



**Estrategias para la mejora
de la calidad del aire en una ciudad:
movilidad y vehículo eléctrico**

**Trabajo final de Máster
orientación programa de Doctorado**

**Ingeniería Ambiental
Interdepartamental**

Universidad Politécnica de Cataluña

Albert Soret Miravet

Director: Dr. José María Baldasano



Índice

1	Resumen	6
2	Introducción	7
2.1	Contaminación atmosférica	7
2.1.1	Contaminantes y efectos.....	7
2.1.2	Marco legislativo.	8
2.2	Panorama actual de la calidad del aire en Europa: situación y causas.....	11
2.2.1	Emisiones atmosféricas en Europa	11
2.2.2	Estado de la calidad del aire en Europa.....	13
2.2.3	Transporte.....	16
3	Gestión de la calidad del aire en una ciudad: tráfico.....	18
3.1	Panorama actual de la gestión de la calidad del aire en las ciudades, mejoras tecnológicas y uso de combustibles alternativos.	19
3.1.1	Limitación de las emisiones, estándares Euro	19
3.1.2	Combustibles alternativos en los vehículos de combustión interna.	21
3.2	Vehículo eléctrico.....	25
3.2.1	Electrificación progresiva del transporte; el vehículo híbrido.....	26
3.2.2	Vehículo eléctrico; características	28
3.2.3	Retos del vehículo eléctrico: baterías e integración en el sistema eléctrico.	30
3.2.4	Vehículo eléctrico, herramienta para mejorar la calidad del aire en las ciudades. ...	33
3.2.5	Perspectivas del vehículo eléctrico	35
3.3	Medidas de movilidad.....	38
3.3.1	Medidas generales de movilidad.....	39
3.3.2	Gestión de la movilidad y de la velocidad de circulación	40
4	Objetivos.....	44
5	Metodología.....	46
5.1	Marco de estudio	46
5.2	Escenarios de estudio	47
5.3	Principales herramientas.....	48
5.3.1	Modelo de emisiones: HERMES.....	48
5.3.2	Modelo meteorológico: WRF-ARW.....	49
5.3.3	Modelo fotoquímico: CMAQ.....	51
5.4	Infraestructura computacional	51
6	Plan de trabajo	53
7	Referencias	54



Lista de Tablas

Tabla 1. Resumen de los valores límite legislados de calidad del aire de la salud humana y protección de vegetación (cursiva), (*) valor objetivo. _____	9
Tabla 2. Techo de emisiones para España en 2010. _____	10
Tabla 3. Cuadro con las ventajas e inconvenientes de cada combustible alternativo. _____	23
Tabla 4. Efecto en las emisiones de los diferentes combustibles basados en motores de combustión y otros sistemas de propulsión (modificación de FITSA, 2008) _____	25
Tabla 5. Escenarios de estudio para el análisis del efecto del VE en la calidad del aire y emisiones. _____	47
Tabla 6. Escenarios de estudio para el análisis del efecto de la gestión de la movilidad. _____	48
Tabla 7. Plan de trabajo con las tareas y su duración estimada. _____	53

Lista de los principales acrónimos y abreviaturas utilizados

General:

- Carga del vehículo a la red (vehicle to grid): V2G
- Gas licuado de petróleo: GLP
- Gas natural: GN
- Motor de combustión interna: MCI
- Motor eléctrico: ME
- Reactor catalítico selectivo: SCR
- Vehículo de combustión interna: VCI
- Vehículo eléctrico: VE

