico debe mantenerse en funcionamiento por encima de este punto en todo momento, aunque no se esté circulando.

Para paliar este problema, algunos vehículos modernos incorporan un sistema denominado *start&stop*, que no es más que un sistema que apaga el motor de forma automática cuando el vehículo pasa un determinado tiempo en punto muerto, para volver a arrancarlo cuando se pisa el embrague (con el consiguiente perjuicio para la vida útil del motor de arranque) [97].

En el caso de los motores eléctricos, el ralentí simplemente no existe. Tal y como puede observarse, el nacimiento de las curvas se encuentra a 0 rpm, lo que significa que para poner en marcha un motor eléctrico sólo se necesita el paso de corriente a su través. Tras esto, el movimiento comienza casi instantáneamente. Esto no sólo supone un ahorro de energía, sino también un ahorro de peso: los motores eléctricos no precisan embrague, ya que no es necesario desacoplarlos de las ruedas en ningún momento.

Volviendo al motor térmico, en la gráfica se observa cómo el pico de potencia no se alcanza hasta las 6.000 rpm, y el corte de la inyección llega a las 6.500. Esto significa que, en una conducción normal a un régimen de entre 2.000 y 2.500 vueltas, apenas se extraen entre 40 y 60 CV de potencia (entre un 37 % y un 55 % de la potencia máxima).

En el motor eléctrico todo el par está disponible desde el primer instante, manteniéndose constante en su máximo hasta pasadas las 2.500 vueltas. La potencia, por su parte, aumenta gradualmente hasta alcanzar su valor máximo en el punto en el que el par comienza a caer, y se mantiene constante hasta pasadas las 10.000 rpm. Las prestaciones del motor eléctrico son por tanto superiores en cualquier régimen de operación, algo que se nota perfectamente durante la conducción, y al ser sus curvas características bastante próximas a la curva ideal requerida en tracción, no precisan de caja de cambios – otra importante fuente de reducción de masa y pérdidas mecánicas.

6.2.2. Tipos de motores eléctricos: *de inducción e imanes permanentes*

Todos los motores eléctricos son virtualmente similares. Todos funcionan según el mismo principio físico, el electromagnetismo, y todos comparten dos elementos básicos: un estator y un rotor, que como sus propios nombres indican, son las partes fija y móvil respectivamente, aunque no en todos los casos tienen las mismas características.

Como se ha indicado anteriormente, existen dos tipos básicos de motores eléctricos en función del tipo de corriente que utilizan para funcionar: de corriente continua (DC, *Direct Current*), y de corriente alterna (AC, *Alternating Current*). Dentro de estas dos categorías existen diversas variantes, de las cuales sólo dos están extendidas en su uso para vehículos eléctricos: el motor de imanes permanentes (IP) y el motor de inducción. En ambos casos se

trata de motores AC trifásicos, aunque el motor de imanes permanentes incorpora un inverter que le permite funcionar con corriente continua. No obstante, dado que las baterías sólo almacenan corriente continua, en el caso del motor de inducción el inverter también es obligatorio. Además ambos tienen estatores similares, con tres bobinas desfasadas 120°. Así pues, las principales diferencias entre ambos tipos de motores se encuentran en el rotor y en el control del inverter (que al ser digital no supone un problema demasiado grande).

En el motor DC sin escobillas el rotor incluye dos o más imanes permanentes que generan un campo magnético de corriente continua que interactúa con la corriente eléctrica que fluye a través del bobinado del estator, lo que genera un par de rotación en el rotor. A medida que este elemento gira, es necesario modificar la magnitud y la polaridad de la corriente del estator continuamente para que dicho par permanezca constante y la conversión de energía eléctrica a energía mecánica sea óptima. De esto se encarga el inverter.

En el caso del motor de inducción, el rotor no tiene imanes permanentes, sino un núcleo de acero laminado envuelto en un conjunto de conductores que forman una estructura en cortocircuito. Al aplicar corriente alterna trifásica sobre el estator se produce un campo magnético giratorio de la misma frecuencia que la frecuencia de la corriente. Al mismo tiempo, este campo magnético induce una corriente en el rotor, que a su vez induce un campo magnético que sigue al generado en el estator, lo que provoca un par motor que hace girar al rotor. Este fenómeno se conoce como principio de inducción mutua de Faraday. [98]

En la Figura 53 puede observarse la representación esquemática de ambos motores.

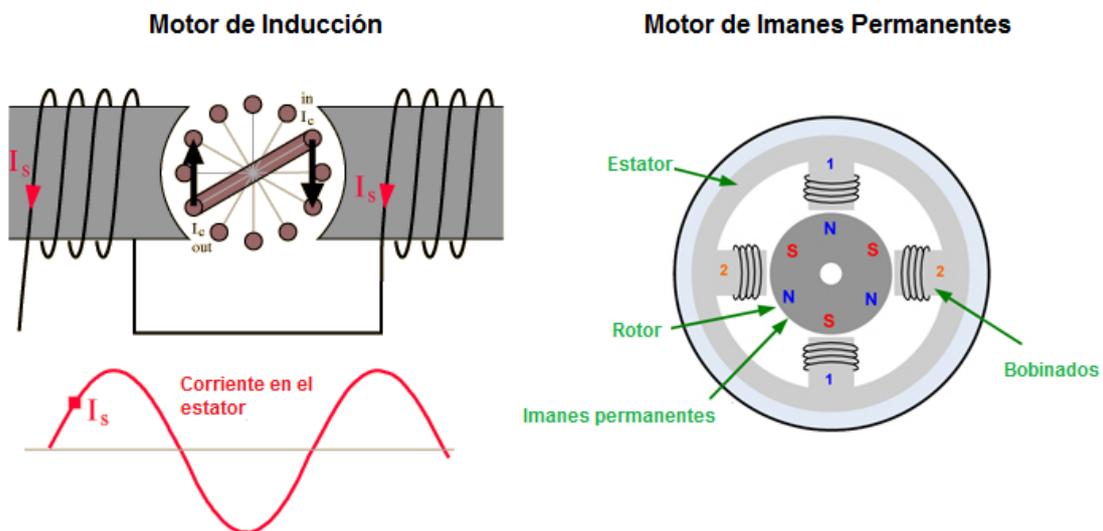


Figura 53 - Representación de un motor de inducción y un motor de imanes permanentes [99, 100]

6.2.3. Diferencias de operación

Una de las principales diferencias entre el motor de inducción y el motor de imanes permanentes tiene que ver con la producción de calor, que es menor en el motor de imanes permanentes, ya que el motor de inducción sufre pérdidas por efecto Joule tanto en el rotor como en el estator. Además, el motor DC sin escobillas puede funcionar con un factor de

potencia³ unidad, mientras que en los motores de inducción este parámetro es de aproximadamente el 85%. Unidos estos dos factores se tiene que la eficiencia máxima del motor de imanes permanentes es ligeramente superior a la del motor de inducción.

Esta ventaja, no obstante, se pierde en algunos momentos, ya que el uso de imanes permanentes no permite regular el campo magnético en el rotor. En un funcionamiento ideal este campo magnético debería ser máximo para grandes requerimientos de par, de forma que la corriente que alimenta al estator pueda mantenerse en el mínimo valor posible, reduciendo así las pérdidas por efecto Joule. Sin embargo, a bajos requisitos de par, el campo magnético debería reducirse para limitar las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault. Es decir, que para garantizar una eficiencia máxima en todos los puntos de operación, el campo magnético debería ajustarse de forma que la suma de las pérdidas por histéresis, corrientes de Foucault y efecto Joule fueran mínimas. Sin embargo, esto no es posible.

Por el contrario, en motores de inducción este campo magnético sí es regulable, y el uso de un inverter avanzado permite ajustar las pérdidas al mínimo en cada momento, optimizando el rendimiento del motor.

Esta ventaja se acrecienta con las prestaciones, ya que en motores de imanes permanentes las pérdidas originadas por este efecto aumentan proporcionalmente con el tamaño del motor, algo que no sucede en un motor de inducción. Así, aunque la eficiencia máxima seguiría siendo mayor en el motor DC sin escobillas, la eficiencia media durante todo el tiempo de operación sería superior en el motor de inducción.

Con esta información, podría decirse que los motores de inducción son mejores para vehículos deportivos de altas prestaciones, como el Tesla Model S, mientras que los motores DC sin escobillas serían mejores para vehículos urbanos. Sin embargo, esto no está tan claro, ya que las diferencias no terminan aquí.

Por una parte, el uso de imanes permanentes es caro, ya que requieren de un uso intensivo de tierras raras, como el neodimio. Además, se trata de elementos caros de fabricar, ya que su interacción con cualquier herramienta ferromagnética dificulta enormemente la operación. Pero por otra parte, los motores de inducción son más difíciles de controlar (aunque su controlabilidad es mayor), y aunque el coste recurrente de fabricación es inferior, el desarrollo es más caro.

Así, parece que no existe un “ganador”, ni siquiera una alternativa óptima para cada categoría. Buena prueba de ello son el Renault Twizy y el Porsche 918. El primero, un vehículo urbano totalmente eléctrico de pequeñas dimensiones cuya versión más prestacional apenas alcanza los 80 km/h utiliza un motor de inducción. Por su parte, el Porsche 918, un superdeportivo híbrido que se apoya en la tracción eléctrica hasta los 265 km/h, utiliza sendos motores de imanes permanentes. [100]

³ El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. En cargas puramente resistivas, el f.d.p. es 1, mientras que en elementos resistivos y capacitivos ideales este parámetro es 0.

6.2.4. Alternativas de futuro: el motor de reluctancia conmutada

Los motores de reluctancia conmutada (SRM por sus siglas en inglés, *Switched Reluctance Motor*) son motores que pueden funcionar tanto con corriente continua como con corriente alterna, y que no precisan de escobillas ni de imanes permanentes. En estos motores el rotor está formado por una pieza de hierro dulce dentada, mientras que el estator incorpora una serie de pares de bobinas colocados en posiciones diametralmente opuestas.

Para funcionar, la corriente que circula a través de las bobinas se conmuta en un patrón secuencial, de forma que se genera un campo magnético que gira. El rotor dentado, al estar fabricado en un material ferromagnético, intenta seguir el campo, girando en consecuencia. Para realizar la conmutación de las corrientes se utiliza un control electrónico de potencia, que sirve a la vez como control del par y la velocidad. En la Figura 54 se observa un esquema básico de la configuración de un motor de reluctancia conmutada.

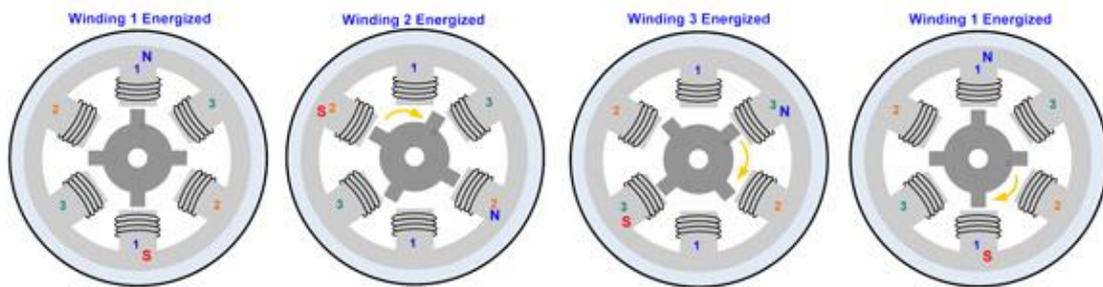


Figura 54 - Ilustración de un motor de reluctancia conmutada [101]

La principal ventaja con la que cuentan estos motores frente a los anteriores es que el rotor presenta una estructura simple y robusta, algo deseable para aplicaciones en las que se alcanzan altas velocidades y temperaturas. Además, la región en la que la curva de potencia permanece constante puede extenderse de 3 a 7 veces. Sin embargo, están limitados por su alta producción de ruido y vibraciones, un alto rizado del par, y un alto coste de construcción. No obstante, este último factor podría dejar de ser una limitación con su producción en masa.

En la Tabla 5 se muestra una comparativa entre los tres tipos de motores analizados, donde se puntúan distintas características del 1 al 3 (donde 3 es lo mejor). Es importante destacar que, a pesar de que el motor de reluctancia conmutada es el que obtiene una puntuación más baja, este motor también es el que tiene una menor madurez y mayor potencial de mejora.

Característica	Motor Ind.	Motor IP	SRM
Controlabilidad	3	2	1
Peso y tamaño	2	2.5	2
Robustez	3	2	2.5
Fiabilidad	3	2	2.5
Densidad de potencia	2	3	1.5
Eficiencia	2	3	2.5
Rango de velocidades	2	3	3
Tiempo de vida	3	2	2.5

Densidad de par	1.5	3	2
Madurez	2.5	2	1
Coste	3	1	2
Capacidad para soportar sobrecargas	2	2.5	2
Rizado del par	2.5	2	1
Facilidad de fabricación	3	1	2
Potencial de mejora	1	2.5	3
Total	29	26	19

Tabla 5 - Comparación de motores eléctricos de inducción, imanes permanentes y reluctancia conmutada [103]

6.2.5. Motor en el cubo de la rueda

La incorporación del motor en las ruedas es una posibilidad más de los vehículos eléctricos que aporta una serie de ventajas respecto a la disposición tradicional en el centro del eje.

A nivel mecánico, el motor en la rueda permite sustituir todos los mecanismos de la transmisión y sus respectivas masas y pérdidas (caja de cambios, eje, diferencial...) por un control electrónico que además integra todo el software de control de tracción. Así, la tracción puede ser independiente para cada una de las ruedas, en función de las necesidades del terreno y de la conducción. Y lo mismo sucede con la dirección, lo que permite el giro “en redondo” y el avance lateral. También aumenta la efectividad de la frenada regenerativa (un sistema que se explica en el siguiente punto), al ser todas las ruedas motrices e incorporar cada una su propio generador.

Otra ventaja estriba en un mayor aprovechamiento del espacio, al liberarse un hueco en el interior del vehículo que puede sustituirse por otros sistemas o incorporarse al habitáculo. Este punto gana importancia en vehículos totalmente eléctricos, que como se verá más adelante, podrían replantearse totalmente su forma.

No obstante, no se trata de una tecnología libre de inconvenientes. En primer lugar, porque se trata de un sistema caro, al multiplicarse el número de motores que incorpora el vehículo. Además, el motor en las ruedas aumenta enormemente la masa no suspendida del vehículo, es decir, aquella que se encuentra “por debajo” de la suspensión, que está en contacto directo con el terreno. Y aquí es donde probablemente se encuentre el mayor problema, ya que al aumentar la masa no suspendida, también aumenta su inercia, empeorando el seguimiento que el neumático debe realizar de la calzada, lo que aumenta los problemas de control sobre el vehículo y afecta al confort en el interior. Además, al recibir directamente todos los impactos y vibraciones, el motor sufre mucho más.

A pesar de todo, existen varios prototipos de motores en la rueda. El primero surgió en el año 2008, cuando Michelin lanzó su prototipo Active Wheel (Figura 55) [104], que se compone de una llanta en cuyo interior se albergan dos motores eléctricos, uno para el control de la suspensión activa y otro de tracción, de 30 kW, así como la propia suspensión y el freno de

disco. El conjunto tiene un peso de 42 kg, y se ha probado en un Opel Agila modificado, con resultados satisfactorios, aunque no lo suficiente como para comenzar su comercialización.

MICHELIN Active Wheel

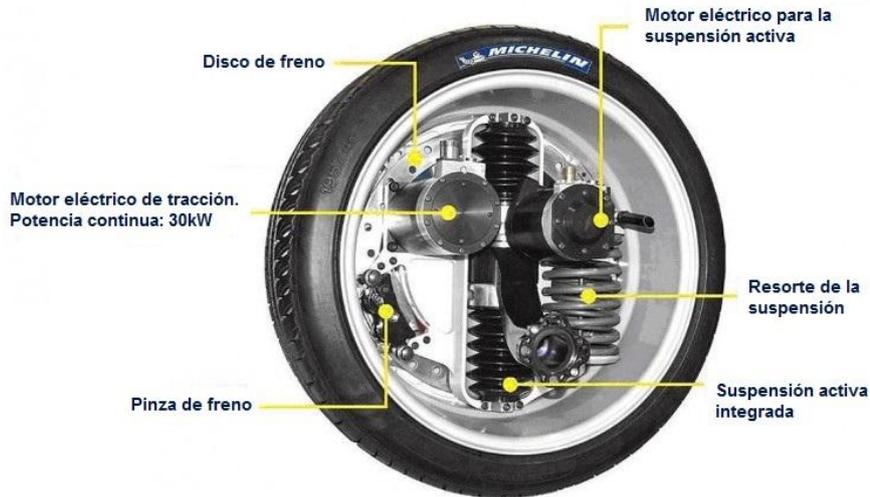


Figura 55 - Michelin Active Wheel [Michelin]

Ford también ha presentado una tecnología similar en forma de prototipo, desarrollada en colaboración con Shaeffler (un fabricante de componentes para la industria automotriz), que ha incorporado en un Ford Fiesta denominado *eWheelDrive*. En este caso, el vehículo porta sendos motores de imanes permanentes en el tren trasero, acoplados en el interior de la llanta, de 16 pulgadas. Cada uno tiene 40 kW de potencia y 700 Nm de par máximos, y el peso unitario es de 45 kg. Una ilustración de este sistema se muestra en la Figura 56. [105, 106]

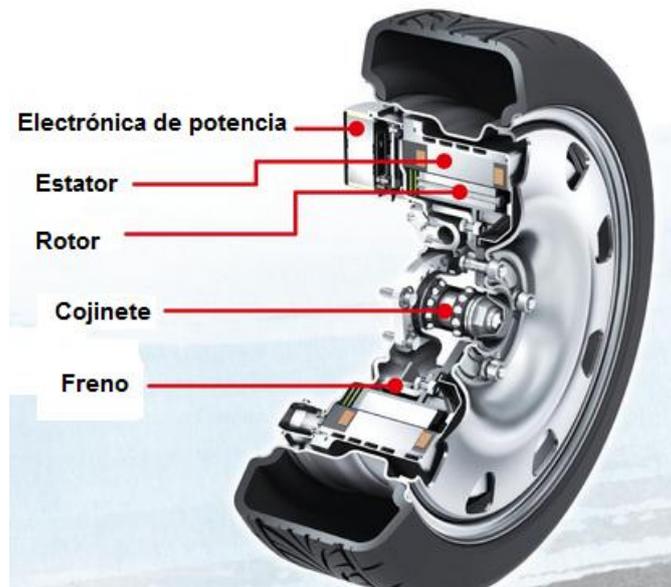


Figura 56 – Ford eWheelDrive [Shaeffler]

6.3. La frenada regenerativa

La frenada regenerativa es un sistema que incorporan todos los vehículos eléctricos e híbridos cuya finalidad es recuperar la energía cinética que generalmente se pierde en forma de calor en los frenos durante las deceleraciones. Así, mientras en un freno convencional las deceleraciones se consiguen aplicando una fuerza de rozamiento en un sistema que gira solidario a las ruedas (frenos de disco o tambor), en el freno regenerativo esta energía se aprovecha para hacer girar un generador eléctrico, que no es más que un motor eléctrico funcionando en sentido inverso.

Esto significa que en los vehículos eléctricos el motor hace las veces la función de motor y de freno (la velocidad se reduce por el efecto de las fuerzas magnéticas que tienen que vencerse en el generador), y no solo eso, sino que además, durante esta segunda operación, las baterías se recargan.

Es importante destacar que en la frenada regenerativa no se recupera toda la energía que se transformaría en calor en otra situación, sino aproximadamente un 30%. Además, estos sistemas deben ir siempre acompañados de un freno tradicional. Existen varios motivos para esto. Por ejemplo, cuando la velocidad es muy baja, las fuerzas magnéticas inducidas no son lo suficientemente potentes como para detener el vehículo; en el caso de que la batería esté completamente cargada, el freno regenerativo tampoco actuaría. Otras razones por las que la recuperación de la energía no es mayor se encuentran en las características de la recarga de las baterías, algo que se estudiará más adelante. No obstante, una recuperación del 30 % de la energía es más de lo que puede ofrecer cualquier motor de combustión interna – un 0 %.

En la Figura 57 se muestra una gráfica del funcionamiento de un sistema de frenada regenerativa para un vehículo tipo que frena de 100 a 0 km/h con una aceleración de $-0.35g$. Tal y como puede observarse, las curvas de frenada por fricción y frenada regenerativa son complementarias, de forma que la primera actúa para aportar la fuerza a la que el generador no es capaz de ofrecer resistencia. [107]

Los sistemas de frenada regenerativa también pueden incorporarse en vehículos tradicionales, aunque su aplicación aquí es mucho menos interesante, ya que no sólo aumenta la complejidad del automóvil, sino que además el impacto de la energía recuperada sobre la operación total del vehículo es inferior.

Interacción de parámetros en un freno regenerativo

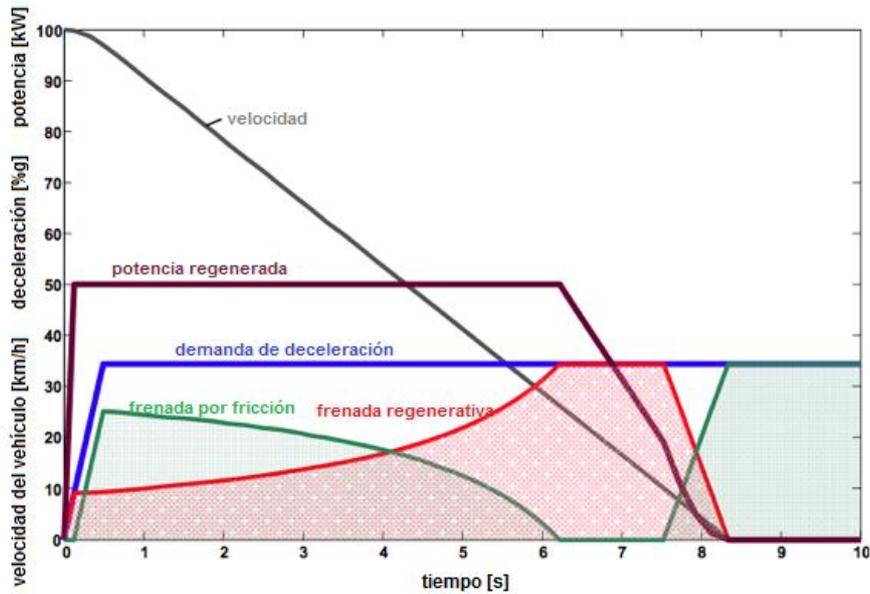


Figura 57 - Interacción de parámetros en un freno regenerativo [107]

6.4. Baterías

6.4.1. Fundamentos de las baterías

Una batería es un dispositivo electroquímico que sirve para almacenar energía eléctrica. Este almacenamiento se realiza a través de reacciones químicas de reducción y oxidación, o de intercambio de electrones. El origen de la energía eléctrica que suministran las baterías es por tanto la oxidación controlada de un compuesto químico que, en el caso de las baterías recargables (denominadas *secundarias*), previamente ha sufrido una reducción, también controlada.

En la Figura 58 se muestra la configuración y el funcionamiento de una celda galvánica de cobre-zinc, también conocida como pila de Daniell. En esencia, la batería de un automóvil no es más que una *batería* de celdas de características parecidas a esta, conectadas en serie y paralelo hasta obtener las características deseadas de voltaje y capacidad.

La conexión de dos pilas iguales en paralelo permite obtener una batería de capacidad el doble que la de las pilas individuales, con el mismo voltaje nominal. Si la conexión se realiza en serie, el resultado es una batería de tensión dos veces la tensión individual de cada una de las pilas, pero de su misma capacidad nominal. [108]

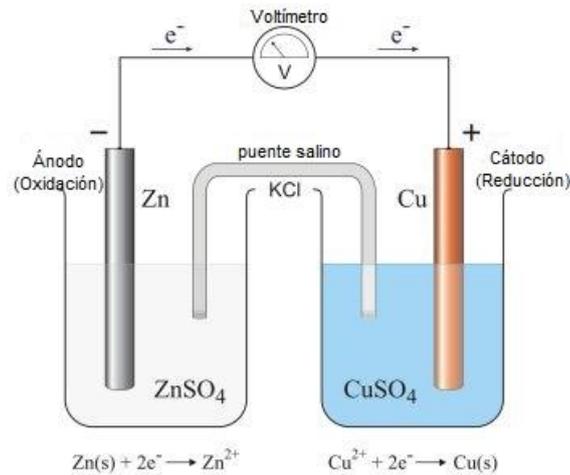


Figura 58 - Configuración de una pila Daniell [109]

No debe confundirse la batería de los BEV con las baterías incorporadas en todos los vehículos con MCI. En el primer caso, se trata de grandes baterías, denominadas *baterías de tracción*, que almacenan una gran cantidad de energía para permitir el movimiento del vehículo. En el segundo caso, se trata de pequeños equipos denominados *baterías de arranque* que tienen como único propósito poner en marcha el MCI y servir como fuente de alimentación a algunos accesorios del coche.

Las baterías de tracción que incorporan los BEV deben tener tres características fundamentales: una alta potencia, un alto voltaje, y la capacidad de someterse a numerosos ciclos de carga y descarga sin perder sus propiedades, además de una alta capacidad que les permita circular durante un gran número de kilómetros antes de la siguiente recarga. Para caracterizar las baterías que se estudiarán a continuación, se emplearán los siguientes conceptos [110]:

- **Voltaje (E).** El voltaje de una celda electroquímica es la diferencia de potencial que existe entre sus bornes, y sólo está marcado por los elementos químicos que forman la celda. Es un parámetro característico de cada combinación de ánodo-cátodo. Es importante que cada una de las celdas individuales tengan una alta diferencia de potencial, ya que cuanto mayor sea este, menor será el número de celdas que hay que conectar en serie para conseguir el voltaje requerido.
- **Capacidad (C).** Hace referencia a la cantidad de energía que la batería puede entregar antes de que su diferencia de potencial disminuya por debajo de un valor umbral. Generalmente la energía se mide en kWh, aunque en baterías suele expresarse en Ah (amperios-hora). Esta última medida representa la cantidad de energía que atraviesa los bornes de una batería cuando funciona durante 1 hora proporcionando una corriente de 1 A. Así, una batería de 100 Ah teóricamente podría entregar una corriente de 1 A durante 100 h, o una corriente de 10 A durante 10 h.
- **Energía específica (W_E).** Se trata de un parámetro muy importante, ya que representa la cantidad de energía que la batería es capaz de almacenar por unidad de masa. Además, la energía específica aglutina los dos parámetros anteriores, al calcularse como $W_E = E \cdot C / \text{masa de la batería}$.

- **Ciclos de vida.** Se refiere al número de ciclos de carga-descarga que una batería puede soportar antes de que su capacidad disminuya hasta el 80% de su valor nominal. Se dice que una batería es de *ciclo profundo* cuando es capaz de soportar una gran cantidad de estos ciclos de carga y descarga completos.