Lista de Figuras

Figura 1. Evolución de las emisiones totales en Europa (EU-27) en el período 1990-2008 (EEA, 2010a).	11
Figura 2. Emisiones de NO _x por sector de emisión en Europa (EU-27) (EEA, 2010).	12
Figura 3. Evolución de los niveles de inmisión en Europa. (Izquierda) Evolución de los niveles medios anuales de inmisión en Europa teniendo en cuenta estaciones: fondo, suburbanas y urbana. El nivel de 100 corresponde al nivel de 1997 (EEA, 2010b). (Derecha) Porcentaje de población residente en zonas urbanas en las que los niveles de inmisión son superiores a los límites legislados (EEA, 2010c).	14
Figura 4. Concentración promedio anual de NO ₂ (MARM, 2010b). Niveles más elevados en las áreas metropolitanas de Madrid, Barcelona y Granada.	15
Figura 5. Evolución del consumo de carburantes; gasolina (azul) y gasoil (rojo) (Fuente: Ministerio de Fomento, 2011). Incremento del número de vehículos por km (verde) (Fuente: Eurostat, 2011).	17
Figura 6. Evolución del transporte urbano en España (Fuente: INE, 2011).	17
Figura 7. Diagrama con las medidas para la mejora de la calidad del aire urbano mediante la reducción de las emisiones de tráfico.	18
Figura 8. Reducción de las emisiones de tráfico en turismos diesel acorde a los estándares Euro. (*Previo a 30-9-1999, **Posterior a 30-9-1999) (Fuente: Dieselnets, 2010).	20
Figura 9. La Jamais Contente, primer vehículo en superar la barrera de los 100 km/h el 29 de Abril de 1899. Era un vehículo eléctrico.	26
Figura 10. Diagrama que muestra la evolución del motor de combustión al eléctrico pasando por e puente tecnológico que representa el vehículo híbrido (IDAE, 2008).	28
Figura 11. Comparación de la eficiencia energética del pozo a las ruedas entre un vehículo eléctrico y uno de gasolina (modificación de Berry et al., 2009).	29
Figura 12. Demanda de energía eléctrica del día 25 de Febrero de 2010. En la figura de la derecha se muestra la demanda correspondiente a energía eólica, y se observa la desconexión debida a la bajada de la demanda (resaltado con un círculo en rojo) (modificación de REE, 2011a).	31
Figura 13. Escenarios de recarga del vehículo eléctrico. De izquierda a derecha: horas punta-horas valle-horas valle con gestión de demanda (REE, 2011c).	32
Figura 14. Comparación del mix energético del escenario base para el sistema del oeste de EEUU en 2001 (izquierda) y del escenario futuro de recarga en horas valle con el incremento de las fuentes de energía NGST y NGCC (Jansen et al., 2010).	34
Figura 15. Cincuenta primeras empresas a nivel mundial en número de ingresos. En naranja las del sector de refino de petróleo y en azul las de fabricación de vehículos (WWF, 2008).	36
Figura 16. Evolución de la venta de vehículos por tipo estimada en el escenario BLUE Map (IEA, 2009).	37
Figura 17. Ejemplos de vehículos eléctricos en circulación en España. De izquierda a derecha y de arriba abajo: vehículo perteneciente a la flota adquirida por Correos, vehículo de limpieza de Badajoz, vehículo de limpieza de la ciudad de Barcelona y modelo de Honda que circulará por Barcelona en el marco de un proyecto piloto para probar la viabilidad de la motocicleta eléctrica en Europa.	38
Figura 18. Porcentaje del modo de transporte utilizado en las ciudades con más de 500,000 habitantes (círculo exterior) y ciudades con más de 50,000 habitantes y menos de 500,000 (círculo interior) (M. Fomento, 2008).	41
Figura 19. Aplicación de la Low Emission Zone en Londres. Arriba, mapa de la zona que delimita la LEZ con las principales vías afectadas que incluyen algunas autopistas (TLondon, 2011). Abajo-izquierda: Concentración promedio anual de PM ₁₀ (µg/m ³) proyectada para 2011 teniendo en cuenta la reducción de emisiones de la LEZ (MAYO, 2010); y abajo-derecha: proyección para 2011 de la concentración anual promedio de NO ₂ (µg/m ³) (MAYO, 2010).	43
Figura 20. Diagrama con las medidas para la mejora de la calidad del aire urbano mediante la reducción de las emisiones de tráfico completado con las publicaciones del grupo de Ciencias de la Tierra del BSC-CNS.	44



Figura 21. Estructura del modelo de emisiones HERMES.	49
Figura 22. Sistema de modelización meteorológica mesoscalar WRF.	50
Figura 23. Estructura del modelo de calidad del aire CMAQ.	51
Figura 24. Supercomputador MareNostrum ubicado en el BSC-CNS	52



1 Resumen

A pesar de la reducción en la emisión de contaminantes atmosféricos de los últimos años, los niveles de calidad del aire en Europa y España siguen superando los valores límite legislados. Dichas superaciones, debidas principalmente a material particulado y dióxido de nitrógeno, se localizan especialmente en las ciudades, donde la mayor fuente de emisión es el tráfico rodado. Referente a las emisiones de tráfico, en Europa, el incremento de la intensidad de tráfico y la dieselización del parque vehicular, han dificultado la reducción de las emisiones debidas a tráfico, a pesar de la progresiva introducción de estándares de emisión más restrictivos.

A nivel Europeo, se está apostando en dos direcciones simultáneamente. Por un lado, la gestión de la movilidad. Y, por el otro, la promoción de los vehículos limpios y energéticamente eficientes mediante dos vías de acción. La primera, la progresiva reducción de las emisiones de los vehículos de combustión interna, gracias a: mejoras tecnológicas y a la introducción de combustibles alternativos. La segunda, la introducción de nuevos sistemas de propulsión, más eficientes y menos contaminantes, cuyo mayor exponente actualmente es el vehículo eléctrico.

El presente trabajo hace un repaso al panorama actual de las medidas de reducción de las emisiones de tráfico y su efecto en la calidad del aire. A continuación, se examina el potencial que representa el vehículo eléctrico, el cual presenta dos ventajas en cuanto a reducción de emisiones. La primera es que el vehículo no tiene emisiones de tubo de escape o combustión, con lo que se reducen las emisiones directas en el entorno urbano. No obstante, las emisiones se trasladan a la generación de energía. La segunda ventaja es que la eficiencia energética total (desde la extracción del combustible fósil a la tracción de las ruedas del vehículo), es mayor en los vehículos eléctricos que en los convencionales de combustión, por lo que las emisiones totales también se reducen. Además, si se considera un mix energético basado en energías renovables y/o nuclear, las emisiones son nulas. Los principales retos tecnológicos que presenta la implantación del vehículo eléctrico están relacionados con la integración de las recargas en el sistema eléctrico y la capacidad de las baterías. No obstante, dicha limitación de capacidad hace al vehículo eléctrico estar especialmente indicado para entornos urbanos, caracterizados por desplazamientos cortos.

Referente a la gestión de la movilidad, no hay una estrategia única, ya que depende mucho de las características de cada ciudad: composición del parque vehicular, orografía, condiciones meteorológicas, etc. No obstante, las líneas generales apuntan a la disminución de los kilómetros recorridos por: los vehículos más contaminantes y el transporte privado.

Dado que ninguna de las medidas planteadas hasta el momento por si sola permite mejorar los niveles de calidad del aire urbano a corto plazo, el objetivo debe ser la introducción de diferentes medidas complementarias. Con ello, se hace necesario el estudio en detalle de cada zona. La Tesis Doctoral se centrará en el análisis mediante herramientas de modelización de las medidas para la mejora de la calidad del aire en las ciudades de Barcelona y Madrid.



2 Introducción

2.1 Contaminación atmosférica

La evolución de la composición normal del aire es un hecho que se viene produciendo incluso desde antes de aparecer el hombre sobre la tierra. Las erupciones volcánicas, terremotos, incendios forestales, emanaciones de pantanos, etc., eran y son fuentes naturales de emisión que inyectan al aire grandes cantidades de sustancias que modifican su composición.

A partir de mediados del siglo XVIII, con la revolución industrial, junto con el gran desarrollo de grandes concentraciones industriales y urbanas, reaparece la contaminación como uno de los problemas más importantes de la sociedad.

Desde el punto de vista científico, se entiende por contaminación atmosférica, la presencia en la atmósfera de sustancias con una concentración superior a sus niveles normales actuales que produce efectos negativos en las personas, animales, vegetación u objetos (Seinfeld and Pandis, 1998).

2.1.1 Contaminantes y efectos.

La contaminación atmosférica es debida a la emisión de contaminantes derivados de la actividad humana (emisiones antropogénicas) como por ejemplo: la producción y consumo de combustibles fósiles, la producción industrial, los medios de transporte, etc. Desde su emisión, los contaminantes (contaminantes primarios) están sujetos a diferentes procesos, que incluyen transporte, difusión y reacción, para dar lugar a otros contaminantes (contaminantes secundarios). Dependiendo de sus características físicas y químicas, así como de las condiciones atmosféricas y de las características físicas del entorno, los contaminantes pueden efectuar un breve (contaminación local y regional) o largo transporte (contaminación transfronteriza) (Monks et al, 2009).