A continuación se exponen los tipos de batería más utilizados en automoción.

6.4.2. Baterías de Plomo-Ácido (PbAc)

Las baterías de plomo-ácido se han utilizado tradicionalmente en la industria automotriz como baterías de arranque. Están formadas por dos electrodos de plomo sumergidos en un electrolito de agua destilada y ácido sulfúrico, lo que les confiere un voltaje por celda de aproximadamente 2 V.

Se trata de una tecnología muy madura, con una amplia trayectoria, y una solución de bajo coste. Además, cuentan con la ventaja de no presentar efecto memoria. Sin embargo, su uso como baterías de tracción se encuentra limitado por su baja energía específica (30 - 50 Wh/kg), reducida potencia específica (150 W/kg) y bajo ciclo de vida frente a cargas y descargas profundas (hasta 800 ciclos). Además, estas baterías funcionan mal a bajas temperaturas, y un exceso de calor puede evaporar el electrolito. Más allá de esto, se trata de una tecnología muy tóxica, con un gran impacto medioambiental. Su rendimiento no obstante es bueno, y puede alcanzar el 90%. [111]

Tampoco se trata de una opción viable de cara al futuro, ya que su potencial de mejora es muy bajo, y no se prestan a recargas rápidas.

6.4.3. Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)

Las baterías de NiMH están formadas por un electrodo positivo de hidróxido de níquel y un electrodo negativo de una aleación de vanadio, titanio, níquel y otros metales, ambos sumergidos en una solución alcalina que actúa como electrolito.

Se trata de una tecnología superior a la de Pb-Ac en todos los aspectos, a excepción del coste de fabricación y la tensión por celda (1.2 V). Su energía específica es aproximadamente el doble (60 – 120 Wh/kg), su potencia específica es muy superior (250 – 1000 W/KG), y lo mismo sucede con su ciclo de vida (500 – 1.000 ciclos). En condiciones óptimas su rendimiento faradaico⁴ es cercano al 100%. Además, las baterías de NiMH son limpias y fáciles de reciclar.

Otra ventaja de este tipo de baterías se encuentra en su capacidad para soportar cargas rápidas (y descargas aún más rápidas) sin apenas efecto en la tensión de las celdas. No obstante, el uso continuado de descargas rápidas totales puede afectar al ciclo de vida.

⁴ Se denomina rendimiento faradaico a la relación entre la carga extraída de la batería durante la descarga y la carga total que es necesario aportar para restablecer su estado inicial.

La principal desventaja de estas baterías tiene que ver con su mala operación a altas temperaturas, ya que a más de 45 °C pueden perder hasta el 45 % de su capacidad, y se dificulta enormemente la recarga, pudiendo caer el rendimiento faradaico hasta valores inferiores al 30 % [112]. Con estas características, el rendimiento medio se supone del 66 %. Las cargas rápidas también están limitadas a un rango de entre 10 y 40 °C. Además, la falta de uso produce la degradación de las celdas, y existe un pequeño efecto memoria.

A pesar de los problemas, estas baterías han sido utilizadas en una gran cantidad de vehículos híbridos, como el Toyota Prius, ya que se trata de una tecnología madura, y la mejor solución disponible hasta la llegada de las baterías de ión-litio.

En la Figura 59 se muestra la estructura de una celda de NiMH de origen Panasonic

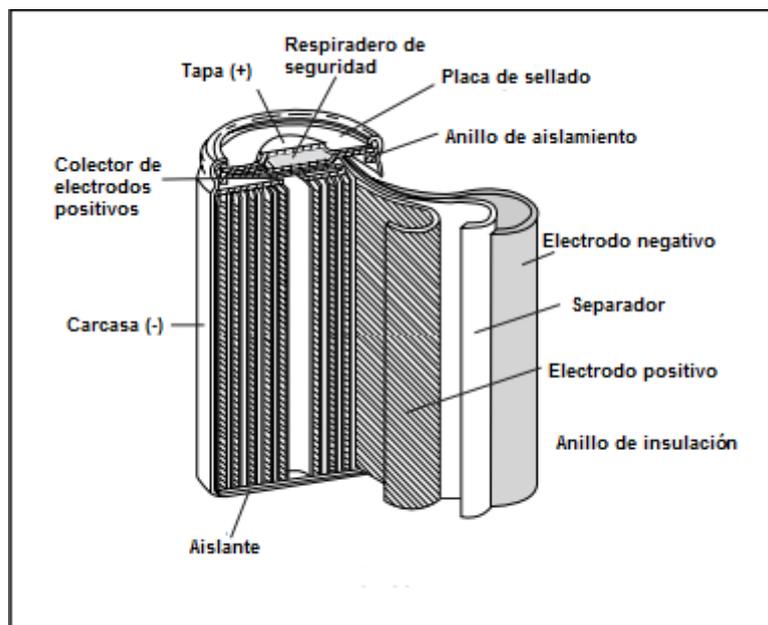


Figura 59 - Batería de NiMH [113]

6.4.4. Baterías ZEBRA

Las baterías de Sodio-Níquel-Cloro, generalmente denominadas baterías Zebra (de *Zeolite Battery Research Africa Project*, nombre del grupo de trabajo de la Universidad de Pretoria que las desarrolló) son un tipo de baterías de sal fundida que utilizan como electrolito NaNiCl fundido.

Las baterías Zebra tienen buenas prestaciones. Su diferencia de potencial es de 2.58 V por celda, tienen una energía específica de unos 125 Wh/kg [114] y una potencia específica de 150 W/kg. El mayor problema de estas baterías se encuentra en que el electrolito se congela a 157°C, por lo que generalmente operan a temperaturas superiores a los 300 °C, lo que requiere un aislamiento extra. Además esta temperatura debe mantenerse cuando el automóvil no está funcionando, ya que si el electrolito se enfría, la batería deja de funcionar, lo que genera aún más pérdidas de calor. No obstante, puede alcanzar un rendimiento cercano al 90% (el rendimiento faradaico es cercano al 100%, encontrándose las pérdidas en la

generación de calor necesaria). Otra de sus ventajas estriba en que soportan cargas relativamente rápidas, y su ciclo de vida puede ser superior a 1.000. [115]

6.4.5. Baterías de Ión-Litio (Li-Ion)

Las baterías de ión-litio son un tipo de baterías relativamente reciente, comercializadas por primera vez en 1991. Sin embargo, por sus buenas características, han copado rápidamente todas las posiciones del mercado, sobre todo en dispositivos electrónicos. Su bajo peso y tamaño, la ausencia de efecto memoria y su capacidad de utilizar sistemas de recarga rápida son sus principales ventajas.

En estas baterías el cátodo puede estar fabricado en diversos óxidos de metales y litio (LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4), mientras que el ánodo es de grafito. Ambos electrodos están sumergidos en un electrolito formado por una solución de sal de litio y un disolvente orgánico.

Se trata de unas baterías con una tensión en bornes relativamente alta, 3.6 V, cuya energía específica supera en la actualidad los 230 Wh/kg [116], y potencias específicas también altas (250 – 350 W/kg). Además, su ciclo de vida es muy superior, partiendo 1.000 ciclos, pudiendo llegar en el futuro a los 10.000, o incluso más, y alcanzan rendimientos superiores al 90%. [117]

La principal ventaja de este tipo de baterías frente a las anteriores tiene que ver con su estado de madurez: aún tienen un gran potencial de mejora, lo que las hace la principal alternativa de cara al futuro. Tampoco son contaminantes, y pueden reciclarse con facilidad.

Todos los vehículos puramente eléctricos que se fabrican en la actualidad poseen este tipo de baterías, y su implantación es cada vez mayor en híbridos. De hecho, incluso se están empezando a utilizar en sustitución de las baterías de Pb-Ac en algunos vehículos con MCI más prestacionales.

No obstante, las baterías de ión-litio no carecen de problemas. El principal tiene que ver con que el litio es un elemento muy inestable en estado puro, y su precipitación en la pila puede dar lugar a explosiones. Todos los packs de baterías de ión-litio deben incorporar circuitos electrónicos de control que garanticen la seguridad del dispositivo, lo que encarece su precio. Además, aunque funcionan con un amplio espectro de temperaturas, este tipo de baterías se ven muy afectadas por el calor, y su fabricación es cara, encontrándose en la actualidad en torno a los 500 €/kWh, aunque se prevé que este precio se reduzca hasta los 150 €/kWh en 2020. [118]

6.4.6. Baterías de polímero de litio (Li-Poly)

Las baterías de polímero de litio son una evolución de las baterías de ión-litio en las que el electrolito se mantiene en el interior de un polímero en vez de en estado líquido. La principal ventaja de este electrolito polimérico es que no es inflamable, con lo que la operación de las

baterías se vuelve más segura. Además este tipo de baterías pueden fabricarse como finas láminas de “plástico”, con un empaquetamiento de peso reducido, que además les permite adaptarse a las formas y el espacio disponible de manera óptima.

Estas baterías tienen una tensión en bornes de entre 2.7 y 4.2 voltios, su energía específica va de los 100–158 Wh/kg [119], y tienen una potencia específica de 245 – 430 W/kg. El rango de temperaturas en el que funcionan correctamente es superior al de las baterías de iones de litio, y su ciclo de vida es similar al de este tipo de baterías, así como su capacidad de recarga rápida. En la actualidad estas baterías están equipadas por el Hyundai Sonata.

6.4.7. Resumen de características

A continuación se ofrece un cuadro-resumen (Tabla 6) con las principales características mencionadas para los tipos de baterías explicados. En la Figura 60 puede observarse un gráfico de Ragone con distintos tipos de batería en función de su potencia y densidad específicas, entre ellas todas las mencionadas anteriormente. Nótese que se trata de una gráfica orientativa, cuyo único objetivo es situar a los distintos tipos de baterías en su posición relativa en el espectro. También se incluyen en la gráfica los supercondensadores, de los que se hablará posteriormente en este mismo capítulo.

	DDP [V]	Carga rápida	Energía Esp. [Wh/kg]	Potencia Esp. [W/kg]	Efic.	Ciclos de Vida
Pb-Ac	2	No	30 - 50	150	90%	800
NiMH	1,2	Sí	60 - 120	250 - 1000	66%	500 - 1000
ZEBRA	2,58	Sí	125	150	90%	>1000
Li-Ion	3,6	Sí	230	250-350	>90%	1.000 - 10.000
Li-Poly	2,7-4,2	Sí	100 - 158	245 - 430	>90%	1.000 - 10.000

Tabla 6 – Parámetros típicos de algunos tipos de baterías

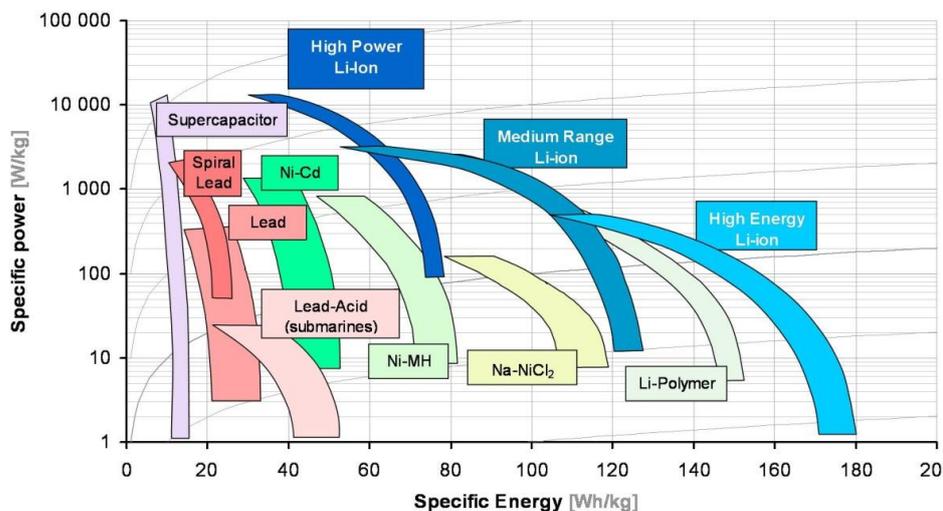


Figura 60 - Diagrama de Ragone para distintos tipos de tecnologías de almacenamiento eléctrico [117]

6.5. Vehículos eléctricos a baterías (BEV)

Los vehículos eléctricos a baterías (BEV) son un tipo de vehículo eléctrico que utiliza la energía química almacenada en un pack de baterías para alimentar el motor o los motores. A diferencia de lo que ocurre con los vehículos híbridos, en los BEV la recarga de las baterías se realiza a través de una fuente externa, esto es, conectándolas a la red de distribución eléctrica.

La batería es el elemento más importante del BEV, ya que no sólo es el componente más pesado o el más caro (hasta un tercio del coste final del vehículo) [120], sino también el principal factor limitante de las prestaciones del vehículo. Así, las características de la batería definen los dos parámetros más importantes en un BEV: su potencia y su autonomía.

Los BEV carecen por tanto de motor de combustión. En la Figura 61 se muestra la configuración de un vehículo eléctrico a baterías tipo, en este caso el Mitsubishi i-MiEV.

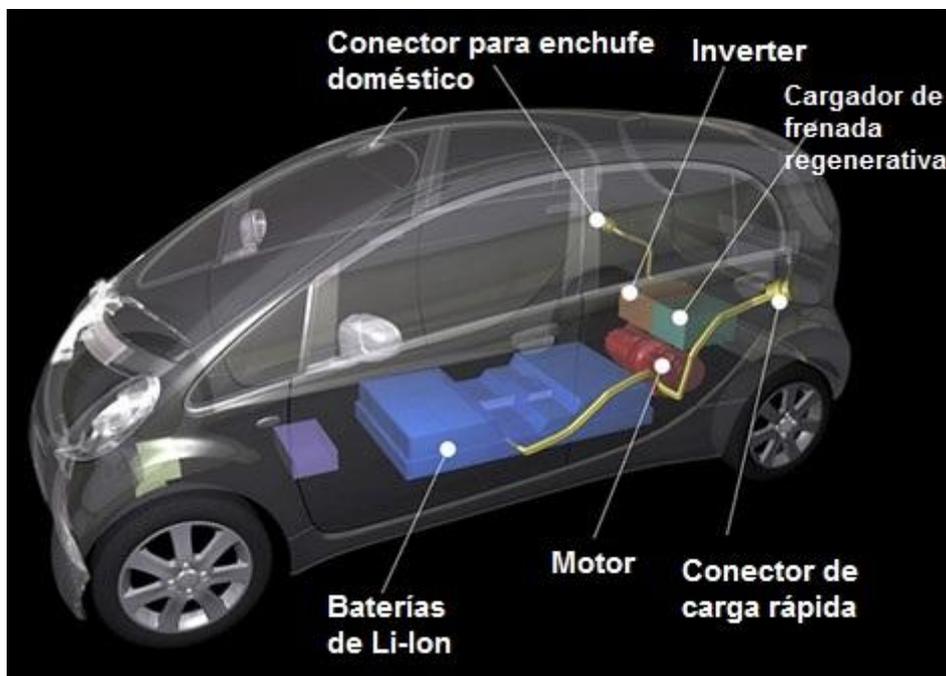


Figura 61 - Configuración de un Mitsubishi i-MiEV [Mitsubishi]

Frente a los vehículos con motor de combustión interna, los BEV ofrecen una serie de ventajas. La principal: la usencia de emisiones. No obstante esta no es la única. A continuación se detallan estas ventajas.

6.5.1. Ventajas de los BEV

6.5.1.1. Reducción de la contaminación atmosférica y acústica

Al carecer de motor térmico, los BEV no emiten directamente a la atmósfera ningún tipo de gas contaminante, lo que elimina el problema más importante derivado del uso del automóvil convencional en entornos urbanos.

Si la electricidad con la que se recargan las baterías proviene de fuentes renovables, entonces la operación del vehículo eléctrico es “cero emisiones” a todos los niveles. Por el contrario, si la electricidad se produce utilizando máquinas térmicas, la generación de estas emisiones sólo sufre un desplazamiento físico. En cualquier caso, al eliminarse el foco de emisiones de los núcleos urbanos, también se reducen drásticamente sus efectos nocivos para la salud.

Además de todo esto, los motores eléctricos no emiten apenas ruido, lo que convierte la operación de estos vehículos en algo casi totalmente silencioso.

6.5.1.2. Menor complejidad mecánica

Los BEV tienen una menor cantidad de elementos mecánicos, lo que da lugar a una menor complejidad y mantenimiento. Tal y como se ha indicado anteriormente, no precisan de volante de inercia, ni embrague, ni caja de cambios, y con los motores en las ruedas tampoco precisan de diferencial, ni de ningún otro elemento de transmisión. Además los motores eléctricos son infinitamente más sencillos que los motores de combustión interna, por lo que su mantenimiento es menor.

6.5.1.3. Oportunidad para nuevas arquitecturas

Otra importante ventaja de los BEV frente a los coches tradicionales tiene que ver con sus características físicas.

Mientras que las arquitecturas de los vehículos con MCI están muy limitadas por el gran volumen de elementos mecánicos que incorporan y la rigidez de su disposición, el menor número de componentes presentes en los BEV, así como el reducido tamaño de los motores eléctricos, la posibilidad de instalarlos directamente en las ruedas, y la capacidad de las baterías para adoptar la forma que mejor se adecúe al espacio disponible, abre un mundo de posibilidades a diseños innovadores.

Esto, que a priori puede resultar poco llamativo, cobra una gran importancia al pensar en capacidades futuras como la conducción autónoma. Si no es necesario conducir el automóvil, entonces su disposición actual pierde sentido, y el mercado podría moverse hacia nuevas plataformas con mayores posibilidades para la interacción de los ocupantes o la inclusión de espacios de trabajo que permitan aprovechar el tiempo de viaje.

Además, plataformas como la del Tesla Model S, que se muestra en la Figura 62, permitirán el desarrollo de distintos modelos utilizando la misma base común para todos ellos, lo que en la práctica supone un importante ahorro en costes para la industria.



Figura 62 - Suelo plano de un Tesla Model S [Tesla Motors]

Además, con el motor en las ruedas surgen otra serie de ventajas, como la posibilidad de eliminar el capó, reduciendo en una buena medida el tamaño del vehículo. Las baterías de forma adaptable también podrían contribuir a esta reducción, vital en entornos urbanos, donde el espacio es escaso. Estos motores también permiten una mayor maniobrabilidad y facilidad para aparcar en espacios pequeños.

6.5.1.4. Menor coste de operación

El coste de operación de un vehículo eléctrico es inferior al de un vehículo con MCI por el simple hecho de que el coste de la energía eléctrica es inferior al coste de los combustibles fósiles utilizados para realizar un determinado trayecto. Esto es algo fácilmente comprobable, tal y como se muestra a continuación para el caso de España.

Para analizar el coste de operación de un vehículo eléctrico se tomará como ejemplo el Nissan Leaf, un BEV equipado con una batería de iones de litio de 24 kWh de capacidad que le otorga una autonomía de 199 km en ciclo NEDC. Como precio de la electricidad se tomará el valor medio de la Tarifa de Último Recurso en 2013, en su versión con discriminación horaria. Estos precios fueron de 0.172148 €/kWh para el periodo de horas pico, y de 0.059420 €/kWh para el periodo de horas valle (IVA del 21% no incluido). [122]

Así, el coste de recorrer 100 km con este vehículo el pasado año fue de 2.50 € si la recarga se realizó en el periodo más caro, y de tan sólo 0.87 € si la recarga se realizó en horas valle, es decir, por la noche (lo cual resulta más lógico). Aplicando el precio medio de la TUR sin discriminación horaria (0.140728 €/kWh), este coste sería de 2.04 €. Para realizar estos cálculos se ha supuesto una carga impositiva del 21% en todos los casos.

En el caso del vehículo con MCI se ha seleccionado un automóvil equivalente del mismo segmento, el Audi A3, un vehículo con unos datos de consumo especialmente buenos. Dentro de todas las versiones disponibles, se han seleccionado las motorizaciones más pequeñas existentes para gasolina y diésel.

En el primer caso, se trata de un motor 1.2 TFSI de 105 CV, con un consumo combinado de 4.9 litros / 100 km. En el segundo, la variante 1.6 TDI ultra, cuyo consumo combinado marca sólo 3.2 litros / 100 km.

En el caso de la gasolina 95, su precio medio al consumidor en España en el año 2013 fue de 143.30 céntimos de euro/litro, mientras que el gasoil tuvo un coste medio de 136.13 céntimos de euro/litro, según datos de la Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos (CORES).

Así, para el caso del Audi A3, el coste de recorrer la misma distancia sería de 7.02 € en el caso de que incorporara motor de gasolina, y de 4.36 € si equipara el motor diésel.

Las diferencias son más que notables, y se disparan cuando se tiene en cuenta la distancia media recorrida anualmente por cada europeo en coche: 9.500 km. Con este dato, la energía derivada de operar un coche eléctrico apenas tendría un coste anual de 82.65 €, frente a los casi 667 € de un coche con motor de gasolina equivalente.

A continuación se muestra un cuadro resumen con los datos analizados (Tabla 7).

	Versión	Coste 100 km [€]	Coste medio anual (9.500 km) [€]	Variación (Gasolina = 100%)
Audi A3	1.2 TFSI (Gasolina)	7,02	666,90	100%
	1.6 TDI (Diésel)	4,36	414,20	62%
Nissan Leaf	TUR S/D	2,04	193,80	29%
	TUR C/D Hora pico	2,50	237,50	36%
	TUR C/D Hora valle	0,87	82,65	12%

Tabla 7 - Comparación del coste de operación de un vehículo de gasolina, diésel y eléctrico a baterías

6.5.2. Problemas de los vehículos eléctricos

En la actualidad los vehículos eléctricos tienen tres problemas fundamentales que están lastrando su ritmo de adopción, y todos ellos están relacionados con el elemento fundamental que los caracteriza: las baterías.

6.5.2.1. Autonomía

El primero de estos problemas tiene que ver con su autonomía, ya que las baterías actuales ofrecen rangos de conducción muy limitados, que no terminan de convencer a los posibles compradores.

Se trata no obstante de un hecho contradictorio, ya que la mayor parte de los vehículos eléctricos, incluso los más asequibles, tienen autonomías superiores a los 150 km (por ejemplo el Nissan Leaf, el modelo más vendido, tiene una autonomía homologada de 199 km en ciclo NEDC). En contraste con este dato se tiene que, en EE.UU., el 80 % de los desplazamientos diarios son inferiores a 80 km, y más de la mitad son inferiores a 40 km. En la Unión Europea, se realizan 3 desplazamientos diarios de media, entre los cuales apenas suman 27 km [122]. Además, con los postes de recarga rápida, algunos modelos pueden reponer hasta el 80 % de la energía en media hora.

Sin embargo, la percepción de los usuarios es que esta autonomía es muy inferior a sus necesidades. Algo cierto cuando se trata de grandes desplazamientos, pero irreal para la operación diaria en entornos urbanos.

6.5.2.2. Precio

El segundo de los problemas tiene que ver con su precio. Tanto los BEV como HEV tienen un precio sustancialmente superior al de un vehículo con MCI comparable, que aún no compensa el ahorro en combustible que genera su uso. No solo eso, sino que la mayor parte de las ocasiones este precio es superior aún con subvenciones públicas y reducción de impuestos, y en muchos casos incluso con ventas a pérdida por parte del fabricante. Además, muchas veces la compra del vehículo conlleva un gasto asociado en concepto de alquiler de baterías.

Debido a que las baterías son un elemento delicado, que puede dañarse con facilidad y reducir sus prestaciones con el tiempo, y dado que aún no existen certezas sobre su fiabilidad a largo plazo, la mayor parte de los fabricantes entregan este elemento en alquiler. Para el

usuario esto aporta la seguridad de que, en caso de fallo, el fabricante se hará cargo de sustituir el equipo de baterías por uno nuevo. Sin embargo, el coste es demasiado alto en algunos casos como para compensar el ahorro derivado de dejar de utilizar combustibles fósiles.

6.5.2.3. Infraestructura de recarga

Una de las principales ventajas del vehículo eléctrico tiene que ver con la posibilidad de recargar sus baterías en casa, a través de la red eléctrica doméstica. Sin embargo, esto supone un problema fuera del hogar, ya que la infraestructura de postes de recarga aún no está consolidada en casi ninguna ciudad.

Como ejemplo, la ciudad de Madrid se encuentra en un proceso de renovación de su infraestructura, que terminará en octubre de 2014. En esa fecha estará operativa la siguiente red:

- 24 postes públicos localizados en distintas calles de la ciudad (generalmente cada uno de estos postes tiene dos tomas, aunque no se especifica).
- 151 puntos de recarga distribuidos en 12 aparcamientos municipales.
- 12 puntos privados de uso público distribuidos en 6 localizaciones (generalmente centros comerciales). [123]

En total, suman 211 puntos en 42 localizaciones, algo que para una ciudad de más de tres millones de habitantes parece insuficiente. Sin embargo, las autoridades suelen escudarse en la baja adopción para justificar este pequeño número de puntos de recarga, al mismo tiempo que los usuarios no adquieren este tipo de vehículos por miedo a quedarse sin batería en localizaciones en las que no existen puntos de recarga.

6.5.3. Baterías futuras para vehículos eléctricos

Con el objetivo de incrementar la autonomía de los vehículos eléctricos y de minimizar el impacto que una infraestructura de recarga deficiente pueda tener sobre la adopción a gran escala de estos automóviles, tanto las marcas como los fabricantes de baterías se afanan en desarrollar nuevas tecnologías que ofrezcan una ventaja competitiva frente a las existentes.

6.5.3.1. Baterías de litio-azufre (Li-S)

La batería de litio-azufre es un desarrollo de la batería de iones de litio en la que el ánodo está formado por litio, mientras que el cátodo está fabricado en azufre. Este tipo de baterías tienen la potencial capacidad de incrementar la autonomía de un vehículo entre 5 y 10 veces a largo plazo, y hasta tres veces a medio plazo.

La principal ventaja de las baterías de Li-S respecto a las tradicionales de Li-Ion reside en su energía específica, que puede superar fácilmente los 500 Wh/kg, frente a los 230 Wh/kg mencionados en el punto 6.4.5 para las segundas (o los potenciales 350 Wh/kg). Además, su coste potencial es inferior. Frente a esto, las baterías de Li-S adolecen de dos problemas fundamentales: su corta vida (debido a la descomposición del cátodo) y su deficiente capacidad de carga.

Para solucionar este problema, en el último año se han presentado dos soluciones. La primera de ellas (Figura 63) [124] pasa por introducir una capa de grafito en el ánodo de litio, lo que controla posibles reacciones indeseadas que afectan al ciclo de vida de las baterías.