Los principales contaminantes atmosféricos y sus efectos en la salud humana y el medio ambiente son:

- Óxidos de nitrógeno (NO_x): proceden principalmente de procesos de combustión en procesos industriales y transporte, etc. El dióxido de nitrógeno (NO_2), en concentraciones elevadas, puede dar lugar a inflamación de las vías respiratorias y dificultar la respiración. También contribuyen a la eutrofización y acidificación y dan lugar a la formación de material particulado secundario y ozono troposférico (O_3).
- Compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOCs): procedentes de un gran número de fuentes, tanto antropogénicas (por ejemplo la aplicación de pinturas y la combustión), como naturales (como son las emisiones biogénicas). Son juntamente con

- el NO_x precursores de O_3 . Determinadas especies de NMVOCs también tienen efectos para la salud humana (benceno, benzo alfa pirenos, etc.).
- Ozono troposférico (O_3): contaminante secundario formado en la troposfera debido a reacciones fotoquímicas entre NO_x y NMVOC. Las reacciones de formación y destrucción de O_3 dependen de la concentración de sus reactivos dando lugar a la paradoja de que en zonas urbanas, con elevadas emisiones de NO_x , las concentraciones de O_3 son generalmente inferiores a las de zonas rurales. Esto es debido a la destrucción de O_3 mediante reacción con NO , contaminante procedente de procesos de combustión, esencialmente tráfico. Esto explica que, en zonas rurales y de fondo, en las que los niveles de tráfico son bajos, y por lo tanto también las emisiones de NO , los niveles de O_3 son generalmente altos. En cuanto a sus efectos sobre la salud, cabe destacar que el O_3 , a elevadas concentraciones, puede ocasionar problemas cardio-respiratorios a elevadas y dar lugar a muertes prematuras (WHO, 2008).
 - Dióxido de azufre (SO_2): procedente de la quema de combustibles que contienen azufre. Contribuye a la deposición ácida y tiene efectos sobre la salud humana y la vegetación.
 - Amoníaco (NH_3): su principal fuente de emisión (94% en Europa) proviene del sector agricultura debido al uso de fertilizantes (EEA, 2009). Al igual que el NO_x , contribuyen a la eutrofización y acidificación.
 - Material particulado (PM). El PM puede ser tanto un contaminante primario como secundario. El PM primario es emitido directamente en la atmósfera. Y el secundario se forma en la atmósfera mediante oxidación de gases precursores como son: SO_2 , NO_x , NH_3 , y algunos NMVOCs. Las fracciones pequeñas de material particulado; PM_{10} (material particulado con un diámetro igual o inferior a las $10 \mu\text{m}$) y más especialmente $\text{PM}_{2.5}$ (igual o inferior a $2.5 \mu\text{m}$) son particularmente dañinas, ya que pueden penetrar en el sistema respiratorio (WHO, 2004, 2006, 2007).
 - Metales pesados (As, Cd, Pb, Hg y Ni): proceden básicamente de emisiones en procesos industriales. Son persistentes en el medio ambiente y se acumulan en la cadena trófica.

2.1.2 Marco legislativo.

El impacto de la contaminación atmosférica es un tema de vital importancia en el medio ambiente. En Europa, la Directiva 2008/50/CE (CE,2008a) del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa ha modificado el anterior marco regulatorio comunitario, sustituyendo a la Directiva Marco (1996/62/CE) (CE, 1996) juntamente con las conocidas como “Directivas Hijas” (Directiva 1999/30/CE modificada por la Decisión 2001/744/CE, Directiva 2000/69/CE y Directiva 2002/3/CE) y consolidando la Directiva 2004/107/CE (CE,2004) del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente. En la Tabla 1 se resumen los valores límite legislados en materia de calidad del aire.

Tabla 1. Resumen de los valores límite legislados de calidad del aire de la salud humana y protección de vegetación (cursiva), (*) valor objetivo.