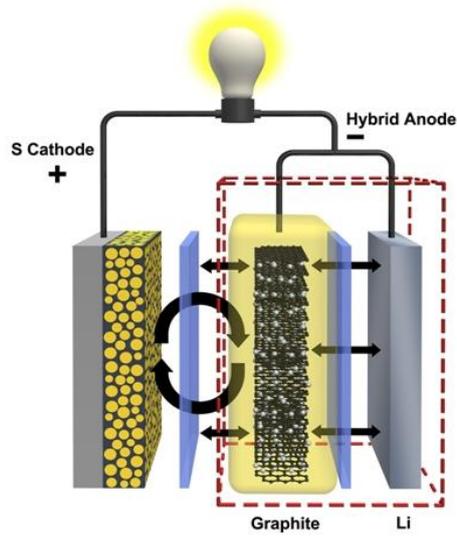


Figura 63 - Ilustración de una batería de Li-S con grafito [124]

La segunda solución (Figura 64) también aboga por la inclusión de carbono en la estructura de la celda, aunque en este caso en forma de pequeños filamentos de grafeno sobre los que se sitúa el azufre. Con esta composición, la batería prototipo, que en un principio superaba los 500 Wh/kg de capacidad específica, consiguió mantenerse por encima de los 300 Wh/kg al superar los 1.000 ciclos de carga y descarga, lo cual sigue siendo superior a la capacidad máxima de las baterías actuales. [125]

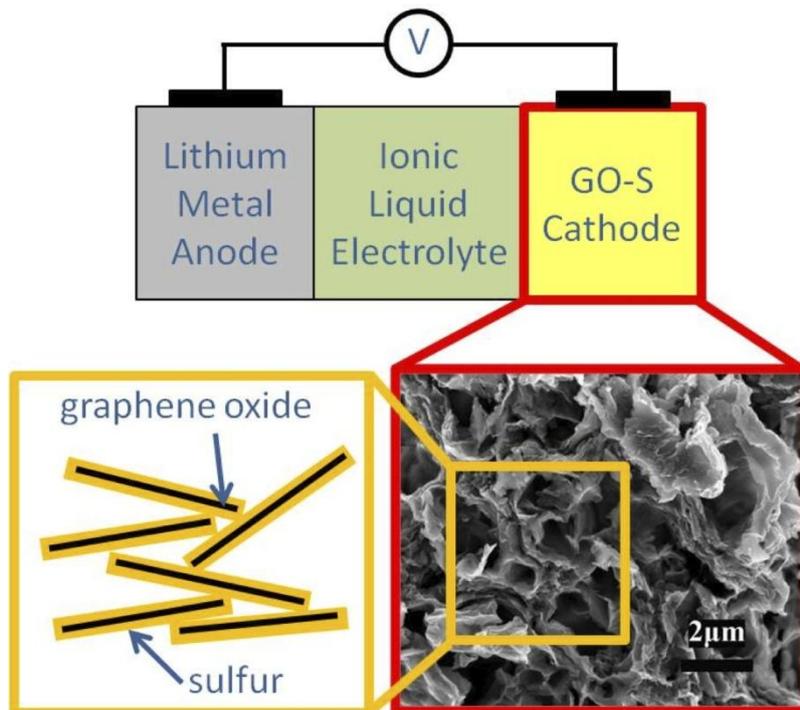


Figura 64 - Ilustración de una batería de Li-S con grafeno [125]

6.5.3.2. Baterías de litio-aire (Li-aire)

Al igual que las baterías de Li-S, las de Li-aire también prometen triplicar la autonomía de los vehículos eléctricos a medio plazo, y como en el caso de las anteriores, se trata de un desarrollo de la tecnología Li-Ion tradicional. En este caso, el ánodo sigue siendo de litio, mientras que el elemento que se reduce en el cátodo es el oxígeno del aire, que se encuentra atrapado en una estructura porosa de carbono. Una ilustración de este tipo de baterías se muestra en la Figura 65.

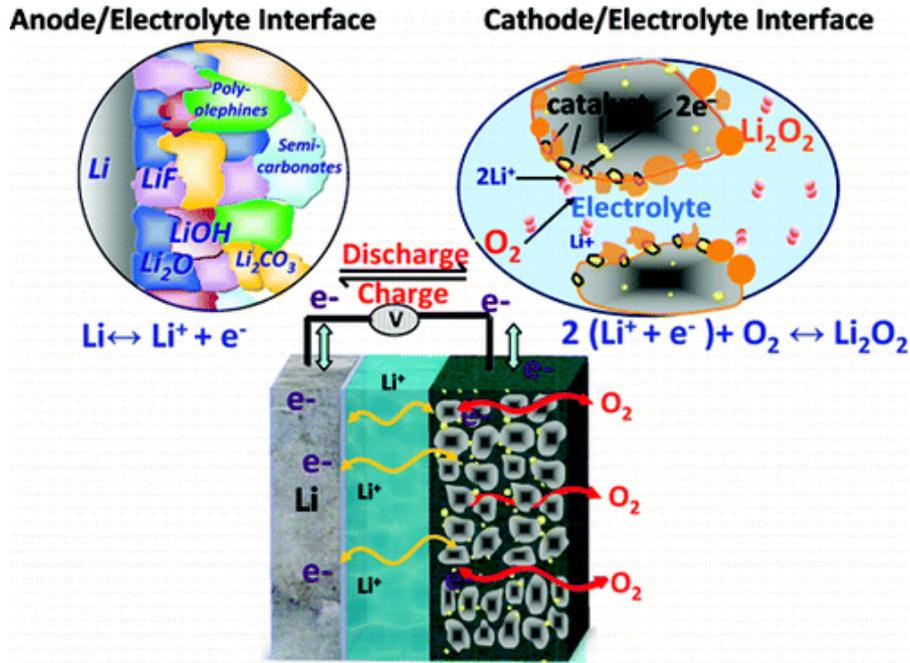


Figura 65 - Ilustración de una batería de Litio-Aire [125]

Su principal ventaja reside de nuevo en la energía específica, que teóricamente es de más de 11 kWh/kg, lo que compite directamente con la gasolina, que posee una energía específica de aproximadamente 13 kWh/kg.

Los principales retos de estas baterías se encuentran en el cátodo, que puede bloquearse provocando descargas incompletas, y en la reacción del litio con el electrolito. No obstante, aún se necesita mucha investigación hasta llegar al estado de madurez que permita comercializar estas baterías. [125]

A continuación se muestra una gráfica (Figura 66) que compara la energía específica en cada una de las baterías anteriormente explicadas.

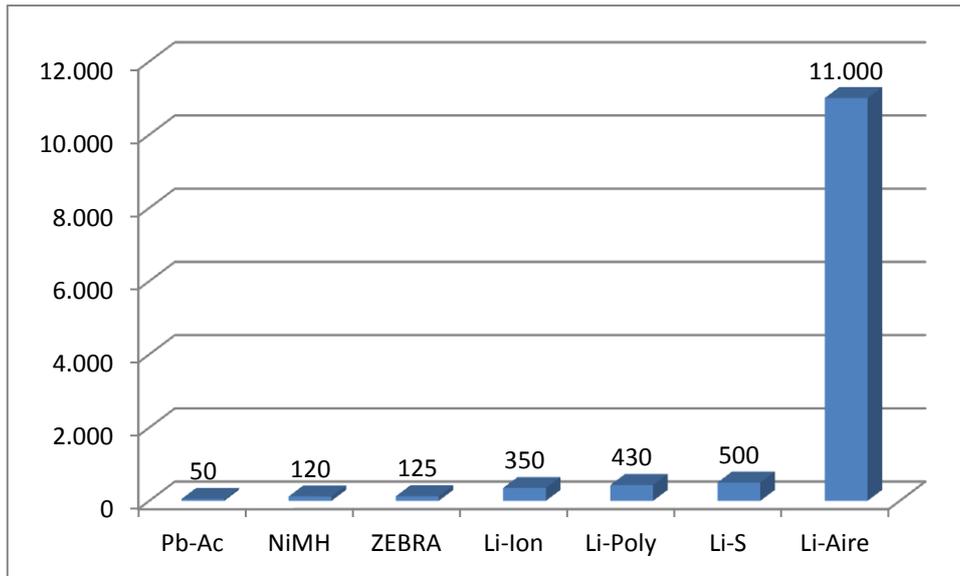


Figura 66 - Comparación entre los distintos tipos de baterías analizadas (Elaboración propia)

6.5.3.3. Ultracondensadores

Los ultracondensadores (o supercondensadores) son un tipo de condensadores con una gran superficie conductora y una distancia entre electrodos mínima que les confiere una capacitancia de varios Faradios, esto es, un orden de magnitud dos o tres veces superior al de los condensadores tradicionales, que generalmente tienen una capacitancia de miliFaradios. En la actualidad existen en el mercado ultracondensadores de hasta 5.000F.

Los ultracondensadores utilizan un electrolito en lugar de un dieléctrico, y almacenan la energía eléctrica en los enlaces entre los electrodos y el electrolito. Es decir, se trata de dispositivos electroquímicos. Sin embargo, en los ultracondensadores el almacenamiento de energía no se da a través de ninguna reacción química.

Estos dispositivos cuentan con multitud de ventajas frente a las baterías. Por ejemplo, se trata de una tecnología que no requiere mantenimiento, y que soporta teóricamente infinitos ciclos de carga y descarga sin perder sus capacidades. Además, son muy buenos a la hora de almacenar la energía procedente de la frenada regenerativa, y tienen tasas de descarga muy altas, al no depender de reacciones químicas, lo que los hace perfectos para grandes aceleraciones y cargas. [126]

El principal problema de los ultracondensadores se encuentra en que, aunque desarrollan una potencia específica enorme, no pueden almacenar tanta energía como las baterías, tienen una diferencia de potencial muy baja, y además son caros de fabricar. Por eso se trabaja en su integración con las baterías, en lo que se ha dado en llamar *bacitores*, o condensadores de ión-litio, para dar lugar a un híbrido con mejores características.

Los ultracondensadores de ión-litio utilizan carbón activo como cátodo, y un material de carbono impregnado en litio como ánodo, lo que disminuye el potencial de este, aumentando la diferencia de potencial, al mismo tiempo que aumenta la capacidad. En la Figura 67 se muestra la representación de un ultracondensador tradicional y uno de ión-litio.

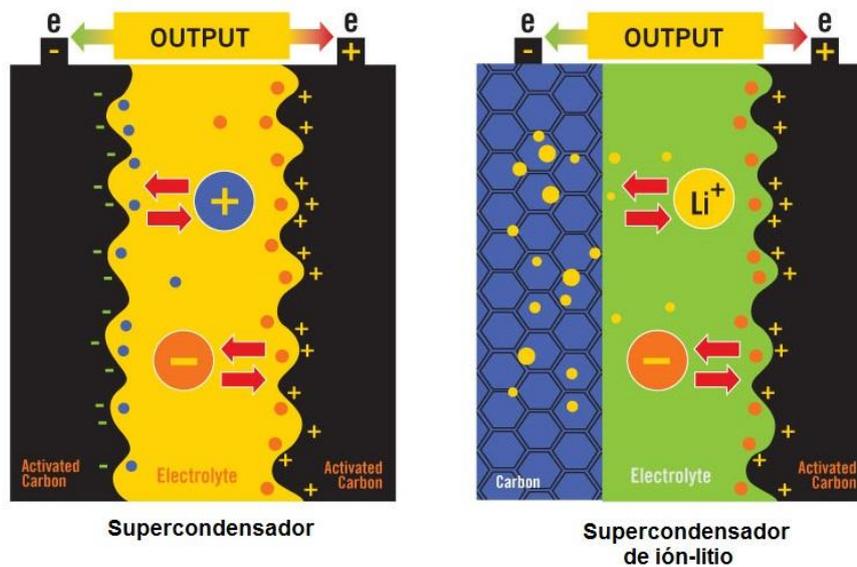


Figura 67 - Diferencias entre ultracondensadores y ultracondensadores de ión-litio [127]

Aunque este tipo de tecnología ya se emplea en automóviles comerciales, su inclusión en este apartado obedece a su enorme potencial de mejora. Elon Musk, fundador y CEO de Tesla, afirmó que en un futuro los ultracondensadores de ión-litio tendrán el poder de acabar con las baterías de ión-litio [128]. Y aunque la realidad es que no parece que vaya a ser así por el momento, el desarrollo de ultracondensadores de grafeno está dando lugar a resultados sorprendentes, con energías específicas de entre 100 y 200 Wh/kg [129].

El desarrollo de ultracondensadores capaces de sustituir al pack de baterías sería sin duda el mayor hito del automóvil eléctrico: recargas completas en 16 segundos, es decir, sustancialmente menos de lo que se tarda en repostar un vehículo tradicional, y una vida superior a 10.000 ciclos de carga-descarga sin afección a su capacidad.

6.5.3.4. Baterías de flujo redox

Las baterías de flujo redox son un tipo de baterías recargables en las que la energía se acumula en forma de dos componentes líquidos almacenados por separado, y se libera con el intercambio de iones que se produce entre ellos, a través una membrana que los separa.

La principal ventaja de estas baterías se encuentra en que su recarga es tan sencilla como lo es el repostaje tradicional, ya que sólo hay que extraer los fluidos “gastados” e introducir los nuevos en sendos depósitos, que posteriormente se bombean hasta el lugar donde se ponen en contacto (Figura 68).

Las baterías de flujo redox más avanzadas para su uso en automoción se están desarrollando en el Laboratorio Nacional de Argonne, en EE.UU., y los investigadores que trabajan en ellas calculan que proporcionarán una autonomía de hasta 800 kilómetros, aunque aumentar este parámetro sólo sería cuestión de aumentar el tamaño de los depósitos. [130]

Hasta la fecha, este tipo de baterías almacenaban la energía en un fluido muy disuelto, lo que requería una gran cantidad de espacio y las hacía inviables para su uso en automoción.

Ahora se investiga el uso de nanopartículas sólidas que en conjunto puedan comportarse como un líquido y fluir.

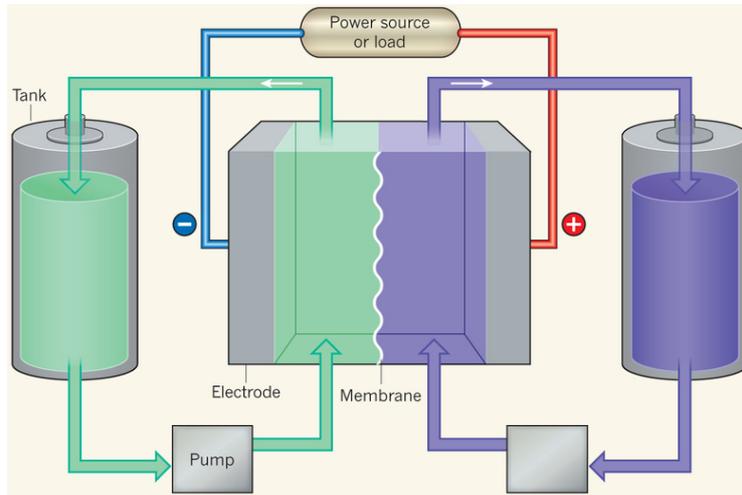


Figura 68 - Ilustración de una batería de flujo redox [131]

En marzo de 2014 se presentó en el marco del Salón de Ginebra un vehículo denominado QUANT e-Sportlimousine basado en esta tecnología que ofrece unas prestaciones desorbitadas para un vehículo eléctrico: 920 CV y una autonomía de 600 kilómetros. Para ello dispone de dos tanques de almacenamiento que suman 200 litros de capacidad, que aportarían un total de 120 kWh de energía para alimentar sus cuatro motores eléctricos. Como fluidos electrolíticos utiliza sales metálicas disueltas en grandes concentraciones, aunque no se especifica cuáles son las sales, ni tampoco el disolvente.

Entre la corriente extraída de la batería y los motores se interponen sendas baterías de ultracondensadores que se encargan de que la entrega de la potencia sea la requerida en cada momento. La configuración de este vehículo puede verse en la Figura 69.

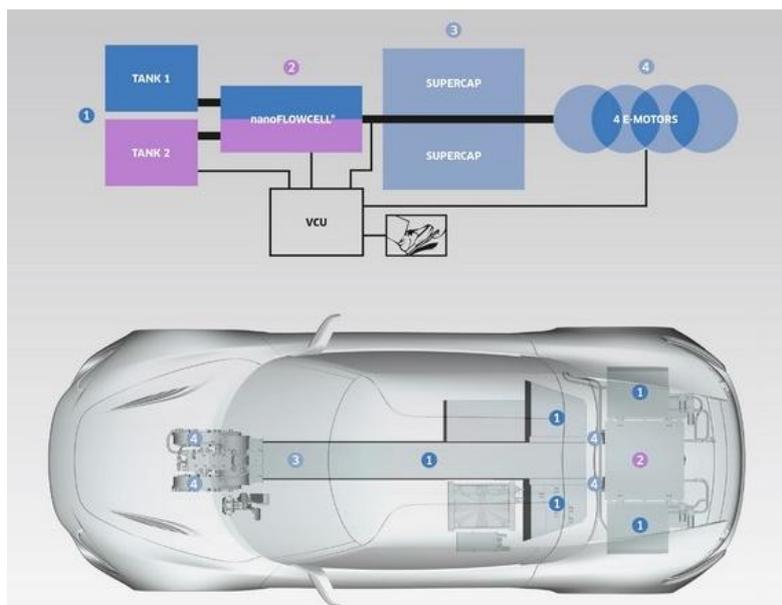


Figura 69 - Ilustración del vehículo Quantum eSportLimousinne [132]

Aunque no ofrece demasiados datos al respecto, lo cierto es que NanoFLOWCELL AG, la empresa encargada de desarrollar el vehículo, ha conseguido obtener el permiso de circulación para su prototipo, que ya puede moverse por todas las vías europeas.

A falta de información sobre el coste del fluido electrolítico, se trata de un paso importante que podría suponer un impulso a medio plazo a los vehículos eléctricos, al terminar con el problema del tiempo de recarga, pues la operación de estos vehículos competiría directamente con la de otros con MCI tradicionales. [132]

6.5.4. El BEV y el sistema eléctrico

A la hora de hablar del futuro de la movilidad eléctrica resulta imprescindible analizar su relación con el sistema eléctrico actual, puesto que estos vehículos dependen directamente de él, aunque no sólo por eso, sino también porque su integración a gran escala puede dar lugar a una importante mejora en la eficiencia de operación del sistema.

Además, la principal ventaja del BEV en términos ambientales, es decir, la ausencia de emisiones contaminantes, puede quedar en entredicho en función de las características del mix de generación eléctrica de cada país.

6.5.4.1. Emisiones de CO₂ derivadas de la operación de un vehículo eléctrico

En el caso de España, en el año 2013 la demanda de energía eléctrica se satisfizo a través de las tecnologías de generación que se detallan en la Figura 70, en la que puede observarse que el 42.2% tuvo origen en fuentes renovables. El factor de emisión de este mix energético es de aproximadamente 0.24 toneladas de CO₂ por cada MWh generado (o 240 gramos por kWh).

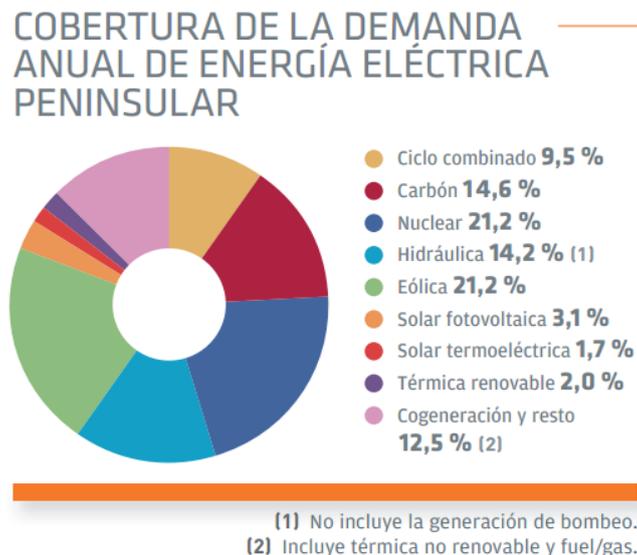


Figura 70 - Representación del mix de generación del sistema eléctrico español peninsular [133]

Tomando como ejemplo los mismos modelos del punto 6.5.4.1., se obtiene que para un recorrido de 100 kilómetros, las emisiones de CO₂ asociadas al Nissan Leaf son de apenas 2.88 kg de CO₂. En el caso del Audi A3, estas emisiones se disparan hasta los 11.4 kg cuando equipa

el motor de gasolina 1.2 TFSI, mientras que el motor 1.6 TDI diésel emite 8.5 kg de CO₂. Sin embargo, si se toma como ejemplo el mix de generación de un país como China, en el que de media se abre una nueva central térmica de carbón a la semana [134], los números son bien distintos. Así, en este país, donde el factor de emisiones es de 0.758 gramos de CO₂ por kWh (y en aumento) [135], las emisiones de CO₂ asociadas a la operación del Leaf ascenderían a 9.1 kg, una cifra superior a la del motor diésel. En el caso del conjunto de la Unión Europea, el factor de emisiones es de 460 gramos de CO₂ por cada kWh, por lo que este vehículo sería responsable de emitir 5.52 kg/100 km.

La Figura 71 se ha elaborado con el propósito de representar estos datos de una forma más visual.

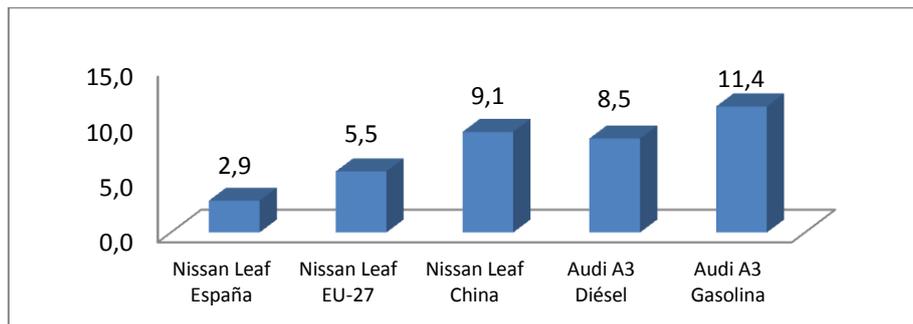


Figura 71 - Emisiones de CO₂ asociadas a la operación de vehículos [kg/100km]

6.5.4.2. El BEV como regulador del sistema eléctrico

Como se ha indicado con anterioridad, la implantación a gran escala del vehículo eléctrico podría tener un impacto positivo en la eficiencia del sistema eléctrico, al tener estos coches la capacidad de equilibrar las curvas de oferta y demanda.

Gracias al desarrollo de las tecnologías de *smart grids*, una vez enchufados, estos vehículos podrían ponerse en carga sólo en aquellos momentos en los que la oferta de energía supera a la demanda del sistema, evitando la pérdida de la energía sobrante.

Además, su entrada masiva en el sistema eléctrico no requeriría de un gran aumento de la potencia instalada. La incorporación al parque automotriz español de 27 millones de BEV hasta el año 2020 sólo supondría un aumento de la demanda de un 18%, mientras que una buena parte de esta electricidad se demandaría en las horas valle, cuando la demanda es baja y la electricidad es más barata, lo que sólo tendría un efecto “aplanador” en la curva, tal y como se muestra en la Figura 72.

Más allá de esto, la implantación de un sistema “V2G” (Vehicle to Grid, o “del vehículo a la red”) que permitiera extraer parte de la energía almacenada en los vehículos eléctricos e incorporarla al sistema, podría evitar la construcción de nuevas centrales de ciclo combinado y otras plantas de apoyo, cuyo único propósito es satisfacer los picos de demanda instantánea para evitar el fallo del sistema, con un importante coste económico. No obstante, la realidad es que muy probablemente pocos usuarios estarían dispuestos a encontrarse su coche sin carga en el momento de arrancar por la implantación de este sistema. Pero sí podrían estar interesados en utilizar la energía almacenada en las baterías para alimentar su red doméstica en caso de desabastecimiento.

Curvas de carga para una red eléctrica típica

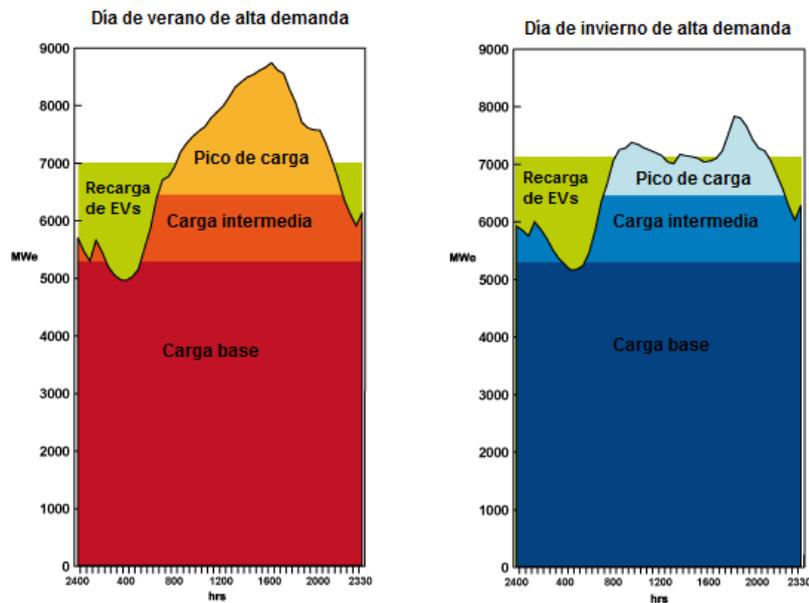


Figura 72 - Efecto de la introducción del BEV en el sistema eléctrico [136]

6.6. Vehículos eléctricos híbridos (HEV)

Los vehículos eléctricos híbridos (HEV) son un tipo de vehículo que combina el uso de un motor de combustión y un motor eléctrico como elementos de propulsión.

Existe una gran multitud de configuraciones posibles dentro de los vehículos híbridos, aunque pueden establecerse dos tipos básicos de vehículo, en función de si el motor de combustión está acoplado a la transmisión, o de si sólo se utiliza para impulsar un generador que recargue las baterías durante la marcha.

- **HEV en paralelo.** El primer tipo de vehículos híbridos se denomina HEV en paralelo, y en estos automóviles el motor térmico es el principal elemento de tracción, actuando el motor eléctrico sólo en aquellos momentos en los que la demanda de potencia es alta y se requiere un empuje extra. Así pues, estos vehículos son similares a los tradicionales con MCI, en los que los picos de potencia se satisfacen con un motor eléctrico, en vez de aumentando el tamaño del motor de combustión.
- **HEV en serie.** Por el contrario, en los HEV en serie el motor eléctrico no tiene ningún acople mecánico a las ruedas, sino que toda la potencia que desarrolla se emplea en mover un alternador que genera electricidad para recargar las baterías.