Cont.	Periodo	Valor límite u objetivo			Objetivo a largo plazo		Umbrales de información y alerta		
		Valor	Max. superaciones	Fecha aplicación	Fecha con ampliación	Valor	Fecha	Periodo	Umbral
O ₃	Máx. 8h	120 $\mu\text{g m}^{-3}$ *	25 en un periodo de 3años	2010		120 $\mu\text{g m}^{-3}$		1 hora 3 horas	180 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Inf.) 240 $\mu\text{g m}^{-3}$
	<i>Mayo-Julio</i>	<i>AOT40 18000 $\mu\text{g m}^{-3}$ horas prom. en 5 años</i>		<i>2010</i>		<i>AOT40 6000 $\mu\text{g m}^{-3}$ horas</i>			
NO ₂	Hora	200 $\mu\text{g m}^{-3}$	18	2010	2015			3 horas	400 $\mu\text{g m}^{-3}$
	Año	40 $\mu\text{g m}^{-3}$	0						
NO _x	<i>Año civil</i>	<i>30 $\mu\text{g m}^{-3}$</i>							
SO ₂	Hora	350 $\mu\text{g m}^{-3}$	24	2005				3 horas	500 $\mu\text{g m}^{-3}$
	Día	125 $\mu\text{g m}^{-3}$	3	2005					
	<i>Año civil i (oct.-marzo)</i>	<i>20 $\mu\text{g m}^{-3}$</i>							
PM ₁₀	Día	50 $\mu\text{g m}^{-3}$	35	2005	2011				
	Año	40 $\mu\text{g m}^{-3}$	0	2005	2011				
PM _{2.5}	Año	25 $\mu\text{g m}^{-3}$ *	0	2010		8.5 a 18 $\mu\text{g m}^{-3}$	2020		
		20 $\mu\text{g m}^{-3}$		2015					
CO	Máx. 8h	10	0	2005					
C ₆ H ₆	Año	5 $\mu\text{g m}^{-3}$	0	2010	2015				
Pb	Año	0.5 mg m ⁻³ *	0	2005					
As	Año	6 ng m ⁻³ *	0	2013					
Cd	Año	5 ng m ⁻³ *	0	2013					
Ni	Año	20 ng m ⁻³ *	0	2013					
BaP	Año	1 ng m ⁻³ *	0	2013					

Uno de los puntos clave de la nueva Directiva 2008/50/CE es la regulación para nuevos contaminantes, como las partículas de tamaño inferior a 2,5 micrómetros ($PM_{2,5}$), y los nuevos requisitos en cuanto a la evaluación y la gestión de la calidad del aire ambiente.

Uno de los puntos en los que la Comisión Europea ha mostrado una mayor preocupación, es la necesidad de desarrollar acciones que permitan aumentar los conocimientos sobre el transporte y dinámica de contaminantes, para asegurar el cumplimiento de la legislación vigente e informar a la población sobre los niveles de contaminantes a los que se ve sometida. La regulación es especialmente exigente cuando se sobrepasan determinados niveles umbrales, en cuyo caso se demanda un diagnóstico detallado de aquellas áreas territoriales en las que se producen los excesos y la previsión de la evolución de los niveles de inmisión. De igual modo, la Directiva establece, en sus artículos 6,7,10 y 14, la posibilidad de usar técnicas de modelización para evaluar la calidad del aire.

La Directiva 2008/50/CE ha sido incorporada al derecho interno Español mediante el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

Por otro lado, la Directiva 2001/81/CE (EC, 2001a) del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos. La cual tiene como objeto limitar las emisiones de contaminantes acidificantes y eutrofizantes y de precursores de ozono, para reforzar la protección del medio ambiente y de la salud humana frente a los riesgos de los efectos nocivos de la acidificación, la eutrofización del suelo y el ozono en la baja atmosfera, y avanzar hacia el objetivo a largo plazo de no superar las cargas y los niveles críticos y de proteger de forma eficaz a toda la población frente a los riesgos conocidos para la salud que se derivan de la contaminación atmosférica mediante la fijación de techos nacionales de emisión.

La Directiva se aplica a todas las fuentes resultantes de actividades humanas de los siguientes contaminantes: amoniaco (NH_3); óxidos de nitrógeno (NO_x); compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC) y dióxido de azufre (SO_2) (Tabla 2). Para alcanzar su cometido, la Directiva establece unos techos nacionales de emisión para el año 2010. En particular, para el caso de España estos techos son los siguientes:

Tabla 2. Techo de emisiones para España en 2010.