Existe un tercer tipo de HEV, denominado HEV combinado, que contiene aspectos de las configuraciones en serie y en paralelo. En estos vehículos el motor eléctrico suele ser el principal sistema de propulsión a bajas velocidades, entrando a actuar el motor térmico cuando se necesita mayor potencia, así como cuando la carga de las baterías se resiente. En las Figuras 73 y 74 se muestran tres esquemas que ejemplifican cada uno de estos tipos de HEV.

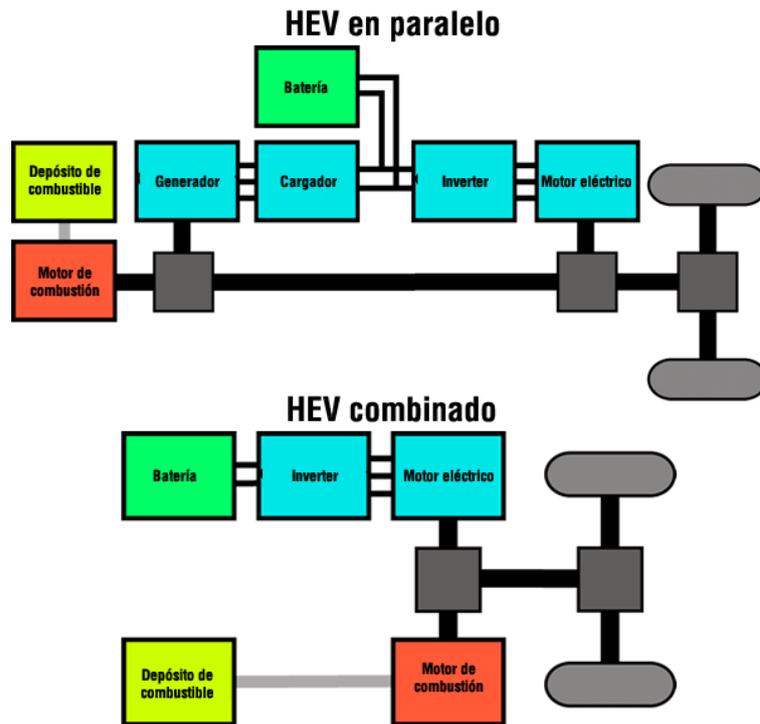


Figura 73 - Arquitecturas de HEV: en paralelo y combinado [137]

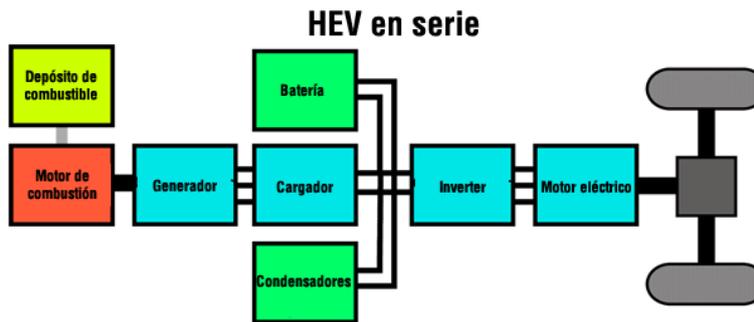


Figura 74 - Arquitecturas de HEV: en serie [137]

Otra forma de clasificar los HEVs es aquella que atiende al grado o factor de hibridación del vehículo, que se define como el cociente entre la potencia del motor eléctrico y la potencia total del automóvil, según la Ecuación 5 [138]:

$$FH = \frac{P_{ME}}{P_{ME} + P_{MCI}}$$

Ecuación 5

Donde P_{ME} es la potencia máxima del motor eléctrico, y P_{MCI} es la potencia máxima del motor de combustión interna. Siguiendo este criterio podrían establecerse los siguientes tipos de HEVs [139]:

- **Micro-HEV (FH < 0.1).** Este tipo de vehículos emplean el motor eléctrico para mejorar las prestaciones durante el arranque, mientras que es el MCI el que se encarga de entregar la potencia durante la operación en continuo. Generalmente aprovechan la

frenada regenerativa para potenciar el motor encargado del sistema *Start&Stop*. Pueden conseguir un ahorro de combustible del 10 % comparados con un vehículo tradicional, sobre todo en entornos urbanos.

- **HEV medio ($0.1 < FH < 0.25$)**. Además de lo anterior, este tipo de vehículos también emplean el motor eléctrico como apoyo al MCI en aquellos momentos en los que se requiere un aporte extra de potencia. Pueden disminuir el consumo de combustible entre un 10 y un 20 %.
- **HEV de potencia asistida ($0.25 < FH < 0.5$)**. Además de todo lo anterior, estos vehículos tienen una mayor capacidad eléctrica que les permite circular en modo totalmente eléctrico para viajar distancias cortas. El consumo de energía puede mejorar hasta un 50 % en entornos urbanos.
- **HEV enchufable (PHEV) ($FH > 0.5$)**. Este tipo de vehículos puede circular en modo totalmente eléctrico con un rango de autonomía aceptable, y las baterías pueden recargarse enchufándolas a la red doméstica. Generalmente cuentan con una configuración en serie, y se denominan “vehículos eléctricos de autonomía extendida”.

6.6.1. Ventajas e inconvenientes de los vehículos híbridos

La operación de vehículos eléctricos supone una ventaja respecto a los automóviles convencionales con motores de combustión interna ya que la introducción de tecnologías eléctricas abarata el coste de uso y reduce las emisiones de gases de escape. No obstante, estos vehículos tampoco están exentos de inconvenientes. La combinación de un sistema de tracción térmico y uno eléctrico aumenta el peso y requiere de un mayor espacio tanto con respecto a los vehículos con motor térmico como con respecto a los BEV. El precio también es sustancialmente superior, no compensando en muchas ocasiones el ahorro que puedan generar a largo plazo; y la falta de evidencias que garanticen la vida en servicio de las baterías genera miedo entre los potenciales compradores.

No obstante, debido a la gran cantidad de configuraciones posibles que pueden darse en los HEV, y a las sustanciales diferencias que hay entre cada una de ellas, resulta difícil establecer unas líneas generales que describan estas ventajas e inconvenientes. A continuación se especificarán algunas de ellas para los HEV en serie y paralelo.

6.6.1.1. HEV en paralelo

En los vehículos híbridos en paralelo, tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico están acoplados a las ruedas para entregar directamente la potencia y el par, de forma que el motor eléctrico actúa cuando se requiere un esfuerzo extra. En estos vehículos la energía que se almacena en las baterías suele obtenerse durante las frenadas, gracias al funcionamiento del motor eléctrico como freno regenerativo. No obstante esto no siempre es así. En vehículos con grados de hibridación superiores, el motor térmico actúa como generador cuando se agota la carga de las baterías, que pueden ser o no enchufables.

La inclusión del motor eléctrico para suplir los picos de potencia permite una reducción del tamaño del motor de combustión, además de un aprovechamiento de la energía que en otras situaciones se perdería, con lo que la eficiencia del conjunto aumenta. Sin embargo, el

potencial de reducción del consumo y las emisiones de los HEV en paralelo es inferior al de los HEV en serie.

Para aprovechar al máximo su potencial, este tipo de vehículos suelen incorporar cajas de cambio automáticas que optimizan la relación de transmisión en cada momento para que el motor térmico gire en su rango óptimo de operación, al tiempo que el resto de la potencia se genera a través del motor eléctrico.

En relación al peso, en los HEV este es generalmente superior al de un vehículo comparable tradicional, ya que no sólo requieren del tren de potencia característico de los MCI, sino que a este peso hay que sumarle el que aporta el sistema eléctrico.

En ocasiones estos vehículos permiten circular en modo totalmente eléctrico, para lo cual hay que desacoplar el motor térmico de las ruedas a través del embrague.

6.6.1.2. HEV en serie

Para su operación en entornos urbanos, los HEV en serie cuentan en general con mayores ventajas que los HEV en paralelo. En primer lugar, el uso del motor únicamente como generador eléctrico y la ausencia de transmisión hasta las ruedas permite que este funcione siempre en su zona de máxima eficiencia, lo que reduce al mínimo el consumo de combustible. Además, esta falta de transmisión a las ruedas reduce el número de componentes que debe incorporar el vehículo, disminuyendo tanto el espacio necesario como el peso asociado a estos componentes, la complejidad del conjunto y el coste (un punto que se ve compensado por el aumento del peso y el coste de las baterías).

El principal beneficio de incluir un motor de combustión interna que transforma la energía química del combustible en energía eléctrica es que elimina los problemas de autonomía asociados a los BEV. Aunque la operación del HEV en serie es eléctrica, su repostaje de energía se realiza del mismo modo en que se hace en un vehículo tradicional. Esto, no obstante, “ensucia” la conducción cuando el recorrido es superior a la capacidad de la batería.

En comparación con los HEV en paralelo, los HEV en serie tienen un pack de baterías de mayor tamaño, lo que les permite una operación en modo totalmente eléctrico –sin activar el MCI- durante una mayor autonomía. Además, la mayor parte de estos vehículos pueden enchufarse directamente a la red para recargar las baterías, con lo que la conducción durante distancias relativamente cortas también puede ser cero emisiones.

6.6.2. Oportunidades de los vehículos híbridos

Los vehículos híbridos tienen dos grandes frentes de mejora, con un importante potencial de avance en cada uno de ellos.

- En primer lugar, el sistema de propulsión eléctrico, es decir, el motor eléctrico y las baterías. Este sistema es similar al que utilizan los BEV, y por tanto todo lo expresado anteriormente en relación a este tipo de vehículos tiene una total validez para los HEV.

- El segundo frente tiene que ver con el motor de combustión interna. En este caso, aunque todas las potenciales mejoras explicadas en el punto 5 tienen aplicabilidad en los HEV, la introducción del motor eléctrico permite el uso de otros motores. Este es el caso de los motores de ciclo Atkinson y el generador lineal de pistón libre, ambos patentados por Toyota, una de las principales marcas impulsoras de estas tecnologías. A continuación se desarrollan estas dos motorizaciones.

6.6.2.1. El motor de Ciclo Atkinson

El motor de ciclo Atkinson es un tipo de MCI que funciona siguiendo un ciclo termodinámico desarrollado a partir del ciclo Otto. Estos motores son capaces de ofrecer eficiencias mayores que las de los motores de gasolina convencionales comparables, a expensas de potencias más reducidas, lo que les convierte en una opción ideal para vehículos híbridos, en los que los picos de potencia pueden satisfacerse gracias al motor eléctrico. Este aumento de la eficiencia podría llegar al 14% [140], y se consigue a través del aumento de la relación de compresión, que queda limitada por las condiciones de detonación de la gasolina.

El motor de ciclo Atkinson actual poco tiene que ver con el original desarrollado por James Atkinson, en el que todo el ciclo se desarrollaba en una sola vuelta del cigüeñal, sino que hoy en día se denomina así a una modificación del motor Otto convencional.

A diferencia de lo que ocurre en los motores de tipo Otto, en los que la válvula de admisión se cierra cuando comienza la carrera de compresión de los gases, en el motor de ciclo Atkinson este cierre de las válvulas sufre un retraso en el tiempo, de forma que parte de los gases se devuelven al colector de admisión, desaprovechando una parte de la relación de compresión, que suele ser del orden de 8:1. Sin embargo, este descenso se ve compensado por un aumento de la relación de admisión (generalmente 13:1). El resultado es que al final de la carrera de expansión, la presión en el cilindro es similar a la atmosférica, lo que en la práctica significa que una fracción mayor de la energía se ha empleado en hacer descender el pistón [141]. En la Figura 75 se muestra la representación de un ciclo Atkinson ideal.

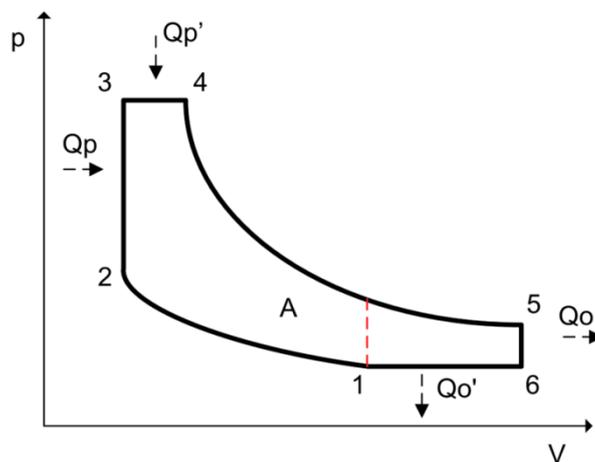


Figura 75 - Representación de un ciclo Atkinson ideal

En la actualidad, Toyota es el principal impulsor de esta tecnología, que incorpora su modelo Prius, un HEV en paralelo en el que el MCI sólo entra en funcionamiento cuando se descargan las baterías. Llegado este momento, el MCI actúa como elemento de propulsión, al

mismo tiempo que recarga la batería. A velocidades de crucero, ambos elementos se combinan, actuando el motor eléctrico cuando se requieren potencias superiores.

Las ventajas del ciclo Atkinson frente al ciclo Otto son evidentes cuando se comparan los datos de consumo y emisiones del Prius cuando circula con la batería totalmente descargada con los que arroja el modelo Yaris, también de Toyota, que incorpora el mismo bloque motor, aunque en este caso funcionando según el ciclo Otto. Estos datos pueden verse en la Tabla 8:

	Prius (EV/HV)	Prius (HV)	Yaris
Cilindrada (cm3)	1798	1798	1798
Potencia máxima (CV)	136	99	133
Par máximo (Nm)	207	142	173
Emisiones de CO2 en ciclo NEDC (g/km)	49	89	110
Consumo de combustible (litros/100 km)	2,1	3,9	4,8

Tabla 8 - Comparación de características entre el motor de ciclo Atkinson y el motor Otto

6.6.2.2. *Generador con motor de pistón libre*

El motor de pistón libre es un motor lineal de dos tiempos que carece de cigüeñal, en el que el movimiento del pistón está determinado por las fuerzas de interacción entre los gases de la cámara de combustión, un instrumento de retorno y un mecanismo de carga. Los motores de pistón libre se han utilizado con éxito en el pasado como compresores y motores hidráulicos, y posteriormente como motores de gas, generalmente para su uso en centrales eléctricas estacionarias o buques marinos.

En mayo de 2014 Toyota hizo público que se encuentra trabajando en un generador eléctrico basado en el motor de pistón libre para su inclusión en HEV. Este motor está formado por una cámara de combustión, un generador lineal y un amortiguador de gas. Como en los motores tradicionales, el movimiento del pistón es originado por los gases de combustión. Este pistón lleva incorporados una serie de imanes permanentes, que interactúan con una bobina lineal situada en el bloque del cilindro, convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica. Un esquema del conjunto se muestra en la Figura 76.

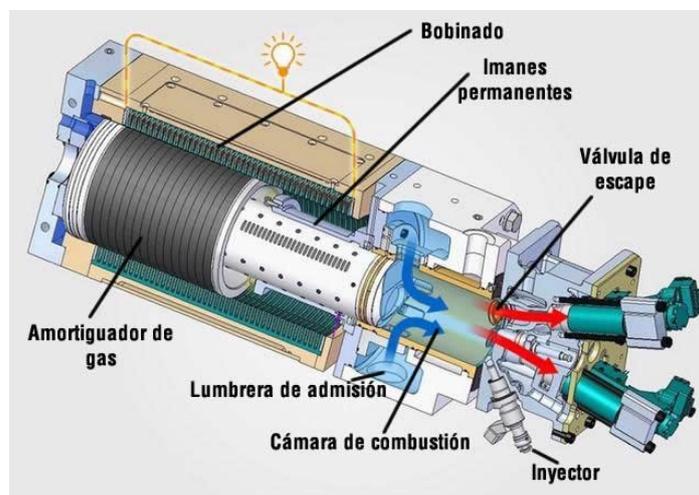


Figura 76 - Ilustración del generador lineal de motor libre de Toyota (Adaptado de Toyota)

El prototipo desarrollado por Toyota entrega 10 kW de potencia, lo que en teoría le confiere la capacidad de mantener a un vehículo medio a una velocidad de crucero de 120 km/h, y su eficiencia es del 42%, una cifra que, según los desarrolladores, aún tiene margen de mejora.

Las ventajas de utilizar generadores lineales como este en HEVs son múltiples. La principal tiene que ver con que la incorporación del generador eléctrico en el propio motor reduce tanto el tamaño como el peso del conjunto. Además, este motor tiene unas características constructivas sencillas. En vehículos híbridos, esta reducción del peso es muy importante, ya que menores pesos permiten una mayor autonomía de operación en modo totalmente eléctrico.

El principal problema en este caso tiene que ver con el control. Al no estar definida la posición del pistón por el ángulo del cigüeñal, es necesario añadir una serie de sensores a lo largo de toda la camisa del cilindro que puedan determinar esta posición en cada momento, de forma que la apertura y cierre de las válvulas, así como la inyección del combustible, se realicen en el momento oportuno. Además, Toyota no aporta datos de emisiones, algo muy importante cuando se trata de motores de dos tiempos. [142, 143, 144, 145]

En el año 2012, la Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU. concedió una patente a General Motors y la Universidad de Míchigan por el desarrollo de un concepto similar. En este caso el motor está compuesto por dos cámaras de combustión, que comparten el mismo pistón, situándose el generador en el centro de ambas. Se trataría de motores más pequeños, de los cuales podrían incorporarse varias unidades en el vehículo, en función de la potencia requerida. En las Figuras 77 y 78 se muestran los esquemas de la patente, que no ofrece datos acerca de posibles rendimientos o consumos [146].

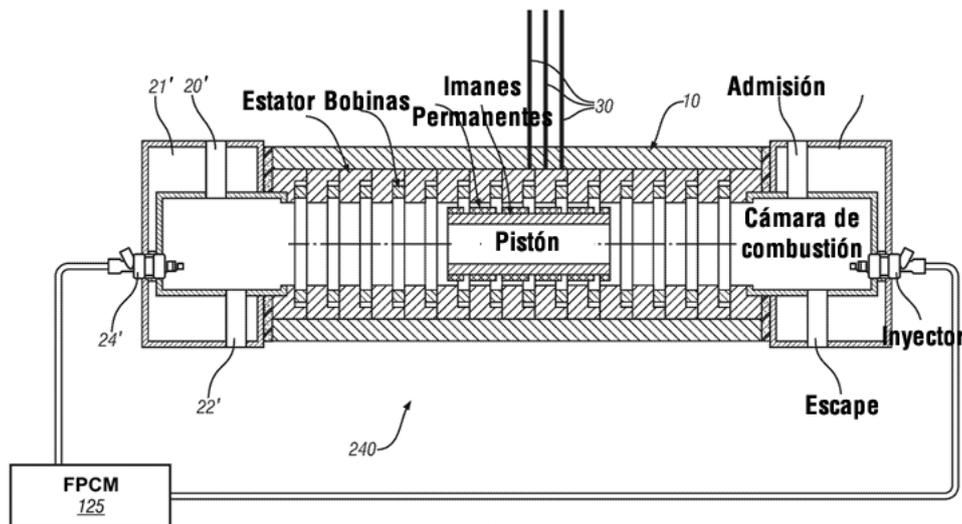


FIG. 4

Figura 77 - Ilustración del generador lineal de pistón libre de GM y la Universidad de Míchigan [146]

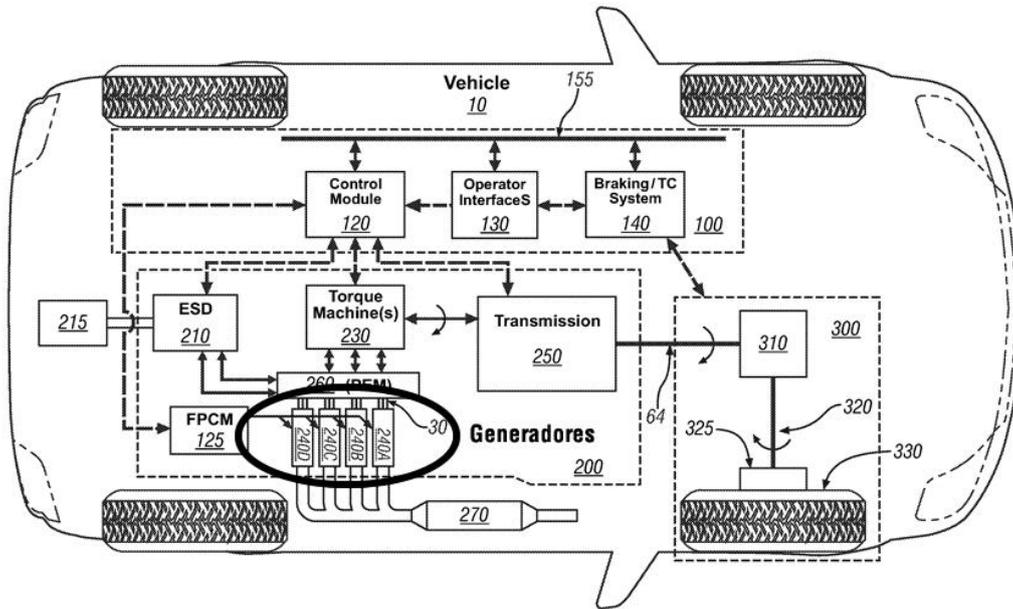


Figura 78 - Disposición de los componentes en el interior del vehículo patentado por GM y la Universidad de Michigan [146]

6.6.2.3. Híbrido con motor de aire comprimido

Los vehículos híbridos con motor de aire comprimido son un tipo de automóvil que aprovecha los excedentes de energía del motor térmico para presurizar un fluido hidráulico, generalmente nitrógeno (el principal componente del aire), que se almacena en un depósito, para posteriormente utilizarlo como elemento de propulsión.

Se trata por tanto de un tipo de hibridación totalmente distinta a las vistas hasta ahora, en la que la tecnología eléctrica no está presente. Su inclusión en este capítulo se debe a su similitud conceptual con los HEV, así como a que se plantea como una verdadera alternativa a las propuestas estudiadas anteriormente.

El almacenamiento de energía en forma de aire comprimido no es un concepto novedoso. De hecho, incluso existen centrales eléctricas que aprovechan esta tecnología para almacenar sus excedentes de producción y utilizarlos en las horas de máxima demanda [147]. Sin embargo, no ha sido hasta ahora cuando este concepto se ha implantado en el mundo de la automoción, de la mano de PSA Peugeot Citroën y su tecnología *Hybrid Air*, desarrollada conjuntamente con Bosch.

El prototipo desarrollado por PSA y Bosch combina un motor de gasolina, dos unidades de almacenamiento de aire comprimido (una de alta presión y otra de baja presión), un motor hidráulico y una transmisión automática, y promete mejoras en el consumo en ciclo combinado de hasta un 35%. La Figura 79 muestra la representación del tren de potencia de este prototipo.

Para ello, PSA plantea que entre un 60 y un 80% de los desplazamientos urbanos podrían realizarse utilizando simplemente el aire comprimido, aprovechando el potencial de la frenada

regenerativa, mientras que el motor de gasolina funcionaría a velocidades de crucero, aprovechando el mecanismo híbrido para suplir los picos de potencia.

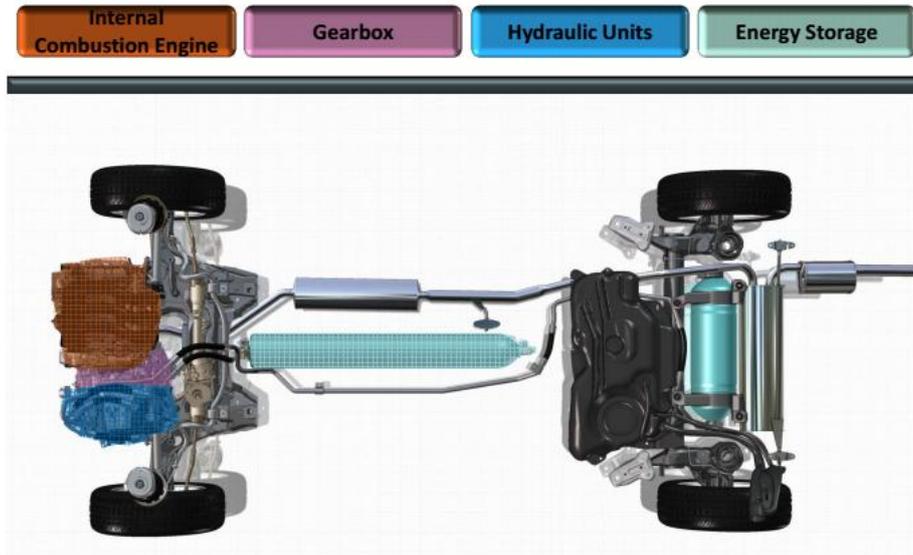


Figura 79 - Representación del tren de potencia híbrido de Bosch y PSA [148]

Resulta necesario destacar que realmente estos vehículos no utilizan el aire comprimido como fluido de trabajo, sino sólo como vector energético, que se encarga de transmitir la alta presión a un fluido oleohidráulico que mueve el motor. Este motor hidráulico tiene capacidad para funcionar de forma reversible, de modo que en las frenadas actúa como bomba, recuperando parte de la energía y devolviéndola al depósito en forma de presión. Un esquema de este sistema se muestra en la Figura 80.

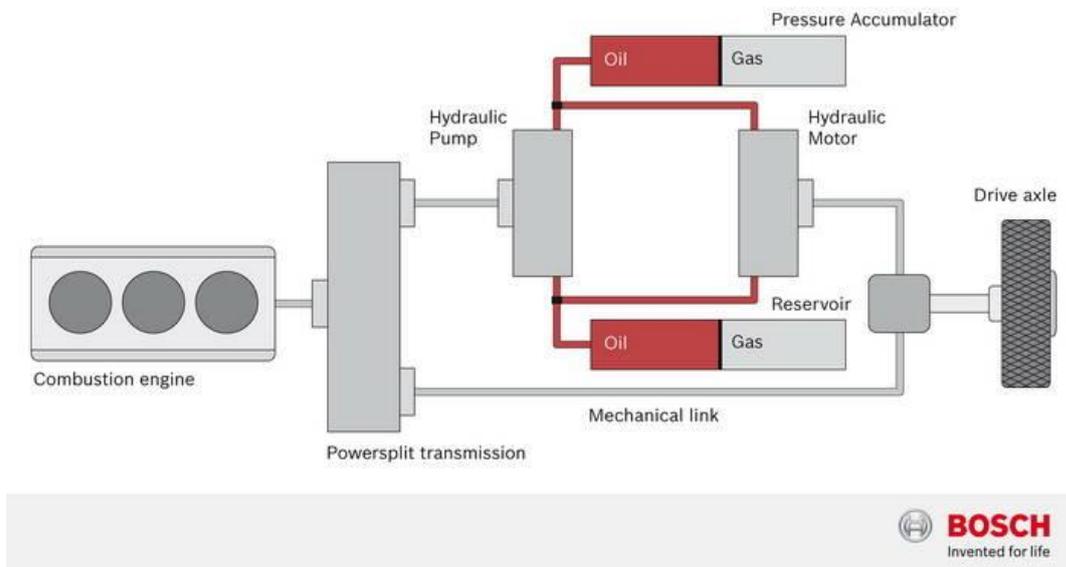


Figura 80 - Ilustración esquemática del conjunto motor térmico - motor hidráulico (Bosch)

Los sistemas híbridos con aire comprimido cuentan con algunas ventajas respecto a los HEV. En primer lugar, se trata de una tecnología asequible y robusta, que emplea unos elementos mecánicos más que probados, y materiales baratos. Además, su fiabilidad a largo

plazo no se ve comprometida por los diversos ciclos de carga y descarga. Su impacto ambiental también es mínimo, al hacer uso de aire como elemento de almacenamiento de la energía, y no requiere de tierras raras o metales preciosos para su funcionamiento.

La tecnología *Hybrid Air* se ha introducido a modo de prototipo funcional en sendos modelos del grupo PSA, el Citroën Cactus y el Peugeot 3008, y se espera su llegada al mercado en el año 2016. Según las previsiones de PSA, la introducción de un mecanismo híbrido de aire tan sólo encarecerá el precio en unos 1.500 € con respecto al coste de un vehículo con motor de gasolina convencional (un sobre coste similar al que suponen los motores Diésel). [148, 149]

6.7. Vehículos eléctricos con pila de combustible (FCEV)

Los vehículos eléctricos con pila de combustible (FCEV por sus siglas en inglés) son una de las promesas más longevas de la historia de la automoción, una tecnología que lleva casi dos décadas presentándose como “el futuro del automóvil”.

Del mismo modo que los BEV, los FCEV utilizan motores eléctricos como mecanismos de propulsión, aunque al contrario de lo que sucede con los primeros, en los FCEV la electricidad no se almacena en baterías convencionales, sino en forma de dos elementos químicos cuya puesta en contacto provoca una reacción *redox* controlada que genera corriente eléctrica.

En todos los casos, la corriente eléctrica generada por la pila de combustible es DC. Esta electricidad puede utilizarse para alimentar directamente el motor eléctrico, o almacenarse en un pack de baterías o de supercondensadores. La inclusión de estos elementos permite hacer uso de la frenada regenerativa, una tecnología que de otra forma no podría utilizarse en FCEV.

En los FCEV la recarga energética no se realiza conectándolos a la red eléctrica, sino reponiendo los compuestos químicos gastados durante el uso. Esto agiliza enormemente el tiempo de recarga, asemejándolo al repostaje de los vehículos tradicionales con MCI.

Aunque teóricamente una pila de combustible podría utilizar cualquier par de elementos que dieran lugar a una reacción *redox*, su uso en vehículos eléctricos está limitado a aquellas que utilizan hidrógeno como agente reductor y oxígeno como oxidante. En este tipo de pilas, el único producto de reacción que se libera a través del tubo de escape es vapor de agua. Así pues, los FCEV son vehículos libres de emisiones, cuya operación no da lugar a ningún tipo de contaminante, y que comparten casi todas las ventajas de los BEV al mismo tiempo que suponen una solución a sus problemas de recarga y autonomía.

Pero la pila de combustible no es ni mucho menos una tecnología libre de inconvenientes. El principal tiene que ver con el hidrógeno, que no es un combustible, sino sólo un vector energético que además no se encuentra libre en la naturaleza, lo que reduce enormemente la eficiencia de este tipo de vehículos. Además, tampoco existe una infraestructura de recarga que permita su expansión a gran escala. Esto es algo que se estudiará con más detenimiento en el punto 6.7.2.

6.7.1. Componentes de un FCEV

El tren de potencia de los FCEV se caracteriza por la incorporación de una serie de elementos característicos, entre los que destacan los siguientes [126]:

- Pila de combustible. Del mismo modo que sucedía con las baterías, se denomina así al componente que “apila” a todas las celdas electroquímicas de pequeño tamaño, que deben conectarse en serie entre sí para desarrollar el voltaje necesario, ya que cada una de estas celdas tiene una diferencia de potencial muy baja, de entorno a 0.7 V [150].
- Tanque de almacenamiento de hidrógeno a alta presión o tanque de combustible con reformador.
- Sistema de suministro de aire, encargado de hacer llegar el oxígeno del aire a la pila de combustible.
- Sistema de humidificación, que recupera parte del vapor de agua generado como producto de reacción para humidificar la pila y evitar que la membrana se seque.
- Circuito de refrigeración.
- Batería o ultracondensador para el almacenamiento de electricidad.
- Electrónica de control y potencia.

En la Figura 81 se muestra el tren de potencia del Audi Q5 Hybrid Fuel Cell, un prototipo de SUV con pila de combustible.

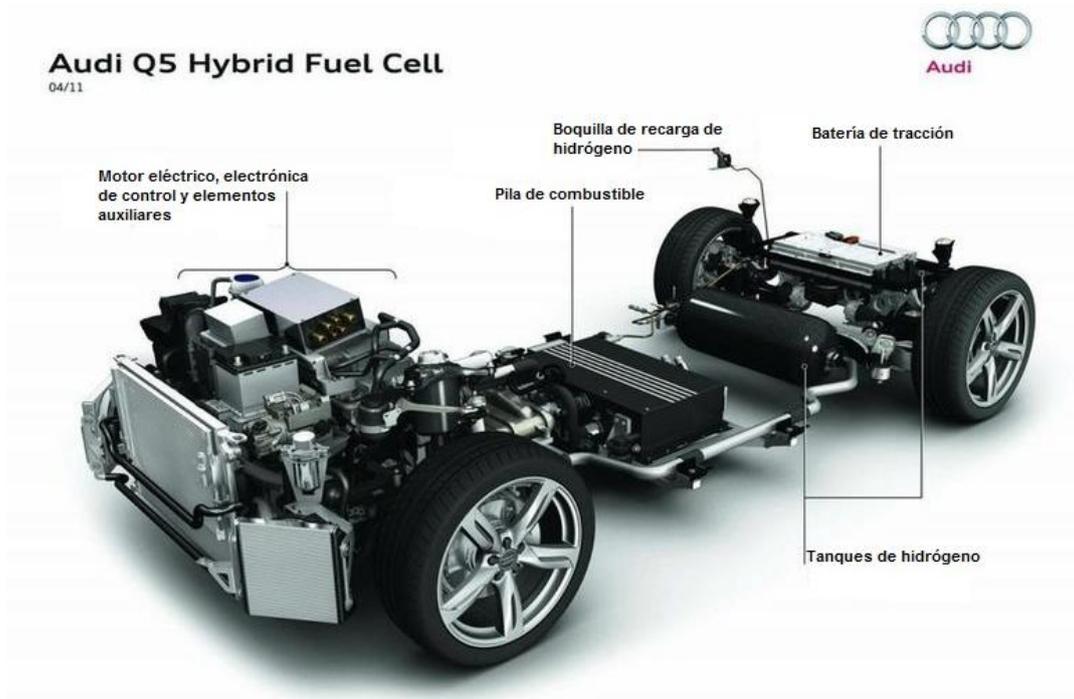


Figura 81 - Tren de potencia de un Audi Q5 Hybrid Fuel Cell (Audi)

De todos los elementos mencionados, el más importante es sin duda la pila de combustible, de la que existen diversos tipos, cada uno de ellos con distintas características, que varían tanto en peso y tamaño como en el combustible o la temperatura de operación,

aunque todos ellos tienen las mismas características constructivas, con dos electrodos y un electrolito entre ellos.

De todos los tipos de pilas de combustible conocidos, los más importantes para su uso en automoción son las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEMFC por sus siglas en inglés). [151, 152]

Una PEMFC tiene dos electrodos cubiertos por un catalizador, separados entre sí por un electrolito, generalmente una membrana polimérica denominada “membrana de intercambio de protones” o “membrana de intercambio de iones”.

En las pilas de combustible, el catalizador, que suele ser platino, es el encargado de iniciar la reacción, aunque este catalizador no forma parte de ella, y por lo tanto no se gasta. Los únicos productos que se consumen en este tipo de pilas de combustible son hidrógeno y oxígeno. Así, cuando el hidrógeno entra en contacto con el catalizador, se divide en protones y electrones. Dado que los electrones tienen afinidad por las cargas positivas, estos intentarán pasar hasta el cátodo, pero la membrana les impide hacerlo a través de la pila de combustible, por lo que lo hacen tomando el circuito externo.

Mientras tanto, en el cátodo, las moléculas de oxígeno se dividen en dos iones, que atraen a los protones del ánodo, a cuyo paso la membrana es permeable, y reaccionan formando vapor de agua. Una parte de esta agua se utiliza para humedecer la membrana, que necesita estar húmeda para funcionar, mientras que el resto se expulsa a la atmósfera. Una representación de este proceso puede verse en la Figura 82:

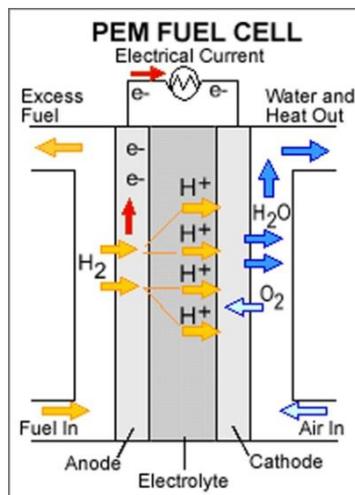


Figura 82 - Representación del funcionamiento de una pila de combustible [152]

Este tipo de pila de combustible cuenta con la ventaja de que la corriente eléctrica que produce es fácilmente ajustable a través del flujo de hidrógeno. Además, se trata de dispositivos compactos, con una eficiencia relativamente buena a temperaturas entre 30 y 100 °C (aunque inferior al 60 %). Sin embargo, son caras de fabricar, y el catalizador de platino también es muy caro. [153]

Otra desventaja se encuentra en la necesidad de mantener la membrana electrolítica húmeda, ya que el agua puede congelarse en invierno, o evaporarse con las altas

temperaturas, lo que las hace difíciles de arrancar. Además, la presencia de monóxido de carbono en el aire procedente del exterior empeora las capacidades de la célula, al afectar al rendimiento del catalizador. Esto se debe a que el CO tiene afinidad por el platino, y ocupa los huecos que en otro caso ocuparía el hidrógeno.

Este problema es muy grave, ya que concentraciones de CO de sólo 10 ppm tienen un efecto notable en el rendimiento de la pila de combustible. Para evitarlo, existen métodos como la inyección de oxígeno del aire al flujo de combustible, para reaccionar con el monóxido y formar CO₂, que dejaría libres los huecos del catalizador. [151]

En cualquier caso, no son estos problemas los que condicionan el bajo ritmo de desarrollo y adopción de la pila de combustible, sino aquellos relacionados con la producción y la distribución del hidrógeno, que hacen de este sistema un método energéticamente muy ineficiente, además de caro.

6.7.2. El hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico número 1 en la tabla periódica, el más ligero de la naturaleza. Su isótopo más común, el protio, está formado por un solo protón y un solo electrón, sin ningún neutrón, y es el elemento más abundante del universo: aproximadamente un 75% de la materia visible es hidrógeno. Con estas características, parece que el desarrollo de un dispositivo que funcione con hidrógeno pondría fin a todos los problemas energéticos de la humanidad. Sin embargo, la realidad no es tan sencilla.

El principal problema del hidrógeno reside en que no se encuentra libre en la naturaleza. En la Tierra, su forma más común es en combinación con oxígeno, es decir, el agua. Pero también los hidrocarburos tradicionales están formados en gran medida por hidrógeno, en este caso combinado principalmente con carbono.

Extraer el hidrógeno de los compuestos que lo contienen es una tarea compleja, que requiere una gran cantidad de energía. Generalmente el hidrógeno se extrae del agua, los hidrocarburos, el carbón y la biomasa, y las formas más comunes de hacerlo son el reformado por vapor de hidrocarburos, la electrólisis del agua, la gasificación del carbón o la biomasa y oxidación parcial de combustibles. De estos cuatro procesos, los dos primeros son los más importantes.

6.7.2.1. Reformado con vapor

El reformado con vapor es el método industrial más utilizado en la actualidad (hasta un 95 % del hidrógeno se produce así), y en él se emplea vapor a altas temperaturas para extraer el hidrógeno de hidrocarburos como el gas natural o el metano. Se trata de un método relativamente eficiente en términos energéticos (65-75%), pero su dependencia de combustibles fósiles resulta problemática cuando se plantea como alternativa de futuro. Además, en el proceso se generan gases contaminantes.

Aunque el hidrógeno obtenido mediante reformado aliviaría los problemas medioambientales en las ciudades, se trata sólo de una solución parcial, ya que sólo se trasladarían físicamente los efectos negativos de las emisiones.

6.7.2.2. Electrólisis

La electrólisis es el método ideal para la producción de hidrógeno destinado a la operación de FCEV, ya que es un proceso limpio que sólo requiere de agua y electricidad. Este método consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través del agua, que se disocia en sus dos componentes, hidrógeno y oxígeno.

Pese a su sencillez, esta tecnología tiene un alto coste en comparación con la anterior. Además, se trata de un proceso energéticamente muy ineficiente. Y más allá de esto, puede resultar muy contaminante en función del mix de generación de la electricidad utilizada. No obstante, resulta interesante su capacidad para equilibrar las curvas de carga de la red eléctrica, de una forma similar a la descrita en el punto 6.5.4.2.

Como ejemplo de este alto coste se plantea la estación comercial HFuel, una de las más avanzadas del mercado, desarrollada por la empresa ITM Power, que requiere de 55 kWh de electricidad para producir un solo kilogramo de hidrógeno comprimido a 350 bares de presión, a los que habría que añadir el sobrecoste que supone aumentar dicha presión hasta los aproximadamente 700 bares que soporta el depósito de un vehículo como el Hyundai ix35 FCEV. Esto supone que, comparado con un BEV equivalente, el coste de operación de un FCEV es muy superior tanto en términos económicos como en términos energéticos, tal y como puede comprobarse en el siguiente punto.

6.7.2.3. Comparativa

Como se ha indicado anteriormente, existen otros dos métodos comerciales para la obtención de hidrógeno además de los ya descritos: la gasificación de carbón o biomasa y la oxidación parcial de carburantes. Ambos métodos consisten en la combustión incompleta de distintos compuestos, por lo que generan grandes emisiones de CO₂. No obstante, su importancia a nivel comercial es muy inferior a la de la electrólisis o el reformado con vapor, sobre todo a nivel de FCEVs, ya que el hidrógeno que generan contiene una gran cantidad de impurezas. A continuación se establece un cuadro comparativo (Tabla 9) con las ventajas y los inconvenientes asociados a estas tecnologías [154].

Método	Ventajas	Inconvenientes
Electrólisis	Bajas emisiones de CO ₂ (incluso nulas si se utilizan renovables). El hidrógeno obtenido es de gran pureza. Tecnología probada.	Alto coste energético.
Gasificación	Materias primas abundantes y de bajo coste.	Grandes emisiones de CO ₂ y baja eficiencia energética. Requiere de una gran infraestructura.
Oxidación parcial	Tecnología muy avanzada.	Genera mucho CO ₂ , y requiere de elevados costes de inversión y grandes infraestructuras.
Reformado con vapor	Método muy eficiente, muy desarrollado a gran escala. Produce hidrógeno a bajo coste.	Las emisiones de CO ₂ dependen de la materia prima. Requiere de una gran infraestructura.

Tabla 9 - Comparación entre las distintas tecnologías de producción de Hidrógeno

6.7.3. Coste de operación: FCEV vs. BEV

Comparar el coste energético y económico que supone circular con un FCEV y un BEV es un ejercicio sencillo que permite entender uno de los motivos por los que esta tecnología no ha despegado aún. Para ello se utilizará como ejemplo el Honda FCX Clarity, el primer automóvil con pila de combustible homologado para circular por carretera en EE.UU. y Japón. Se trata de un vehículo del segmento C con un motor de 136 CV y una velocidad punta de 160 km/h, que posee un depósito de 171 litros y 350 bares de presión máxima que le confiere capacidad para llevar aproximadamente 4 kg de hidrógeno, y una autonomía de 460 kilómetros.

En el caso de que el hidrógeno se produzca mediante reformado de hidrocarburos, puede suponerse un consumo energético de 37 kWh por cada kg de H₂ extraído [155, 156], por lo que el coste de circular a lo largo de 100 km sería de 32 kWh. Si este hidrógeno se produce mediante electrólisis, tomando de nuevo los datos proporcionados por ITM Power, se tiene que se necesitan 242 kWh de electricidad para llenar el depósito, con lo que el consumo equivalente sería de unos 53 kWh por cada 100 kilómetros recorridos. Volviendo al Nissan Leaf analizado en el punto 6.5.1.4., este coste era de tan sólo 12 kWh por cada 100 kilómetros, es decir, menos de la mitad que en el caso del reformado, y apenas un 23 % que en caso del proceso electrolítico.

En términos económicos el hidrógeno tampoco tiene ninguna ventaja, al menos en la actualidad. Un kilo de hidrógeno en España tiene un coste de aproximadamente 10 €, con lo que llenar el depósito del FCX Clarity supondría un desembolso de nada menos que 40 €. En Alemania, donde el precio del kilo de hidrógeno ronda los 8€, el coste sería de 32€.

No obstante, el Departamento de Energía de EE.UU. calcula que el precio del hidrógeno producido por electrólisis para su uso en automoción podría reducirse hasta los 3 – 6 \$/kg en el futuro, lo que situaría el coste de operación entre los 2.6 y los 5.21\$ por cada 100 km [160] (entre 2 y 4€ al cambio actual, impuestos no incluidos).

Recuperando la Tabla 7, la comparación con el Nissan Leaf y el Audi A3 quedaría tal y como muestra la Tabla 10.

	Versión	Coste 100 km [€]	Coste medio anual (9.500 km) [€]	Variación (Gasolina = 100%)
Audi A3	1.2 TFSI (Gasolina)	7,02	666,90	100%
	1.6 TDI (Diésel)	4,36	414,20	62%
Nissan Leaf	TUR S/D	2,04	193,80	29%
	TUR C/D Hora pico	2,50	237,50	36%
	TUR C/D Hora valle	0,87	82,65	12%
FCX Clarity	España ahora	8,70	826	124%
	Alemania ahora	7	660	99%
FCX Clarity	Futuro	2 – 4	190 – 380	29 % - 57%

Tabla 10 - Comparación entre el coste de operación de vehículos de gasolina, diésel, BEV y FCEV

En esta tabla se observa que, pese a todo, el coste de operación es inferior para el Nissan Leaf que para el FCX Clarity en casi todos los casos, incluso de cara al futuro, cuando los precios del hidrógeno se reduzcan respecto a la situación actual.

Llegado este punto, resulta interesante comparar también otro factor determinante: el coste de adquisición. Así, mientras el Nissan Leaf tiene un precio que parte de los 17.500 € en España (impuestos incluidos), Honda prevé lanzar la versión comercial del FCX Clarity con un precio de salida de más de 40.000 € [159].

Aparte del FCX Clarity, sólo se han dado a conocer dos vehículos de hidrógeno más lo suficientemente maduros como para salir al mercado: el Hyundai ix35 FCEV y el Toyota FCV. El precio del primero partirá de los 125.000 € [158], mientras que el del segundo costará previsiblemente más de 70.000 € [159]. Si bien es cierto que estos precios están justificados por tratarse de una tecnología emergente para la que no existen economías de escala, la realidad es que estos vehículos no pueden competir con los BEV en ningún aspecto más allá de la autonomía y el tiempo de recarga energética, al menos de momento. Y este es también un punto conflictivo, puesto que la ausencia de una infraestructura de repostaje en casi cualquier país hace muy difícil encontrar *hidrogeneras* donde repostar combustible.

6.7.4. Infraestructura de repostaje

Es probable que la ausencia de una infraestructura de repostaje sea el problema más grave al que se enfrenta el vehículo con pila de combustible, al menos a medio plazo. Además se trata de un problema circular: mientras no existan FCEV a los que vender el hidrógeno, la inversión en hidrogeneras es un gasto al que pocos están dispuestos a hacer frente. Y pocos usuarios aceptarán comprar vehículos de hidrógeno si no tienen una red de distribución disponible donde repostar combustible.

En la actualidad existen poco más de 200 estaciones de servicio en las que pueda repostarse hidrógeno en el mundo [164], algo que no resulta extraño si se tiene en cuenta que su coste de puesta en marcha parte de los 500.000€ y puede llegar a los 5 millones [161], en función de la capacidad y el número de surtidores. Además, su mantenimiento es caro, puesto que se trata de equipos muy especializados sometidos a altas presiones. En comparación con esto, el coste de instalación de un poste de recarga rápida para BEVs se encuentra por debajo de los 10.000 € [162], y su mantenimiento es muy inferior.

Ante la falta de iniciativa privada, algunos gobiernos han dispuesto medidas para aumentar el número de estaciones de servicio con dispensadores de hidrógeno. Tal es el caso del estado de California, en EE.UU., que ha otorgado ayudas por valor de 46 millones de dólares para desplegar una red de 28 hidrogeneras y el compromiso de destinar 20 millones de dólares anuales a este propósito durante los próximos 7 años.

No obstante cabe preguntarse si una inversión pública de estas características está justificada en la actualidad, cuando no existe ningún FCEV comercial que pueda aprovecharse

de ella, y los que previsiblemente se ofrecerán en el futuro no contarán con ventajas reales frente a los BEVs.

6.8. Conclusiones

A la vista de todos los datos presentados a lo largo de este capítulo, parece indiscutible que, en la situación actual, el BEV es la mejor alternativa existente para sustituir a los vehículos tradicionales con MCI en entornos urbanos. Limpios, silenciosos, baratos de operar y con un estado madurez de las baterías lo suficientemente avanzado como para que puedan satisfacer los requerimientos diarios de una gran proporción de los conductores, estos vehículos deberían convertirse en el principal medio de transporte privado en el interior de las ciudades a medio y largo plazo.

Sin embargo, el problema de la autonomía se presenta cuando el BEV es el único vehículo del hogar, y este tiene que hacer frente no sólo a recorridos urbanos, sino también a trayectos interurbanos. Un factor que, junto con la falta de pruebas que certifiquen la fiabilidad de las baterías a largo plazo, y la ausencia de una infraestructura de recarga lo suficientemente madura, está lastrando su ritmo de adopción.

En la actualidad, los vehículos híbridos (y más específicamente híbridos en paralelo) son los que gozan de una mayor popularidad y de un estado de desarrollo más avanzado, así como de mejor salud comercial. Pese a todo, en Europa sus ventas no dejan de resultar anecdóticas: en el año 2012 apenas supusieron el 1% de los vehículos registrados, frente al 5% que supusieron en EE.UU., o el 20% de cuota de mercado que obtuvieron en Japón. Para este mismo periodo, los BEV apenas sumaron el 0.2% de los vehículos vendidos en Europa, un 0.5% de los registrados en EE.UU., y un porcentaje similar en el mercado nipón. [48]

Frente a esto, los vehículos eléctricos con pila de combustible, a pesar de haber sido durante décadas la esperanza de la industria automovilística, no parecen ofrecer ventajas reales sobre el resto de tecnologías, al menos en la situación actual. Este tipo de vehículos sigue por tanto planteándose como una opción de futuro a muy largo plazo, a la que aún le queda un enorme camino por recorrer, y su despliegue real sólo llegará eventualmente si el desarrollo futuro de las baterías no consigue satisfacer los requisitos de autonomía y tiempo de recarga exigidos por el mercado, o si se produce algún descubrimiento rompedor que permita obtener hidrógeno puro con un bajo coste energético.

7. Sistemas de transporte inteligente, redes de comunicación vehicular y conducción autónoma

Los sistemas de transporte inteligente (ITS por sus siglas en inglés) hacen referencia a un conjunto de soluciones tecnológicas que, a través de la informática y las telecomunicaciones, permiten coordinar y optimizar tanto la operación como la seguridad del transporte terrestre.

Los ITS se sirven de redes de comunicación vehicular, que son redes telemáticas en las que los vehículos y los elementos de tierra (semáforos, señales de tráfico...) actúan como nodos de emisión y recepción de datos, enviando avisos, advertencias de seguridad e información del tráfico, que posteriormente son procesados por todos los elementos afectados para terminar ofreciendo una respuesta óptima a un problema. Esta respuesta puede ser desde un aviso en el panel de instrumentos del vehículo, hasta la frenada autónoma del mismo ante la previsión de una colisión, o el cambio de estado de un semáforo en la carretera. [165]

En la actualidad, existe una importante tendencia en el sector automotriz hacia el desarrollo de vehículos inteligentes, capaces de comunicarse tanto entre ellos como con el entorno que les rodea. Esta capacidad de comunicación es una de las características que sin duda marcarán el futuro del transporte privado, ya que encierra una gran cantidad de soluciones de bajo coste a problemas tan diversos como la seguridad, los atascos o la economía energética.

Generalmente se distinguen dos sistemas de comunicación vehicular: entre vehículos (también denominados V2V por sus siglas en inglés), y entre el vehículo y la infraestructura (V2I). No obstante, se trata de sistemas con características técnicas similares, que no precisan de una distinción real. Ambos son el primer paso para el despliegue de una red de automóviles inteligentes totalmente autónomos, que en el futuro permitirán circular sin ningún tipo de asistencia por parte de los ocupantes del vehículo.

7.1. Comunicación V2V y V2I

Muchos de los vehículos fabricados actualmente están equipados con una gran cantidad de sensores, cámaras y radares capaces de alertar al conductor en situaciones de peligro siempre que estos se encuentren dentro del rango de acción de dichos dispositivos, que generalmente se limita al espacio visual. Frente a esto, los sistemas V2V suponen un avance, al carecer de limitaciones físicas más allá del alcance de sus emisores y receptores de radiofrecuencia, superior a los 300 metros (unos diez segundos a velocidad de crucero en autovía) [166]. Las esquinas, muros y puntos muertos no restan efectividad a los sistemas V2V, mientras que limitan todas o casi todas las capacidades de las tecnologías preexistentes. Además, los sistemas V2V aprovechan no sólo la información generada por el propio vehículo, sino también la de aquellos vehículos con los que se comunican.

Las tecnologías V2V utilizan ondas de radio para transmitir mensajes como la velocidad del automóvil, su posición o el estado de los frenos, que el resto de vehículos procesan para informar con antelación a los conductores acerca de las posibles amenazas que puedan encontrarse durante la marcha. Combinados con la comunicación con infraestructuras, el resultado es un enorme aumento de la eficiencia en la conducción y la seguridad.

En la Figura 83 se muestra un esquema con los principales componentes que integran los sistemas V2V.

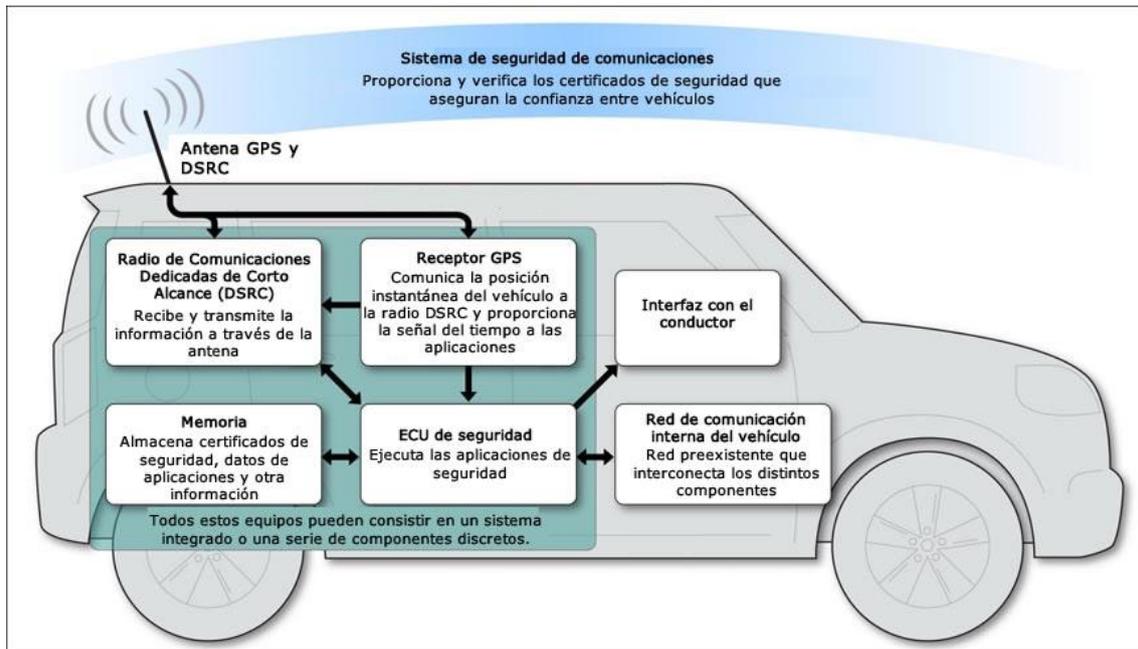


Figura 83 - Principales componentes de los sistemas V2V. (Traducido de [167]).

7.1.1. Impactos en la seguridad

La capacidad de conocer aspectos como la velocidad o la dirección de los vehículos que se encuentran alrededor permite al automóvil calcular las probabilidades de que se produzca un accidente y alertar al conductor con el tiempo suficiente para que reaccione de forma positiva a este posible evento.

La incorporación de sistemas de comunicación V2V y V2I en todo el parque automovilístico podría reducir hasta en un 81 % el número de accidentes de tráfico producidos tanto en entornos urbanos como en entornos interurbanos, según cálculos del Departamento de Transporte de EE.UU. (DOT). En Europa, donde más de 26.000 personas perdieron la vida en las carreteras en el año 2013, esto supondría la salvación de más de 21.000 cada año.

En la Figura 84 se muestran algunos posibles escenarios de peligro en los que los sistemas V2V podrían resultar especialmente beneficiosos.

Escenarios y tipos de advertencia	
<p>Escenarios de colisión trasera</p> <p>Advertencia de colisión hacia adelante Al aproximarse a un vehículo que está frenando o detenido.</p>	
<p>Advertencia de frenada de emergencia Al aproximarse a un vehículo que se encuentra parado en la carretera pero que no se encuentra visible.</p>	
<p>Escenarios de cambio de carril</p> <p>Advertencia de ángulos muertos Al abandonar el carril e iniciar una trayectoria que puede suponer la colisión con otro vehículo que circula en la misma dirección pero que no ha sido visto por el conductor.</p>	
<p>Advertencia para no abandonar el carril Cuando el vehículo detecta un cambio de carril y la vía que va a invadirse se encuentra ocupada por un vehículo que circula en dirección contraria, fuera del espacio visual del conductor.</p>	
<p>Escenarios de cruces con baja visibilidad</p> <p>Advertencia en cruces con baja visibilidad Al aproximarse a un cruce con baja o nula visibilidad que puede suponer la colisión con un vehículo que circula por una de las vías intersecadas.</p>	

Figura 84 - Posibles escenarios de colisión evitables gracias a los sistemas V2V. (Traducido de [167]).

7.1.2. Impactos en el medio ambiente

Los sistemas V2V y V2I tienen la potencial capacidad de mejorar el impacto medioambiental de los vehículos a través de tres medios principalmente: la disminución de las pérdidas aerodinámicas a través del *platooning*, la suavización del tráfico y la optimización de las intersecciones.

7.1.2.1. Platooning

El *platooning*, también denominado “tren de carretera”, se refiere a la circulación de varios vehículos a un ritmo constante guardando una distancia de seguridad mínima, lo que permite reducir las pérdidas aerodinámicas y aumentar la capacidad de tráfico de la vía, afectando también de forma positiva a la congestión de la misma. [168]

En un tren de carretera el vehículo que se encuentra a la cabeza es el que marca el ritmo y lo comunica al resto de automóviles, que lo siguen imitando sus movimientos a una distancia mínima, sin necesidad de que el conductor actúe. Esta mínima distancia de seguridad es posible gracias a que los sistemas V2V eliminan el tiempo de reacción que un humano necesita para actuar sobre los frenos en caso de emergencia.

En el *platooning* el ahorro energético se produce gracias a que todos los vehículos que componen el tren de carretera van “a rebufo” del que les precede, esto es: el primer vehículo genera un túnel de succión aerodinámico que el resto aprovechan para reducir sus pérdidas. En la Figura 85 se muestra una ilustración del funcionamiento de un tren de carretera.

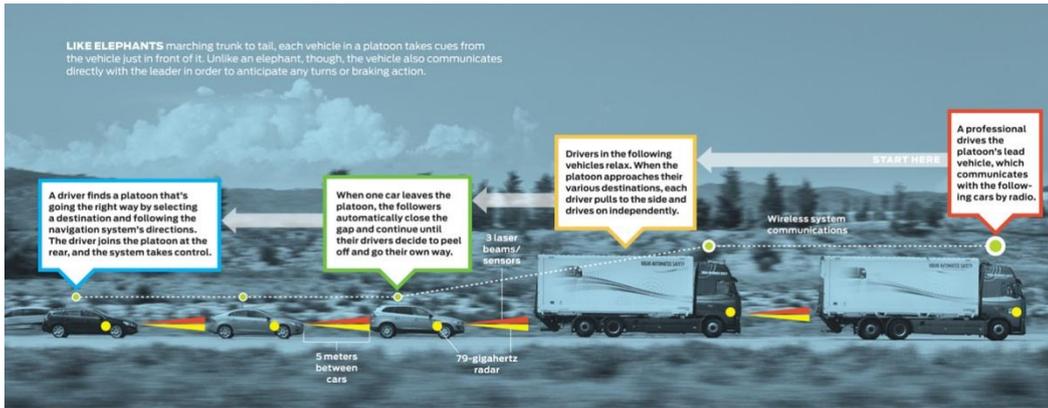


Figura 85 - Ilustración de un tren de carretera [168]

Como investigación destacada en este ámbito cabe mencionar el proyecto SARTRE (Safe Road Trains for the Environment), desarrollado entre los años 2009 y 2012 con fondos de la Comisión Europea con el objetivo de evaluar las capacidades de los trenes de carretera con un solo conductor.

Un importante aspecto del proyecto SARTRE se encuentra en que la adaptación de los vehículos se realizó utilizando cámaras, radares y láseres procedentes de tecnologías ya disponibles a nivel comercial, como el control de crucero adaptativo, la ayuda al seguimiento del carril o el *park assist*. También se incluyó una interfaz humano-máquina para mejorar el control, así como un sistema de comunicación V2V que permitía a los vehículos transmitir la información a lo largo del tren, ambos desarrollados ex profeso.

Estos trenes de carretera estaban formados por hasta 8 vehículos circulando a velocidades máximas de 90 km/h y distancias de seguridad de apenas 4 metros, y las pruebas se realizaron tanto en circuito cerrado como en carreteras abiertas. Los resultados del estudio han arrojado un potencial de mejora energética de entre un 10 y un 20 %. [169]

Es importante destacar que el *platooning* sólo tiene sentido cuando se trata de trayectos largos por autovía, puesto que por razones obvias a nivel urbano la circulación en tren no es eficaz.

7.1.2.2. Suavización del tráfico

Gracias a los sistemas V2V, todos los vehículos que circulan por una determinada vía dispondrían de los datos de conducción del resto en tiempo real, lo que les permitiría anticiparse a los momentos de aceleración y frenada bruscos, suavizando el estilo de conducción. Como consecuencia de esto podría conseguirse un impacto positivo en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes asociadas, con reducciones de hasta el 13 %. [170]

Además, la comunicación V2V puede reducir los atascos gracias a que permite el avance coordinado de todos los vehículos involucrados de una forma similar al *platooning*, lo que elimina los tiempos de reacción y asegura un tráfico fluido y óptimo. De esta forma no solo se reduce el tiempo empleado para un determinado recorrido, sino que se optimiza la conducción gracias a la eliminación de los sucesivos ciclos de aceleración y frenado típicos de

los atascos. También se amplía la capacidad de la carretera, al poder reducirse la distancia de seguridad entre vehículos.

En este sentido, es muy importante destacar que el consumo de combustible aumenta alrededor de un 30% en los atascos, y que estos cuestan al año 100.000 millones de euros en Europa, el equivalente al 1% del PIB de la Unión. [171]

7.1.2.3. Optimización de las intersecciones y peajes

En las intersecciones y los peajes se encuentran otras dos posibles fuentes de reducción del consumo de combustible que podrían ser fácilmente atajables gracias a la incorporación de tecnologías V2I. Estos puntos, que generalmente implican la necesidad de frenar y acelerar y que suelen ser el origen de algunos atascos, pueden optimizarse con relativa sencillez gracias a la implantación de sistemas de telepeaje y semáforos inteligentes.

Las estaciones de telepeaje evitan la necesidad de parar para pagar, lo que mejora el flujo del tráfico y aumenta la capacidad de la vía. Por su parte, los semáforos inteligentes reducen los tiempos de espera y ajustan las prioridades según las características del tráfico, lo que puede conducir a una reducción del 17 % en el número de paradas y hasta un 19 % menos de consumo de combustible en los tramos afectados. [172]

7.2. Vehículos autónomos

Los sistemas V2V y V2I son sólo el primer paso en lo que a automatización de la conducción se refiere. El coche totalmente autónomo, capaz de conducirse en cualquier situación sin la intervención humana, ya es una realidad a nivel conceptual, tal y como se ha demostrado en diversas ocasiones, siendo su principal exponente el vehículo desarrollado por la empresa norteamericana Google.

Los vehículos autónomos no sólo incorporan tecnologías de comunicación con el resto de los automóviles y el entorno, sino también una serie de sensores y cámaras que les permiten “observar” e identificar todo aquello que se encuentra a su paso para ofrecer una respuesta óptima a cualquier evento. Muchos de los elementos empleados por los vehículos autónomos ya tienen carácter comercial y se incluyen en algunos automóviles de alta gama. Los sistemas de seguimiento de carril, detección de obstáculos o frenada automática de emergencia son sólo algunos ejemplos.

No obstante, el vehículo autónomo es mucho más que la suma de todas estas herramientas por separado. En este sentido, es importante destacar que el vehículo autónomo debe ser capaz de desarrollar todas sus capacidades en cualquier entorno, lo que supone una gran dificultad en determinadas condiciones atmosféricas, como niebla densa o lluvia extrema. El automóvil no sólo debe ser capaz de ver e interpretar la información (incluidas las señales de tráfico) en un día soleado, sino también por la noche o en condiciones de baja visibilidad.

A nivel comercial, el germen del vehículo autónomo se encuentran en los Sistemas Avanzados de Ayuda a la Conducción (ADAS por sus siglas en inglés, *Advanced Driver Assistance Systems*), una serie de tecnologías multimodales que reciben la información a través de un conjunto de sensores que incluyen ultrasonidos, radares, LIDAR y cámaras (tanto

a color como monocromas, estéreo, infrarrojas y de visión nocturna). Las señales de radio y satélite son también una fuente de información para los sistemas ADAS, que las utilizan para determinar su geolocalización y su posición entre el resto de vehículos e infraestructuras.

En la Figura 86 se muestra un esquema con el conjunto de señales típicas que envuelven a un vehículo autónomo en circulación.

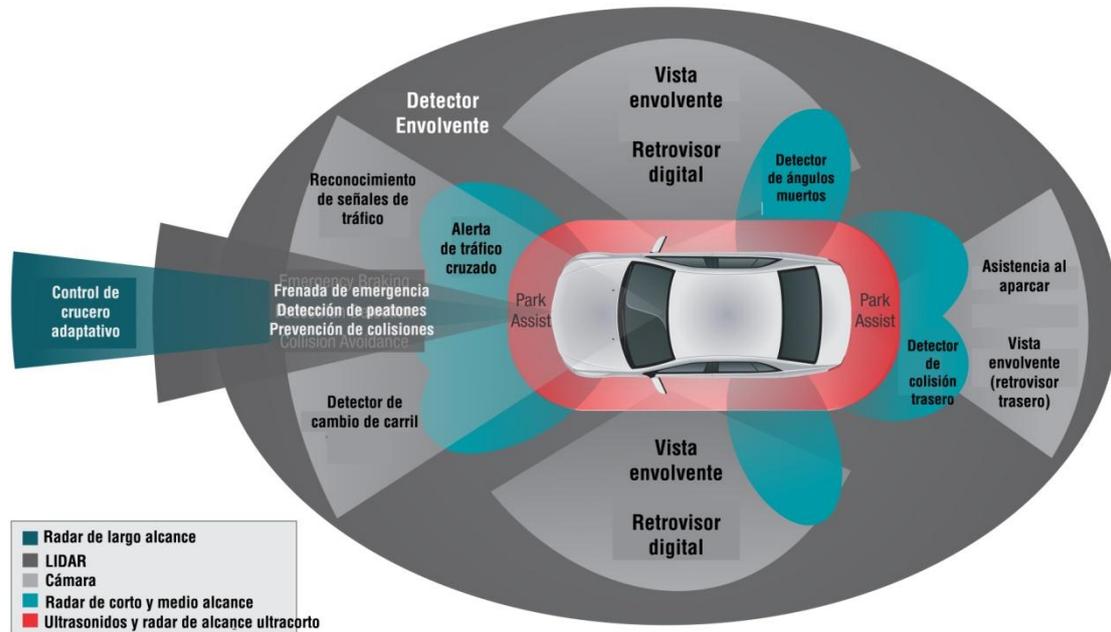


Figura 86 - Principales señales de las que se sirve un vehículo autónomo para circular. Traducido de [173].

De todos los elementos que forman el ADAS, el más importante es sin duda el LiDAR (acrónimo de Light Detection and Ranging), una tecnología que utiliza emisiones láser para determinar la distancia entre el vehículo y todos los elementos que se encuentran a su paso. El LiDAR es un sistema multidireccional enormemente complejo, que permite obtener una nube de puntos en tiempo real, generando un mapa digital del espacio. En el caso del sistema empleado por Google, desarrollado por la empresa Velodyne, incorpora 64 haces láser que rotan 360 grados a velocidades angulares de hasta 900 rpm, dando lugar a mapas 3D como el que se muestran en la Figura 87. Su alcance es de 120 metros para los objetos, y de 50 metros para el pavimento, y puede detectar hasta 1.3 millones de puntos por segundo. [174, 175]

Este sistema es también el más caro de cuantos incorpora el vehículo desarrollado por Google. Su precio ronda los 70.000 dólares, frente a los 150.000 dólares que suman el conjunto de los equipos añadidos al automóvil. En todos los vehículos desarrollados hasta la fecha, el LiDAR se sitúa como un apéndice sobre el techo del vehículo, lo que compromete la aerodinámica y la seguridad del equipo. [176]

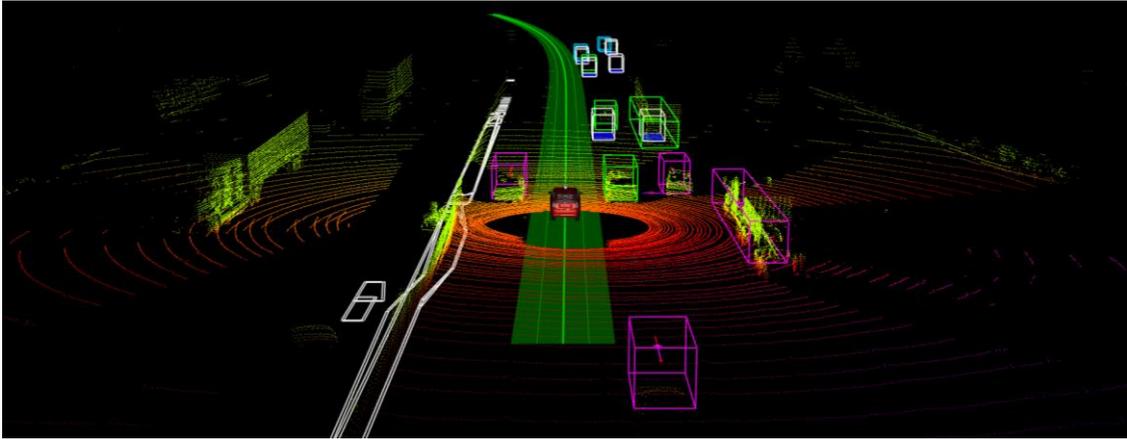


Figura 87 - Recreación del mapa generado por un sistema LiDAR (Google)

7.2.1. Niveles de autonomía en la conducción

La National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), el organismo encargado de la regulación del transporte en EE.UU., ha fijado cinco niveles de automatización de los vehículos que se han estandarizado a lo largo del mundo. Estos cinco niveles se corresponden con las siguientes descripciones [177]:

- **Nivel 0 – vehículo no autónomo.** El conductor es el único responsable del control del automóvil en todas las condiciones. Se consideran también vehículos de nivel 0 aquellos que cuentan con herramientas de ayuda a la conducción, pero que no tienen control real sobre la misma.
- **Nivel 1 – automatización de funciones específicas.** A este nivel, la automatización incluye una o varias funciones específicas que operan de forma independiente. El conductor tiene el control del vehículo, aunque puede elegir ceder una parte de la autonomía a los mecanismos de control primario (como en el control de crucero adaptativo), y el vehículo puede asumir automáticamente parte de la autoridad (como en el control de estabilidad).
- **Nivel 2 – automatización de funciones combinadas.** Se incluyen en este nivel aquellos vehículos con dos o más funciones primarias diseñadas para funcionar conjuntamente en sustitución del conductor, aunque este sigue teniendo la responsabilidad sobre la seguridad del vehículo. Por ejemplo, un automóvil de nivel 2 podría incorporar un sistema de control de crucero adaptativo combinado con otro de seguimiento de carril. La principal diferencia con respecto al nivel 1 estriba en que, en este tipo de vehículos, se incorpora un sistema de conducción automática que permite al conductor liberarse físicamente del volante y los pedales al mismo tiempo.
- **Nivel 3 – automatización de la conducción limitada.** Los vehículos con este nivel de automatización poseen funciones que permiten al conductor ceder el control total del vehículo bajo ciertas situaciones de tráfico o climáticas. No obstante, el conductor debe permanecer pendiente para actuar en caso de emergencia, aunque no requiere el mismo nivel de atención que en el caso de los automóviles de Nivel 2.

- **Nivel 4 – automatización de la conducción total.** El vehículo está diseñado para la conducción autónoma en todo momento, y no depende del usuario para nada más que la introducción de los datos de la ruta. Generalmente el “conductor” no tiene ninguna capacidad sobre el manejo del vehículo, aunque el vehículo puede poseer o no los controles para ello. Si no poseen dichos controles, pueden considerarse de Nivel 5. Estos son los verdaderos “vehículos autónomos”.

7.2.2. Principales ventajas de los vehículos autónomos

Las ventajas asociadas a la adopción masiva de vehículos autónomos son evidentes, puesto que aglutinan todas las mencionadas anteriormente en materia de reducción de accidentes y contaminación ambiental, al mismo tiempo que las magnifican. La introducción del vehículo totalmente autónomo eliminaría el error humano de las causas de accidentes, y este tipo de errores son la causa de más del 90% de los mismos [183]. Además, en vehículos de Nivel 5 se produciría una sustancial reducción del peso, al eliminarse todo el control analógico. Y tampoco serían necesarias buena parte de las medidas de seguridad pasivas instaladas actualmente, con un gran impacto en la masa de los automóviles.

Más allá de esto, el vehículo podría realizar una gestión completa del modo de conducción, elegir la ruta más adecuada en tiempo real, y optimizar el viaje en función de las necesidades del usuario: máxima velocidad, mínimo consumo, menor tiempo de ruta...

A esto hay que sumarle una serie de ventajas de carácter social. Por ejemplo, la automatización total de la conducción (Nivel 4) permitiría a las personas con discapacidad moverse libremente sin depender de nadie. Lo mismo sucedería con los ancianos y niños. Pese a que pueda parecerlo, esto no es una utopía: Google ya ha experimentado su tecnología con personas ciegas, tal y como muestra la Figura 88:



Figura 88 - Una persona ciega conduce el vehículo autónomo desarrollado por Google

Además, los vehículos autónomos mejorarían la calidad de vida de todos los ciudadanos al poder aprovecharse el tiempo de los trayectos para realizar otras actividades. En este sentido resulta importante resaltar que los trayectos en coche ocupan una media de 360 horas al año a cada persona, esto es, más de 15 días completos.

Más allá de esto, a largo plazo la flota de automóviles sin conductor podría convertirse en un servicio global de vehículos compartidos, que podrían moverse libremente a lo largo y ancho de las ciudades, con un servicio puerta a puerta que se asemejaría al que ofrece un vehículo en posesión, pero sin la necesidad de tenerlo en propiedad. Este concepto se denomina Vehículo Autónomo Compartido (SAV por sus siglas en inglés), y en él se encuentra sin duda el mayor potencial de optimización del automóvil en entornos urbanos.

Según un estudio de la U.S. National Household Travel Survey, en EE.UU. menos de un 17% de los vehículos menores de 10 años se encuentran en marcha al mismo tiempo en cualquier momento de un día típico (lo que incluye las horas punta). Y esto, aplicando un colchón de cinco minutos al inicio y al final de cada trayecto. Si se amplía el dato a vehículos más viejos y se elimina dicho colchón, la cifra se reduce hasta el 10 %. Extrapolando este dato al resto del mundo, esto significa que tan sólo haría falta un 10 % del parque automotriz actual para satisfacer todas las necesidades de transporte personal privado en cualquier lugar. [179]

Las ventajas de una flota de vehículos autónomos de estas características son evidentes. Más allá de la reducción del número total de vehículos y del impacto medioambiental de su fabricación, los SAV terminarían con problemas tan importantes como la falta de aparcamiento en las grandes ciudades –que a fin de cuentas no es sino un sumidero energético y una fuente extra de emisiones-. Además, el uso intensivo de los SAV implicaría un ritmo de modernización del parque automotriz mucho más elevado, con las ventajas energéticas y de seguridad que ello conlleva, al aumentarse el ritmo de incorporación de nuevas soluciones técnicas al conjunto de los automóviles.

7.2.3. Previsiones de introducción en el mercado

A pesar de que el vehículo autónomo puede parecer una tecnología cuya implantación sólo llegará a muy largo plazo, existen estudios que sitúan su comercialización masiva en torno al año 2035. Algunos fabricantes ya han anunciado lanzamientos de vehículos con capacidades de Nivel 3 para el año 2016, y el vehículo de Nivel 4 con un mayor grado de desarrollo, el de Google, podría llegar al mercado partir de 2017. [180]

En cuanto al coste, se espera un sobrepeso respecto al resto de vehículos de entre 7.000\$ y 10.000\$ en el año 2025, que se reducirían hasta los 5.500\$ en el año 2030, gracias a la incorporación de los vehículos autónomos de Nivel 5. Esta reducción sería posible a través de la eliminación de los controles de conducción analógicos.

La Figura 89 muestra la previsión de ventas realizada por la consultora especializada IHS para todo el mundo.

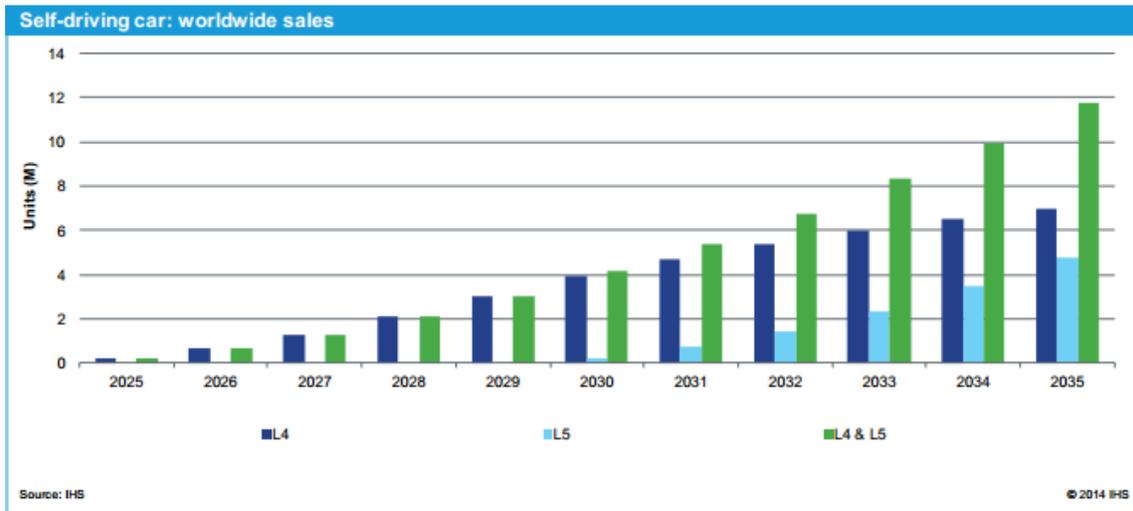


Figura 89 - Previsión de ventas de vehículos autónomos [180]

7.2.4. Problemas de los vehículos autónomos

Tanto los vehículos autónomos como los sistemas V2V y V2I adolecen de dos problemas fundamentales que deben solucionarse antes de su incorporación masiva al mercado: en primer lugar, la seguridad informática de las tecnologías que utilizan; y en segundo lugar, la ausencia de un marco legal que regule estas tecnologías.

Un ataque malicioso a un vehículo autónomo no es algo baladí, ya que puede poner en riesgo la vida de millones de personas. Estos ataques no sólo son posibles, sino que se convertirán en un objetivo a medida que un mayor número de vehículos esté conectado a las redes de comunicación vehicular e internet.

El principal peligro de los ataques informáticos a vehículos autónomos se encuentra en aquellos con un nivel de automatización 4, en los que el usuario no tiene capacidad para actuar sobre los mandos del automóvil. Por ello deben diseñarse protocolos de actuación que eliminen el riesgo y permitan una conducción segura con independencia de las capacidades de interconexión del vehículo.

También es importante el aspecto de la privacidad, dado que los vehículos conectados ofrecen una gran cantidad de información que podría ser utilizada de forma ilícita o poco ética por ciudadanos, empresas o gobiernos.

En el aspecto legal, la llegada de los vehículos autónomos requerirá de un gran esfuerzo institucional para desplegar toda una serie de estándares, normalizaciones y certificaciones que permitan una correcta operación de todos los vehículos. Además, será necesario reformar las actuales leyes y normativas para cubrir este nuevo tipo de conducción.

8. Conclusiones

El transporte privado, y dentro de este el automóvil, resulta fundamental para el desarrollo de la vida urbana tal y como se concibe en la actualidad. Buena prueba de ello son los 0.5 vehículos per cápita que colocan a Europa a la cabeza del mundo en términos de posesión de vehículos, y los casi 9.600 kilómetros que cada ciudadano europeo recorre de media anualmente a bordo de un automóvil privado.

Además, la industria automotriz es uno de los principales motores industriales de la Unión Europea, y la operación de los vehículos que en ella se fabrican tiene también una importante dimensión económica, con un volumen de negocio de más de 950 mil millones de euros anuales. [2]

Desafortunadamente, todas estas grandes cifras tienen también un impacto negativo tanto a nivel medioambiental como a nivel urbano y energético de la misma magnitud, al que es necesario poner freno para asegurar la viabilidad del sistema.

La contaminación atmosférica es el problema derivado del transporte privado más estudiado, dado que sus efectos nocivos son los más evidentes y preocupantes: el cambio climático y las enfermedades de los sistemas respiratorio y cardiovascular hace tiempo que pusieron alerta a las autoridades, copando toda la atención. No en vano, el aire contaminado de las ciudades es el responsable de la muerte de 7 millones de personas cada año en todo el mundo, según datos de la Organización Mundial de la Salud. [30]

Los accidentes de tráfico son otro de los grandes problemas a los que se enfrenta el automóvil. Sólo en 2013 se cobraron la vida de más de 26.000 personas en Europa, dejando discapacitadas a un número mucho mayor [40]. El 61 % de todos los accidentes y el 36 % de aquellos en los que se registran víctimas mortales tuvieron lugar en zonas urbanas. [181]

Más allá de esto, la falta de espacio disponible en las ciudades (tanto para aparcar como para circular con fluidez), el ruido y las vibraciones y la contaminación del entorno natural son otras consecuencias del uso intensivo de automóviles.

En el aspecto energético, el transporte es el segundo sector por consumo de energía final en Europa, con más de 287 Mtoe de petróleo anuales, de las cuales casi todas provienen de importaciones de combustibles fósiles [2]. De toda esta energía, apenas un 21% alcanza las ruedas de los vehículos [42], mientras que el resto se pierde por ineficiencias en el motor y la transmisión. Además, una buena parte de ella es derrochada por el exceso de masa que presentan los vehículos en la actualidad, y a partir de cuya reducción podrían conseguirse mejoras en el consumo de hasta 2.3 litros/100 km [51]. Esta es una de las principales preocupaciones de la industria y los gobiernos, que se esfuerzan por desarrollar nuevas tecnologías que permitan aumentar la eficiencia energética, al mismo tiempo que reduzcan los problemas mencionados con anterioridad.

La electrificación del parque automotriz es la solución más prometedora con este propósito. Si bien es cierto que al motor de combustión interna aún le queda un largo recorrido y un importante potencial de mejora gracias al desarrollo de tecnologías como los

motores VCR y la combustión HCCI, en ningún caso este tipo de motores conseguirán unos resultados como los que se esperan de las tecnologías eléctricas.

El coche híbrido primero, y totalmente eléctrico después, son la esperanza del sistema. Y existen buenos motivos para confiar en que su adopción a gran escala sucederá a medio plazo. El vehículo eléctrico no sólo es más limpio que el vehículo con motor de combustión en entornos urbanos, sino también más barato en su operación. No obstante, aún queda un importante camino por recorrer en aspectos clave como las baterías, cuya autonomía y fiabilidad provocan escepticismo entre los potenciales compradores; y el coste de adquisición, que está sujeto a una importante prima frente a vehículos equivalentes con motor de combustión.

Cabe también destacar el potencial del vehículo eléctrico como regulador del sistema eléctrico, una característica que podría contribuir a aumentar su eficiencia global gracias a la mejor adecuación de las curvas de oferta y demanda. Asimismo es importante tener en cuenta que las ventajas medioambientales del vehículo eléctrico se encuentran supeditadas a las características de esta red eléctrica, por lo que una mala gestión de la misma que conduzca a un aumento del factor de emisiones global podría eclipsar su superioridad ecológica.

Respecto a los automóviles con pila de combustible, que durante décadas se han postulado como la principal alternativa de futuro en el transporte privado, la realidad es que no cuentan con ventajas reales frente a los BEV. Su eficiencia energética es mínima, son caros de fabricar y de operar, y no existe una infraestructura que permita el repostaje en casi ningún punto del globo terrestre. A pesar de los esfuerzos de algunos fabricantes por desarrollar este tipo de vehículos, los datos indican que la batalla contra los eléctricos a baterías la están ganando los segundos.

Más allá de los sistemas de propulsión, existen otras tecnologías con gran potencial para el aumento de la eficiencia energética y la reducción de los accidentes de tráfico, que se engloban en lo que se denominan “sistemas de transporte inteligente”. Dentro de estos sistemas, las tecnologías V2V y V2I, que permiten a los automóviles comunicarse entre sí y con el entorno que les rodea, y finalmente la conducción autónoma, tienen la capacidad de disminuir el número de siniestros hasta en un 90% [183], al mismo tiempo que permitirán un descenso del consumo de energía de entre un 10 y un 20 % en función de las características de la conducción. [169]

Además, el desarrollo de vehículos autónomos abre las puertas a una nueva concepción del transporte personal urbano, en la que la propiedad del vehículo no resulta necesaria para disfrutar de sus ventajas. La implantación a gran escala de una flota de SAV, o vehículos autónomos compartidos, permitiría reducir el número total de vehículos en circulación hasta en un 83% [179], obteniendo un servicio de similares características al que se deriva del uso del transporte privado en la actualidad. No obstante, aún deberán pasar varias décadas hasta que un sistema de estas características se convierta en realidad.

8.1. El coche urbano del futuro

Con todo lo estudiado a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado, no parece descabellado afirmar que el coche urbano del futuro será eléctrico y autónomo. Si bien es cierto que esto sólo llegará a partir de 2025 [180], y que el despegue de este tipo de automóviles será muy lento. Hasta esa fecha es previsible que los vehículos híbridos y eléctricos con capacidades V2V y V2I aumenten su presencia en el mercado, aunque de nuevo a un ritmo moderado, mientras que los tradicionales con motor de combustión interna seguirán copando las principales posiciones de ventas – probablemente hasta que se legisle en su contra o el precio de los carburantes deje de resultar competitivo.

En cualquier caso, para garantizar la funcionalidad de su servicio, estos vehículos deberán tener unas dimensiones mínimas, y es previsible que incorporen sus motores en las ruedas, de forma que la maniobrabilidad sea máxima, optimizando el espacio de aparcamiento. Se tratará en todo caso de vehículos conectados, tanto entre sí como con el entorno, lo que les permitirá aumentar la eficiencia y reducir los problemas asociados a su operación.

No obstante, para que todo esto suceda, es necesaria una importante contribución por parte de los organismos públicos, que deberán implantar las medidas necesarias para asegurar un correcto desarrollo de todas las tecnologías mencionadas. Además, en sus manos está gran parte de la responsabilidad a la hora de desplegar las infraestructuras que permitirán a estos vehículos ser realmente funcionales. Una red de recarga con capacidad para soportar la demanda; señales y semáforos inteligentes; y normativas y estándares que aseguren la interconexión de todos los vehículos y la seguridad de los sistemas, son probablemente las tres prioridades.

Con todo esto queda claro que el potencial de avance en el sector automotriz es enorme, y el coche aún tiene una oportunidad para mantener su posición como vehículo urbano por excelencia. Pese a todo, se requiere un esfuerzo colectivo que permita a las nuevas tecnologías alcanzar una posición en el mercado que reconduzca al sistema hacia la sostenibilidad.

Bibliografía

NOTA: Todos los enlaces incluidos en esta bibliografía han sido revisados a fecha del 22 de septiembre de 2014, encontrándose disponible el contenido citado en dicho momento en todos los casos. Cabe aclarar que estos enlaces han sido acortados con el objetivo de mejorar la legibilidad de las referencias bibliográficas. Al final del texto se incluye un apéndice con las direcciones originales, de forma que se garantice el acceso a la información en caso de fallo del servicio de acortamiento de enlaces.

1. *Libro Verde. Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana*. Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas, 2007. <http://bit.ly/XFtkzr>
2. *EU Transport in Figures. Statistical Pocketbook 2013*. European Commission, 2014. ISBN 978-92-79-28860-9. DOI: 10.2832/19314. <http://bit.ly/1f9zMVf>
3. ROSS, Darren. *Millenials don't care about owning cars, and car makers can't figure out why*. FastCoExist, 2014. <http://bit.ly/1ePO1NP>
4. *Size of the vehicle fleet (TERM 32)*. European Environmental Agency, 2011. <http://bit.ly/1l16NXW>
5. GARRAÍN, D. et al. *Land occupation and transformation by Spanish roads*. Universitat Jaume I, 2005. [PDF] <http://bit.ly/1mvizVO>
6. DANTAS, A., RIBEIRO, K. *Impacts of Transport Infrastructure Policies*. IPENZ Engineers New Zealand, 2006. <http://bit.ly/1BKKQkV>
7. TROMBULAK, S. et al. *Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities*. Conservation Biology Vol. 14.1, pgs. 18-30, 2000. <http://1.usa.gov/1rqkH8J>
8. *Un nuevo lince atropellado eleva a 16 los ejemplares muertos en 2014*. Europa Press, publicado en El Mundo, 11 de agosto de 2014. <http://mun.do/1v65SZz>
9. SALAS, J. *El número de lince atropellados se dispara por culpa de 4 carreteras*. Materia, 5 de diciembre de 2013. <http://bit.ly/1hzBU9E>
10. *El lobo ibérico persiste cerca del humano por el refugio más que por las presas*. Agencia SINC, julio de 2012. <http://bit.ly/1zd9N4H>
11. *Infraestructuras permeables*. Fundación Oso Pardo. <http://bit.ly/1toB6sX>
12. BLANCO, J.C. Lobo – *Canis lupus Linnaeus, 1758*. Enciclopedia Virtual de los Vertebrados Españoles. MNCN, 2011. <http://bit.ly/XY1P3D>
13. AKBAR, K., et al. *Heavy Metal Contamination of Roadside Soils of Northern England*. Soil & Water Res., 1, 2006 (4): 158–163. <http://bit.ly/1vsiXty>
14. *Metales pesados y contaminación*. Metal pesado. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1rqnNJP>
15. ZEHETNER, F. et al. *Distribution of Road Salt Residues, Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons across a Highway-Forest Interface*. Water, Air, and Soil Pollution. Marzo 2009, Volumen 198, Número 1-4, pp 125-132. <http://bit.ly/1pRejVi>
16. LEGRET, M., PAGOTTO, C. *Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway*. Science of The Total Environment, Volumen 235, Publicaciones 1–3, 1 de Septiembre de 1999, Páginas 143–150. <http://bit.ly/1lIZiSi>
17. *Apuntes de Acústica Industrial*. G. en Ing. Mecánica. UC3M, curso 2013-14.
18. *Ruido*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/XFQwNT>
19. *Decibelio ponderado*. Decibelio. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1tzZOVs>
20. KASELOO, P. *Synthesis of noise effects on wildlife populations*. Road Ecology Center, UC Davis, 2005. <http://bit.ly/1wi18BB>
21. *Understanding noise pollution: Causes and effects of noise pollution*. Conserve energy future. <http://bit.ly/1tA0tWQ>
22. *Efecto invernadero*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1BKYR21>

23. *Direct global warming potentials*. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change, 2007. <http://bit.ly/1kouYi1>
24. *Estudio sobre las emisiones derivadas del consumo de carburantes en el transporte por carretera en España*. CNE, Dirección de Hidrocarburos, 2013. <http://bit.ly/1l1pivb>
25. *Lluvia ácida*. National Geographic Magazine. <http://bit.ly/1hiZgir>
26. *Sulphur content of certain liquid fuels*. Council Directive 93/12/EEC of 22 March 1993 relating to the sulphur content of certain liquid fuels. European Union. <http://bit.ly/1v6hdsG>
27. *Sulphur dioxide SO2 emissions (APE 001)*. European Environmental Agency. 2011. <http://bit.ly/XFTxxl>
28. *Sulphur dioxide SO2 emissions (APE 001)*. European Environmental Agency. 2014. <http://bit.ly/1tA613L>
29. LEVITT, S., DUBNER, S. *Super Freakonomics: Global Cooling, Patriotic Prostitutes, and Why Suicide Bombers Should Buy Life Insurance*. ISBN 0060889578. William Morrow, 2009.
30. *7 million deaths annually linked to air pollution*. Public health, environmental and social determinants of health (PHE). World Health Organization, 2012.
31. *Scope of Parking in Europe. Data collection by the European Parking Association*. European Parking Association, 2013. <http://bit.ly/VISyKA>
32. IÑAKI. *Vuelve la boina sobre Madrid*. Con Plomo. Km77, 2009. <http://bit.ly/VISXUg>
33. *Dióxido de carbono – efectos en la salud*. Canadian Centre for Occupational Health and Safety. Gobierno de Canadá, 1997. <http://bit.ly/1BL9nGy>
34. *Health Effects of Air Pollution*. United States Environmental Protection Agency, 2014. <http://1.usa.gov/1imlNrF>
35. *Compuestos orgánicos volátiles. Calidad y evaluación ambiental*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <http://bit.ly/1AFeo21>
36. GONZÁLEZ, B. *Ozono troposférico. Ciudades para un futuro más sostenible*. Universidad Politécnica de Madrid, 2012. <http://bit.ly/1tpdy79>
37. *Ambient (outdoor) air quality and health*. Fact Sheet N° 313. WHO, 2014. <http://bit.ly/1qy9yfl>
38. G.A. *Efectos fisiológicos del ruido*. Curso de acústica creado por G.A. UPV/EHU, 2003. <http://bit.ly/1oidi3t>
39. *Fatalities at 30 days by traffic unit type in EU countries*. European Commission, 2012. <http://bit.ly/1v87rWQ>
40. *Statistics – Accidents data*. Road Safety. Mobility and Transport. European Commission, 2014. <http://bit.ly/JXXNRW>
41. *Road fatalities in the EU since 2001*. Mobility and Transport. European Commission, 2014. <http://bit.ly/1pSNINE>
42. CHU, S., MAJUMDAR, A. *Opportunities and challenges for a sustainable energy future*. Nature 11475; 2012. doi:10.1038/nature11475. <http://bit.ly/1ueuVtg>
43. *Bosch Automotive Handbook*. Robert Bosch GmbH. 8th Edition. Bentley publishers, 2011.
44. *Rolling Resistance*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1ppj5tn>
45. *Apuntes de Teoría de Vehículos. Tema 2: Neumáticos*. G. en Ing. Mecánica. UC3M, Curso 2012-13.
46. HALL, David E., CAL MORELAND, J. *Fundamentals of Rolling Resistance*. Michelin Americas Research Corp., Greenville. 2001. <http://bit.ly/1rrqL0M>
47. RIEMERSMA, I., MOCK, P. *Influence of Rolling Resistance on CO2*. The ICCT, 2012. <http://bit.ly/YMloMT>
48. *EU Vehiclemarket Pocketbook 2013*. The ICCT, 2014. <http://bit.ly/VIJFSc>
49. WAPOLE, S. et al. *The weight of nations: an estimation of adult human biomass*. BMC Public Health, 2012. doi:10.1186/1471-2458-12-439 <http://bit.ly/1tqHnnO>
50. *Occupancy rates of passenger vehicles (TERM 029)*. European Environmental Agency, 2010. <http://bit.ly/1wkkbez>
51. WOHLECKER, R. et al. *Determination of Weight Elasticity of Fuel Economy for ICE, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*. SAE International, 2007. DOI 10.4271/2007-01-0343. <http://bit.ly/1q5Sf9s>

52. BLAIN, P. *Steel perspectives for the automotive industry*. OICA, 2012. <http://bit.ly/VLUI26>
53. *Future of Steel in the Automobiles of the 21st Century*. Autosteel, 2009. <http://bit.ly/1seLocd>
54. *Assessment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles*. Committee on the Assessment of Technologies for Improving Light-Duty Vehicle Fuel Economy. Board on Energy and Environmental Systems. Division on Engineering and Physical Sciences. National Research Council, 2011. <http://bit.ly/1zhqz2v>
55. *Ultra Light Steel Auto Body. Phase 2 findings*. IISI. Porsche Engineering Services, 1998. <http://bit.ly/1rruc7l>
56. *Audi Space frame*. Glosario Audi, 2014. <http://bit.ly/1q6MxDp>
57. *New Range Rover Sport. Enhanced efficiency drives improved sustainability*. Land Rover, 2014. <http://bit.ly/1tqLxvW>
58. POLLOCK, T.M. *Weight Loss With Magnesium Alloys*. Science 21 May 2010: Vol. 328 no. 5981 pp. 986-987 DOI: 10.1126/science.1182848. <http://bit.ly/1lnRDfL>
59. SHULDINER, H. *Lower Cost Key to Magnesium's Lightweighting Uses*. WardsAuto, 2013. <http://bit.ly/1lnRM2X>
60. HOWARD, B. *BMW i3: Cheap, mass-produced carbon fiber cars finally come of age*. ExtremeTech, 2013. <http://bit.ly/1nIVF3h>
61. ZOEPF, S.M. *Automotive Features: Mass Impact and Deployment Characterization*. Massachusetts Institute of Technology, 2011. <http://bit.ly/1p1JBd5>
62. *Apuntes de Teoría de Vehículos. Tema 3: Aerodinámica*. G. en Ing. Mecánica. UC3M, curso 2012-13.
63. Volkswagen XL1 Brochure. Volkswagen Produktkommunikation, 2013. <http://bit.ly/VLVgiZ>
64. NEMRY, F. et al. *Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car)*. European Commission, 2008. ISBN: 978-92-79-07694-7. ISSN: 1018-5593. DOI 10.2791/63451 <http://bit.ly/1seSihN>
65. CHEAH, L.W. *Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S*. Massachusetts Institute of Technology, 2010. <http://bit.ly/1p1Lp5V>
66. ARIAS-PAZ, M. *Manual de Automóviles*. CIE Inversiones Editoriales, 53ª edición, 1999.
67. *Two stroke exhaust pollution: how it happens*. Green Planet Solar Energy, 2007-2014. <http://bit.ly/1v8twop>
68. *Ciclo de cuatro tiempos*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1tD8M49>
69. HAGIN, B. *Collectible Saab 2-Stroke '56 To '67*. The Auto Channel, 1997. <http://bit.ly/1tr7SJW>
70. CAMÓS, J. *Ford Fiesta 2t, aquel intento por simplificar los motores*. Motorpasión, 2013. <http://bit.ly/1wkY1Jf>
71. *Ford's advanced two-stroke engine starts customer trials; Fiesta test fleet takes to the road*. Ford press release via The Free Library, Ford Motor Company, 1992. <http://bit.ly/1zikmDi>
72. *Omnivore Research Engine*. Lotus Cars, 2009. <http://bit.ly/1p2N6tl>
73. ABUELSAMID, S. *Lotus' Omnivore is already 10 percent more efficient, with more to come*. Autoblog Green, 2009. <http://aol.it/1qApGgL>
74. SMIL, V. *Prime Movers of Globalization. The History and Impact of Diesel Engines and Gas Turbines*. MIT Press, 2010.
75. *Rudolf Diesel Biography*. Simply Knowledge. Aatman Innovations, ca. 2014. <http://bit.ly/1l3poTa>
76. *Marine propulsion*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1oiY52f>
77. RECUENCO, P. *¿Cuántos coches hay en el mundo y cuántos habrá?* Autofácil, 2014. <http://bit.ly/1oiZbL3>
78. RODRÍGUEZ GARCÍA, J. *Downsizing. Optimización del motor de gasolina*. Cevismap (Mapfre), 2013. <http://bit.ly/1tvKUAs>
79. *VW's New 90 kW Version of the TSI*. Green Car Congress, 2007. <http://bit.ly/1rtJHuj>
80. NARANJO, E. *Ford exprime su motor EcoBoost hasta los 140 CV*. Marca Motor, 2014. <http://bit.ly/1souxlq>
81. *Ford 1.0-Liter EcoBoost Engine Wins Unprecedented Third Consecutive International Engine of the Year Honors*. The Wall Street Journal, 2014. <http://on.wsj.com/1nmRjZM>

82. LARA, G. *Ford duplica la producción del motor 1.0 EcoBoost*. Motorpasión Futuro, 2013. <http://bit.ly/1pqjZWv>
83. *Ford Fiesta 5p Trend 1.0 EcoBoost 100 CV - Ficha técnica*. KM77, 2014. <http://bit.ly/1ziIKF4>
84. RODRÍGUEZ, P.A. *Apuntes de Motores de Combustión Interna*. Universidad Carlos III, 2014.
85. BENITO, G. *Motor Saab SVC*. Técnica. Km77, 2000. <http://bit.ly/1ojw9eG>
86. Omnivore Research Engine Interactive Animation. Lotus Cars. <http://bit.ly/1vaS3cx>
87. TOMAZIC, D. *et al. Two-Stage Variable Compression Ratio (VCR) System to Increase Efficiency in Gasoline Powertrains*. Deer Conference 2012. FEV, 2012. <http://1.usa.gov/1mD1cSW>
88. ANGELOS, J.P. *et al. HCCI Engines*. Green Research Group. Massachusetts Institute of Technology, ca. 2013. <http://bit.ly/1zmaQiO>
89. FERNÁNDEZ, P. *Motor HCCI*. Técnica. Km 77, 2001. <http://bit.ly/1qCG8x9>
90. OLIVEIRA, J. *F700 DiesOtto, el futuro revolucionario*. El Mundo Motor, 2008. <http://mun.do/1tGCLlu>
91. JÜRGEN, W. *et al. The CGI Combustion Process from Volkswagen*. MTZ Worldwide Edition: 2008-04. <http://bit.ly/1ttaQgU>
92. BROOKE, L. *Delphi and Hyundai GDCI program aims to top diesel efficiency*. SAE Automotive Engineering Magazine, 2014. <http://bit.ly/1wnMmcC>
93. *Motor adiabático*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/XJgz6X>
94. QUATTROCHI, D. *The Internal Combustion Engine (Otto Cycle)*. Massachusetts Institute of Technology, 2006. <http://bit.ly/1jQmUmV>
95. TISSHAW, M. *Next-generation Mazda engines to eclipse electric cars on emissions*. Autocar, 2014. <http://bit.ly/1eYHmh4>
96. *Improving Motor and Drive System Performance: A Sourcebook for Industry*. Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy, 2008. <http://1.usa.gov/1nmzHNR>
97. VIÑUELA, S. *Sistema Start-Stop, prueba real de ahorro de combustible*. Autobild, 2011. <http://bit.ly/1x1Y4Kt>
98. KUMAR, L. *et al. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014. <http://bit.ly/1qUZLk5>
99. OLMO, M. *et al. Funcionamiento del Motor de Inducción*. Hyperphysics. Georgia State University, ca. 2000. <http://bit.ly/1nmCzKM>
100. SEVER, I. *PSoC® 3 Stepper Motor Control with Precision Microstepping*. Digi-Key Corporation, 2011. <http://bit.ly/1qV0bqK>
101. RIPPEL, W. *Induction vs. DC Brushless motors*. Tesla Motors, 2007. <http://bit.ly/W2InCO>
102. SEVER, I. *PSoC® 3 Stepper Motor Control with Precision Microstepping*. Digi-Key Corporation, 2011. <http://bit.ly/1qV0bqK>
103. ZERAOULIA, M. *et al. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006. <http://bit.ly/1riJ7Ov>
104. *Michelin Active Wheel, la rueda motorizada*. Circula Seguro, 2009. <http://bit.ly/1qV0tOp>
105. *Ford eWheelDrive*. Ford Motor Company, 2013. <http://bit.ly/1oylTic>
106. *E-Wheel Drive Radnabenantrieb*. Schaeffler, 2013. <http://bit.ly/W3JuAS>
107. ABUELSAMID, S. *Greenlings: How do hybrids and electric vehicles blend regenerative and friction braking?* Autoblog Green, 2010. <http://aol.it/1w0R9Nm>
108. *Apuntes de Ingeniería Eléctrica*. Universidad Carlos III, curso 2011-2012.
109. *Pila Daniell*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1nmFzH4>
110. LÓPEZ BOADA, B. *et al. Cuaderno sobre inspección técnica de vehículos eléctricos*. Universidad Carlos III de Madrid. <http://bit.ly/1B94juB>
111. KHALIGH, A. & LI, Z. *Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: state of the Art*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59. 2010. DOI 10.1109/TVT.2010.2047877. <http://bit.ly/1wKIKPn>

112. VALOEN, L.O. *et al.* *The Effect of PHEV and HEV Duty Cycles on Battery and Battery Pack Performance*. Miljø Innovasjon AS, 2007. <http://bit.ly/W3KxAS>
113. *Panasonic NiHM Batteries Product Information Sheet*. Panasonic Industrial Company, 2014. <http://bit.ly/1q3zjJ3>
114. CEÑA, A., SANTAMARTA, J. *El coche eléctrico: el futuro del transporte, la energía y el medio ambiente*. World Watch, ca. 2012. <http://bit.ly/1CjJsJ>
115. DUSTMANN, C. *Advances in Zebra Batteries*. Journal of Power Sources, 127, 2004. <http://bit.ly/1qwx9Ak>
116. *Panasonic NCR-18650*. Panasonic Industrial Europe GmbH. <http://bit.ly/1oyn41u>
117. KYUNG, C. YOO, S. *Energy-Aware System Design: Algorithms and Architectures*. Springer, 2011. ISBN 978-94-007-1678-0. DOI 10.1007/978-94-007-1679-7. <http://bit.ly/1B94G8e>
118. CAMÓS, J. *Las baterías caerán de precio en 2015, según Volkswagen*. Motorpasión Futuro, 2012. <http://bit.ly/1tYXGk>
119. *Lithium-Polymer*. Harding Energy Inc, 2012. <http://bit.ly/W2paAa>
120. RAMSEY, M. *Ford CEO: Battery is Third of Electric Car cost*. The Wall Street Journal, 2012. <http://on.wsj.com/Z4KarH>
121. *Precio del kWh en 2013*. Tarifasgasluz, 2014. <http://bit.ly/1rJk4XY>
122. CASTELLS, X.E. *Energía, Agua, Medio Ambiente, Territorialidad y Sostenibilidad*. Ediciones Díaz de Santos, 2011. ISBN 978-84-9969-009-4. <http://bit.ly/1nmL9ZW>
123. *Puntos de recarga para vehículos*. Ayuntamiento de Madrid, 2014. <http://bit.ly/1qjrmPE>
124. CHENG HUANG, J.X. *et al.* *Manipulating surface reactions in lithium-sulphur batteries using hybrid anode structures*. Nature, 2014. DOI 10.1038/ncomms4015. <http://bit.ly/1uiUycz>
125. GIRISHKUMAR, G. *et al.* *Lithium-Air Battery*. Promise and Challenges. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2010. <http://bit.ly/1u9LQLg>
126. ERJAVEC, J. *Hybrid, Electric & Fuel Cell Vehicles*. Delmar Cengage Learning. International Edition, 2nd edition, 2007. ISBN 1-132-8435-3.
127. *Lithium Ion Capacitor*. JSR Micro Materials Innovation, 2014. <http://bit.ly/1sVeEVI>
128. HENRY, T. *Supercapacitors can destroy the lithium-ion battery market*. IdTechEX, 2014. <http://bit.ly/1pAYzH9>
129. *Graphene Supercapacitors Ready for Electric Vehicle Energy Storage, Say Korean Engineers*. MIT Technology Review, 2014. <http://bit.ly/1kpLhco>
130. BULLIS, K. *A Battery with Liquid Electrodes Can Be Recharged or Refilled*. MIT Technology Review, 2014. <http://bit.ly/1cjxv7A>
131. VILLATORO, F.R. *Baterías de flujo redox para energía eólica y solar*. Naukas, 2014. <http://bit.ly/1u9OPTL>
132. *NanoFLOWCELL*, 2014. <http://bit.ly/1w0VaBb>
133. *El sistema eléctrico español 2013*. Red Eléctrica de España, 2014. <http://bit.ly/1IEJ54g>
134. MADRIGAL, A. *China's 2030 CO2 Emissions Could Equal the Entire World's Today*. Wired, 2008. <http://wrd.cm/1r64W4H>
135. KERUI, D. *et al.* *Sources of the potential CO2 emission reduction in China: A nonparametric metafrontier approach*. Applied Energy, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.046 <http://bit.ly/1vEYPax>
136. *Electricity and City Cars*. World Nuclear Association, 2014. <http://bit.ly/1r662xf>
137. *Hybrid Vehicle Drivetrain*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1q7owgR>
138. BUECHERL, D., BOLVASHENKOV, I. *Verification of the Optimum Hybridization Factor as Design Parameter of Hybrid Electric Vehicles*. IEEE, 2009. DOI: 10.1109/VPPC.2009.5289758 <http://bit.ly/1uhGe1x>
139. Hannan, M.A. *et al.* *Hybrid electric vehicles and their challenges: A review*. Elsevier, 2013. <http://bit.ly/Y2zrxl>

140. WENDLER, A. *Toyota Introduces High-Efficiency Engines, Plans up to 14 Variants*. Car&Driver, 2014. <http://bit.ly/1iG0wKR>
141. FELDMAN, B.J. *The Hybrid Automobile and the Atkinson Cycle*. The American Association of Physics Teachers, 2008. <http://bit.ly/1riQ7ea>
142. KOSAKA, H., et al. *Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part 1 - Investigation of Fundamental Characteristics*. SAE Technical papers, 2014. doi:10.4271/2014-01-1203. <http://bit.ly/1ppBFN2>
143. GOTO, S., et al. *Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part 2 - Investigation of Control System for Generator*. SAE Technical papers, 2014. doi:10.4271/2014-01-1193. <http://bit.ly/1A6CpwG>
144. OTERO. *Toyota está trabajando en un motor lineal con pistón libre como generador para vehículos eléctricos*. Motorpasión Futuro, 2014. <http://bit.ly/Z7m9jV>
145. *Toyota Central R&D developing free-piston engine linear generator; envisioning multi-FPEG units for electric drive vehicles*. Green Car Congress, 2014. <http://bit.ly/1xbWRQS>
146. PAUL M. NAJT, et al. *Hybrid powertrain system using free piston linear alternator engines*. US 8261860 B2, 2009. <http://bit.ly/1pJDYk0>
147. *Compressed Air Energy Storage (CAES)*. Energy Storage Association, 2014. <http://bit.ly/1xloRBB>
148. *Hybrid air, an innovative full hybrid gasoline system*. PSA Peugeot Citroën, 2013. <http://bit.ly/1nPIMSE>
149. GARCÍA PUENTE, M. *Contacto: Peugeot 2008 Hybrid Air*. Autopista.es. <http://bit.ly/1jaYN5x>
150. DAYTON, D.C. *Fuel Cell Integration - A study in the Impacts of Gas Quality and Impurities*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, EEUU, 2001. <http://1.usa.gov/1CckZ4T>
151. MAYANDÍA, A. *Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico*. UC3M, 2009. <http://bit.ly/1tXCizX>
152. *Proton Exchange membrane fuel cell*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1tnzddH>
153. GARCÍA-CONDE, A. *El hidrógeno como vector energético y las Pilas de Combustible*. INTA, 2013. <http://bit.ly/1xzLMcl>
154. VIZCAÍNO A. *Producción de Hidrógeno por reformado de etanol con vapor empleando catalizadores de Cu-Ni soportados*. Tesis Doctoral. URJC, 2007. <http://bit.ly/1qy92ms>
155. UDENGAARD, N. *Hydrogen production by steam reforming of hydrocarbons*. Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem. 2004, 49(2), 906. <http://1.usa.gov/1rTTLOX>
156. AMÉRICO, H., VISINTIN, A. *Hidrógeno, combustible del futuro. ¿Por qué, cómo y dónde?* Universidad Nacional de La Plata, ca. 2005. <http://bit.ly/1w8TOqU>
157. MOLTÓ, J. *El reino del 7 para la pila de combustible*. Teletransporte. KM77, 2011. <http://bit.ly/1utaMgV>
158. CLAVERO, D. *Hyundai ix35 FCEV llega al mercado por 125.000€*. Tecmovia, 2013. <http://bit.ly/1qAQRwa>
159. READ, R. *Honda, Toyota, will launch HFCV by 2015 but they won't be cheap*. The car connection, 2014. <http://bit.ly/1pIR2QF>
160. *Hydrogen and Fuel Cells*. The U.S. Market Report. National Hydrogen Association, 2010. <http://bit.ly/1uGu6Gz>
161. SILER, S. *Pump It Up: We Refuel a Hydrogen Fuel-Cell Vehicle*. Car and Driver, 2008. <http://bit.ly/Yrg1D0>
162. BERMAN, B. *Nissan launch 9.900\$ quick charger in the US*. Plugin Cars, 2011. <http://bit.ly/Zf1NFn>
163. OGDEN, J. *The hydrogen transition: this time, for real?* UC Davis. Institute of Transportation Studies, 2014. <http://bit.ly/1Ahrz94>
164. *27 Hydrogen Refuelling stations open worldwide in 2012*. European Hydrogen Association, 2013. <http://bit.ly/1qzJl4S>
165. *Intelligent Transport Systems*. Wikipedia, 2014. <http://bit.ly/1t0dLha>

166. HOWARD, B. *V2V: What are vehicle-to-vehicle communications and how do they work?* Extremetech, 2014. <http://bit.ly/1nZUPfA>
167. *Intelligent Transport Systems. Vehicle-to-Vehicle Technologies Expected to Offer Safety Benefits, but a Variety of Deployment Challenges Exist.* Report to Congressional Requesters. US Government Accountability Office, 2013. <http://1.usa.gov/1nYj0Zu>
168. COELINGH, E., SOLYOM, S. *All Aboard the Robotic Road Train.* IEEE Spectrum, 2012. <http://bit.ly/XqNEUd>
169. *The SARTRE Project,* 2012. <http://bit.ly/18pWczt>
170. BARTH, M. *The Potential Role of Vehicle Automation in Reducing Traffic-Related Energy and Emissions.* Dept. of Electr. Eng., Univ. of California Riverside, Riverside, CA, USA, 2013. DOI: 10.1109/ICCVE.2013.6799862. <http://bit.ly/1s3XtFQ>
171. *WHITE PAPER. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system.* European Commission, 2011. <http://bit.ly/1t0iK1s>
172. *Intelligent traffic signal control - a contribution to sustainable road traffic.* GEVAS software Systementwicklung und Verkehrsinformatik GmbH, ca. 2013. <http://bit.ly/XqQUps>
173. STASZEWSKI, R. *et al. Making cars safer through technology innovation.* Texas Instruments, 2013. <http://bit.ly/1sc2hTD>
174. GUIZZO, E. *How Google's self-driving car works.* IEEE Spectrum, 2011. <http://bit.ly/1qXp4EU>
175. *Velodyne Lidar.* Velodyne, 2014. <http://bit.ly/1s3YptQ>
176. PRIDDLE, A., WOODYARD, C. *Google discloses costs of its driverless car tests.* USA TODAY, 2014. <http://usat.ly/1q8NYOf>
177. *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles.* National Highway Traffic Safety Administration, 2013. <http://1.usa.gov/1r0qcJG>
178. *National Travel Survey 2012.* Department of Transport. UK Government, 2013. <http://bit.ly/19jienS>
179. FAGNANT, D. *The Travel and Environmental Implications of Shared Autonomous Vehicles, Using Agent-Based Model Scenarios.* University of Texas at Austin, 2014. <http://bit.ly/1wKOAiG>
180. *Autonomous Cars – Not if, but when.* Emerging Technologies. Automotive Technology Research. IHS Automotive, 2014. <http://bit.ly/1pqWRm0>
181. *Road Safety Vademecum.* Road safety trends, statistics and challenges in the EU 2011-2012. European Commission, 2013. <http://bit.ly/1AZGnYC>
182. *Tema 16. Estructura y movilidad de la población sobre el territorio. Las infraestructuras de transporte como motor de la economía. El desarrollo sostenible. Movilidad por carretera : desplazamientos urbanos e interurbanos.* Grupo de Materias Comunes de Movilidad Segura. Dirección General de Tráfico, 2011. <http://bit.ly/1wD2Bih>
183. DURIC, P., MILADINOV-MIKOV, M. *Some characteristics of drivers having caused traffic accidents.* Medicinski Pregled, 2008. <http://1.usa.gov/1ohTl8V>

Anexo – Enlaces bibliográficos originales

1. http://ec.europa.eu/transport/clean/green_paper_urban_transport/doc/2007_09_25_gp_urban_mobility_es.pdf
2. http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2013_en.htm
3. <http://www.fastcoexist.com/3027876/millennials-dont-care-about-owning-cars-and-car-makers-cant-figure-out-why>
4. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/size-of-the-vehicle-fleet/size-of-the-vehicle-fleet-2>
5. http://www.researchgate.net/profile/Rosario_Vidal/publication/47745423_Land_occupation_and_transformation_by_Spanish_roads/links/02e7e5166fc2e4b51f000000
6. https://www.ipenz.org.nz/ipentg/papers/2006/07_Dantas_Ribeiro.pdf
7. http://ulpeis.anl.gov/documents/dpeis/references/pdfs/Trombulak_and_Frissell_2000.pdf
8. <http://www.elmundo.es/andalucia/2014/08/11/53e8ef99ca4741ba758b4588.html>
9. <http://esmateria.com/2013/12/05/el-numero-de-linces-ibericos-atropellados-se-dispara-por-culpa-de-cuatro-carreteras/>
10. <http://www.agenciasinc.es/Noticias/El-lobo-iberico-persiste-cerca-del-humano-por-el-refugio-mas-que-por-las-presas>
11. <http://www.fundacionosopardo.org/index.php/proyectos/programa-habitat/infraestructuras-permeables/>
12. <http://www.vertebradosibericos.org/mamiferos/pdf/canlup.pdf>
13. http://www.cazv.cz/userfiles/File/SWR%201_158-163.pdf
14. http://es.wikipedia.org/wiki/Metal_pesado#Metales_pesados_y_contaminaci.C3.B3n
15. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11270-008-9831-8>
16. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969799002077>
17. Sin enlace disponible.
18. <http://es.wikipedia.org/wiki/Ruido>
19. http://es.wikipedia.org/wiki/Decibelio#Decibelio_ponderado
20. <http://escholarship.org/uc/item/9fz3s9x0#page-2>
21. <http://www.conserve-energy-future.com/causes-and-effects-of-noise-pollution.php>
22. http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero
23. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html
24. http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/Estudio_Emisiones_Derivadas_20062013.pdf
25. <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/acid-rain-overview>
26. http://europa.eu/legislation_summaries/other/l21050_en.htm
27. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-sulphur-dioxide-so2-emissions-1/assessment>
28. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-sulphur-dioxide-so2-emissions-1/assessment-3>
29. Sin enlace disponible.
30. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/en/
31. http://www.europeanparking.eu/cms/Media/Taskgroups/Final_Report_EPA_Data_Collectionort_final_web1%20.pdf
32. <http://blogs.km77.com/conplomo/287/vuelve-la-boina-sobre-madrid/>
33. http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide/health_cd.html
34. <http://www.epa.gov/region7/air/quality/health.htm>
35. http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx
36. <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-ozono-troposferico.html>
37. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
38. <http://www.ehu.es/acustica/espanol/ruido/efectos%20y%20normativa/efectos%20y%20normativa.html>
39. http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/statistics/2012_transport_mode_graph.pdf
40. http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics/index_en.htm
41. http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/observatory/move_affiche_hoz_en_2014_sansdebord.pdf
42. <http://www.nature.com/nature/journal/v488/n7411/full/nature11475.html>
43. Sin enlace disponible.
44. http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance
45. Sin enlace disponible.
46. <http://www.rubberchemtechnol.org/doi/abs/10.5254/1.3547650?journalCode=rcat>
47. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_work_rollingresistance_nov2012.pdf
48. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU_vehiclemarket_pocketbook_2013_Web.pdf
49. <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1471-2458-12-439.pdf>
50. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/occupancy-rates-of-passenger-vehicles/occupancy-rates-of-passenger-vehicles-1>
51. <http://papers.sae.org/2007-01-0343/>
52. <http://www.oecd.org/industry/ind/50498824.pdf>
53. <http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202009/05%20-%20Future%20of%20Steel%20in%20the%20Automobiles%20of%20the%2021st%20Century.pdf>
54. http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=12924

55. http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Programs/ULSAB/ulsab_eng_rpt_complete.pdf
56. http://www.audi.es/es_partner/p_0311Q/es/tools/advice/glossary/audi_space_frame.browser.carline_a4avant.html
57. <http://landovermena.com/2013/04/04/new-range-rover-sport-enhanced-efficiency-drives-improved-sustainability/>
58. <https://www.sciencemag.org/content/328/5981/986.short?related-urls=yes&legid=sci;328/5981/986>
59. <http://wardsauto.com/vehicles-amp-technology/lower-cost-key-magnesium-s-lightweighting-uses>
60. <http://www.extremetech.com/extreme/162582-bmw-i3-will-bmws-new-ev-finally-be-the-breakthrough-for-carbon-fiber-cars>
61. <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/65434/746780277.pdf?sequence=1>
62. Sin enlace disponible.
63. <http://www.volkswagen-xl1.com/en/vision/aerodynamic>
64. http://ec.europa.eu/environment/ipp/pdf/jrc_report.pdf
65. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/62760>
66. Sin enlace disponible.
67. <http://www.green-planet-solar-energy.com/2-stroke-exhaust.html>
68. http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos
69. <http://www.theautochannel.com/news/writers/bhagin/1997/fs9717.html>
70. <http://www.motorpasion.com/clasicos/ford-fiesta-2t-aquel-intento-por-simplificar-los-motores>
71. <http://www.thefreelibrary.com/FORD'S+ADVANCED+TWO-STROKE+ENGINE+STARTS+CUSTOMER+TRIALS%3B+FIESTA+TEST...-a012363347>
72. <http://www.lotuscars.com/gb/engineering/case-study-omnivore-research-engine>
73. <http://green.autoblog.com/2009/12/10/lotus-omnivore-engine-is-already-10-more-efficient-with-more/>
74. Sin enlace disponible.
75. http://simplyknowledge.com/biographies/rudolf-diesel#.VCGzqfl_vif6
76. http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_propulsion
77. <http://www.autofacil.es/industria/2014/08/01/coches-hay-mundo-habra/19772.html>
78. http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1070471
79. http://www.greencarcongress.com/2007/05/vws_new_90_kw_v.html
80. <http://www.marcamotor.com/2014/06/18/noticias/1403105455.htm>
81. <http://online.wsj.com/article/PR-CO-20140625-907435.html>
82. <http://www.motorpasionfuturo.com/mecanica-eficiente/ford-duplica-la-produccion-del-motor-1-0-ecoboost>
83. <http://www.km77.com/precios/ford/fiesta/2013/fiesta-5p-10-ecoboost-100-cv>
84. Sin enlace disponible.
85. <http://www.km77.com/tecnicamotor/motorsaaabvc/t03.asp>
86. <http://www.km77.com/tecnicamotor/motorsaaabvc/t03.asp>
87. http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2012/tuesday/presentations/deer12_tomazic.pdf
88. <http://cheme.scripts.mit.edu/green-group/hcci-engines/>
89. <http://www.km77.com/tecnicamotor/hcci/t04.asp>
90. <http://www.elmundo.es/suplementos/motor/2008/385/1214991520.html>
91. <http://www.atzonline.com/Article/7358/The-GCI-Combustion-Process-from-Volkswagen.html>
92. <http://articles.sae.org/12823/>
93. http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_adiab%C3%A1tico
94. <http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node25.html>
95. <http://www.autocar.co.uk/car-news/industry/next-generation-mazda-engines-eclipse-electric-cars-emissions>
96. http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/motor.pdf
97. <http://www.autobild.es/practicos/sistema-start-stop-prueba-ahorro-combustible-166409>
98. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006734>
99. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/indmot.html>
100. <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/oct/psoc-3-stepper-motor-control-with-precision-microstepping>
101. <http://www.teslamotors.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors>
102. <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/oct/psoc-3-stepper-motor-control-with-precision-microstepping>
103. http://hal.inria.fr/docs/00/52/75/84/PDF/IEEE_VPPC_2005_ZERAOULIA.pdf
104. <http://www.circulaseguro.com/michelin-active-whell-la-rueda-motorizada/>
105. <http://ewheeldrive.fordmedia.eu/enhanced.htm>
106. http://m.schaeffler.com/content.mobile.products/de/products/automotive/e_mobility/e_wheel_drive/e_wheel_drive_info.html
107. <http://green.autoblog.com/2010/02/18/greenlings-how-do-hybrids-and-electric-vehicles-blend-regenerat/>
108. Sin enlace disponible.
109. http://es.wikipedia.org/wiki/Pila_Daniell
110. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5446335&url=http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp%3Farnumber%3D5446335
111. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?reload=true&tp=&arnumber=5446335&url=http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp%3Farnumber%3D5446335

112. http://www.pluginhighway.ca/PHEV2007/proceedings/PluginHwy_PHEV2007_PaperReviewed_Valoen.pdf
113. http://na.industrial.panasonic.com/sites/default/pidsa/files/nimhsseries_datasheets_merged.pdf
114. <http://www.nodo50.org/worldwatch/ww/pdf/cocheelectrico.pdf>
115. <http://www.gunnarmusan.de/Material/Advances%20in%20ZEBRA%20Batteries.pdf>
116. <http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf2/ACI4000/ACI4000CE17.pdf>
117. http://books.google.es/books?id=mb2ZhqIBu8MC&pg=PA155&lpg=PA155&dq=lithium-ion+340+w/kg&source=bl&ots=93UkqVGq00&sig=SLRWz4-WEEnYvzo6gB2Ygl2COCU&hl=es&sa=X&ei=mGT_U8aSPMfPaMP7gYAM&ved=0CDYQ6AEwAg#v=onepage&q=lithium-ion%20340%20w%20kg&f=false
118. <http://www.motorpasionfuturo.com/industria/las-baterias-caeran-de-precio-en-2015-segun-volkswagen>
119. <http://hardingenergy.com/portfolio/lithium-polymer/>
120. <http://online.wsj.com/news/articles/SB10001424052702304432704577350052534072994?mg=reno64-wsj&url=http://online.wsj.com/article/SB10001424052702304432704577350052534072994.html>
121. <http://tarifasgasluz.com/fag/hc-energia/precio-kwh-2013>
122. http://books.google.es/books?id=GL_W-seakgC&pg=PA315&lpg=PA315&dq=80%25+desplazamientos+diarios+inferiores+a+80+kil%C3%B3metros&source=bl&ots=z73kgYeGBW&sig=MaN-h9Qj0gzRuXerRHmU4Uqmmuk&hl=es&sa=X&ei=EsACVOatHNLfaKjlgOAC&ved=0CCkQ6AEwAQ#v=onepage&q=80%25%20desplazamientos%20diarios%20inferiores%20a%2080kil%C3%B3metros&f=false
123. <http://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Ayuntamiento/Movilidad-y-Transportes/Aparcamiento/Puntos-de-recarga-electrica-para-vehiculos-dentro-Ciudad-de-Madrid?vgnextfmt=default&vgnextoid=47f2c7f4f12d6410VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnextchannel=7c5d9ad016e07010VgnVCM100000dc0ca8cORCRD>
124. <http://www.nature.com/ncomms/2014/140109/ncomms4015/full/ncomms4015.html>
125. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jz1005384>
126. Sin enlace disponible.
127. <http://www.jsrmicro.com/index.php/EnergyAndEnvironment/LithiumIonCapacitor/>
128. <http://www.idtechex.com/research/articles/supercapacitors-can-destroy-the-lithium-ion-battery-market-00006649.asp>
129. <http://www.technologyreview.com/view/521651/graphene-supercapacitors-ready-for-electric-vehicle-energy-storage-say-korean-engineers/>
130. <http://www.technologyreview.com/news/524781/a-battery-with-liquid-electrodes-can-be-recharged-or-refilled/>
131. <http://francis.naukas.com/files/2014/01/Dibujo20140108-Schematic-of-a-flow-battery-nature-com.png>
132. <http://mediacenter.nanoflowcell.com/mediacenter/press-release/>
133. http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/inf_sis_elec_ree_2013_v1.pdf
134. <http://www.wired.com/2008/02/chinas-2030-co2/>
135. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913008763>
136. <http://www.world-nuclear.org/info/Non-Power-Nuclear-Applications/Transport/Electricity-and-Cars/>
137. http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain
138. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5289758>
139. http://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a29_3ay_3a2014_3ai_3ac_3ap_3a135-150.htm
140. <http://blog.caranddriver.com/toyota-introduces-high-efficiency-engines-plans-up-to-14-var>
141. <http://scitation.aip.org/content/aapt/journal/tpt/46/7/10.1119/1.2981291>
142. <http://papers.sae.org/2014-01-1203/>
143. <http://papers.sae.org/2014-01-1193/>
144. <http://www.motorpasionfuturo.com/mecanica-eficiente/toyota-esta-trabajando-en-un-motor-lineal-con-piston-libre-como-generador-para-vehiculos-electricos>
145. <http://www.greencarcongress.com/2014/04/20140422-fpeg.html>
146. <http://www.google.com/patents/US8261860>
147. <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>
148. <http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/automotive-innovation/innovation-by-psa/hybrid-air-engine-full-hybrid-gasoline>
149. <http://www.autopista.es/pruebas/pruebas-de-coches/articulo/psa-hybrid-air-peugeot-2008-funciona-101046>
150. <http://www.nrel.gov/docs/gen/fy01/30298.pdf>
151. <http://kimerius.com/app/download/5781446504/Descripci%C3%B3n+y+modelado+de+una+pila+de+combustible+de+membra+de+intercambio+prot%C3%B3nico.pdf>
152. http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell
153. <http://www.euita.upm.es/sfs/E.U.I.T.%20Aeronautica/Direccion/Direccion3/Actividades/2011-2012/docs/2013-03-01-EUITA-ETSIA-EIAE-H2%20y%20Pilas.pdf>
154. <http://eciencia.uric.es/bitstream/10115/1066/1/TESIS%20VIZCAINO%20MADRIDEJOS.pdf>
155. https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/49_2_Philadelphia_10-04_1205.pdf
156. <http://www.inifta.unlp.edu.ar/extension/Hidrogeno.pdf>
157. <http://blogs.km77.com/teletransporte/5983/reino-del-7-pila-combustible/>

158. <http://www.tecmovivia.com/2013/01/29/el-hyundai-ix35-fcev-llega-al-mercado-por-125-000-e-el-hidrogeno-ya-es-una-realidad/>
159. http://www.thecarconnection.com/news/1091099_honda-toyota-will-launch-hydrogen-fuel-cell-vehicles-by-2015-but-they-wont-be-cheap
160. <http://www.ttcorp.com/pdf/marketReport.pdf>
161. <http://www.caranddriver.com/features/pump-it-up-we-refuel-a-hydrogen-fuel-cell-vehicle-hydrogen-filling-stations-are-still-rare-page-3>
162. <http://www.pluginCars.com/nissan-launch-9900-quick-charger-us-110204.html>
163. <http://www.its.ucdavis.edu/blog-post/the-hydrogen-transition-this-time-for-real/>
164. <http://www.h2euro.org/2013/27-hydrogen-refuelling-stations-open-world-wide-in-2012>
165. http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_transportation_system
166. <http://www.extremetech.com/extreme/176093-v2v-what-are-vehicle-to-vehicle-communications-and-how-does-it-work>
167. <http://www.gao.gov/assets/660/658709.pdf>
168. <http://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/all-aboard-the-robotic-road-train>
169. <http://www.sartre-proiect.eu/en/Sidor/default.aspx>
170. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6799862>
171. http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white_paper_2011_ia_full_en.pdf
172. http://www.gevas.eu/1/download/?jumpurl=fileadmin/user_upload/Download/Produktinformation/english/AdaptiveControl.pdf&juSecure=1&mimeType=application/pdf&locationData=124:tt_content:306&juHash=41a56c180280e6c9ccb97b9476fd6223c3f9fa2a
173. <http://www.ti.com/lit/wp/sszy009/sszy009.pdf>
174. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-driving-car-works/>
175. <http://www.velodynelidar.com/lidar/lidar.aspx>
176. http://content.usatoday.com/communities/driveon/post/2012/06/google-discloses-costs-of-its-driverless-car-tests/1#.VBdXuPI_v4
177. http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf
178. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/243957/nts2012-01.pdf
179. http://www.ce.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/TRB14SAVenergy_emissions.pdf
180. http://orfe.princeton.edu/~alaink/SmartDrivingCars/PDFs/IHS%20EmergingTechnologies_AutonomousCars.pdf
181. http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/vademecum_2013.pdf
182. http://www.dgt.es/Galerias/la-dgt/empleo-publico/oposiciones/doc/2013/TEMA_16_Parte_Comun_mov_segura1e.doc
183. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19203062>