Contaminante	NO_x	NMVOC	SO_x	NH_3
Emisiones (kt)	847	662	746	353

A nivel Español, mediante la RESOLUCIÓN de 14 de enero de 2008 (SGPCCC, 2008), de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, se aprueba el II Programa Nacional de Reducción de Emisiones, conforme a la Directiva 2001/81/CE.

2.2 Panorama actual de la calidad del aire en Europa: situación y causas

En este apartado se analiza el estado actual de la calidad del aire en Europa y se identifican las principales fuentes emisoras de contaminantes. Entre ellas se destaca el transporte como principal fuente de emisión y se analiza su evolución en los últimos años. Se ha optado por centrar el análisis introductorio en Europa, presentando más en detalle la situación en España. Europa engloba, en estos momentos, 27 estados miembros y de su análisis se pueden extraer las principales realidades y retos que plantea la calidad del aire actualmente. Además, otra ventaja que aporta Europa es la uniformidad en cuanto a metodologías y distribución homogénea de datos frente a datos más globales.

2.2.1 Emisiones atmosféricas en Europa

Las emisiones totales de contaminantes atmosféricos han descendido en Europa en los últimos años (EEA, 2010a) (Figura 1). Para poder entender dichas reducciones, es preciso analizar contaminante por contaminante y sus principales fuentes de emisión.

Referente a NO_x , las emisiones han mantenido un descenso sostenido en términos generales a lo largo del período 1990-2008 (39%). Esto es el resultado de reducciones en los dos principales sectores emisores de NO_x : tráfico rodado y combustión estacionaria. En primer lugar, las reducciones en tráfico rodado son el resultado de la introducción del catalizador de tres vías (Twig, 2011) y las estrictas limitaciones para vehículos pesados impuestas a nivel Europeo (CE, 2007a). En segundo lugar, la introducción de nuevas tecnologías, así como el tratamiento de gases antes de su emisión a la atmósfera y la conversión del uso de carbón a gas natural, ha propiciado una reducción de las emisiones de Combustión estacionaria.

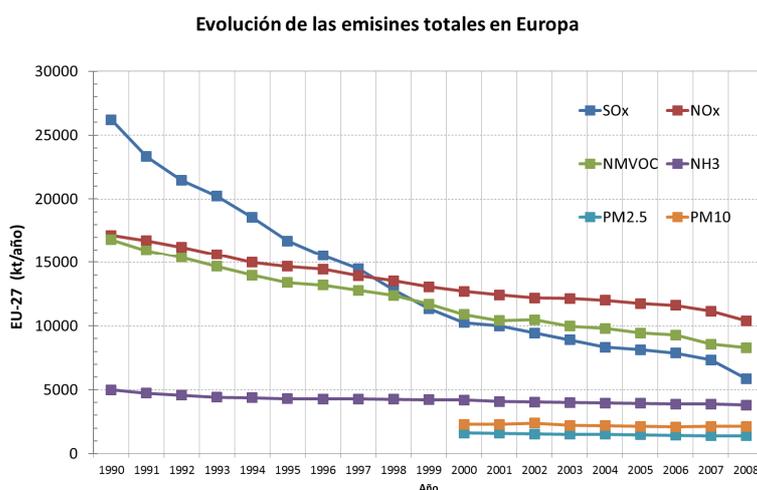


Figura 1. Evolución de las emisiones totales en Europa (EU-27) en el período 1990-2008 (EEA, 2010a).

A pesar de dichas medidas, los sectores de generación eléctrica y transporte rodado son los principales emisores de NO_x a nivel Europeo (Figura 2). En 2008, el 37% de las emisiones de NO_x fueron debidas a transporte rodado-1A3b (turismos; 19% y vehículos pesado; 18%). Por otro lado, las emisiones debidas a la combustión estacionaria-generación de energía (1A1a) representaban el 17% y las de combustión estacionaria en la Industria (1A2fi) representaban el 8%. Es decir, que las cuatro actividades con mayores emisiones de NO_x representaban, en 2008, el 62% de las emisiones totales. Dado el alto porcentaje de emisiones debidas a dichas actividades, dentro del objetivo de reducir los niveles totales de NO_x, un punto clave es la reducción de las emisiones de estas actividades. Con el objetivo de facilitar la lectura del documento, no se han incluido las correspondientes gráficas para el resto de contaminantes.

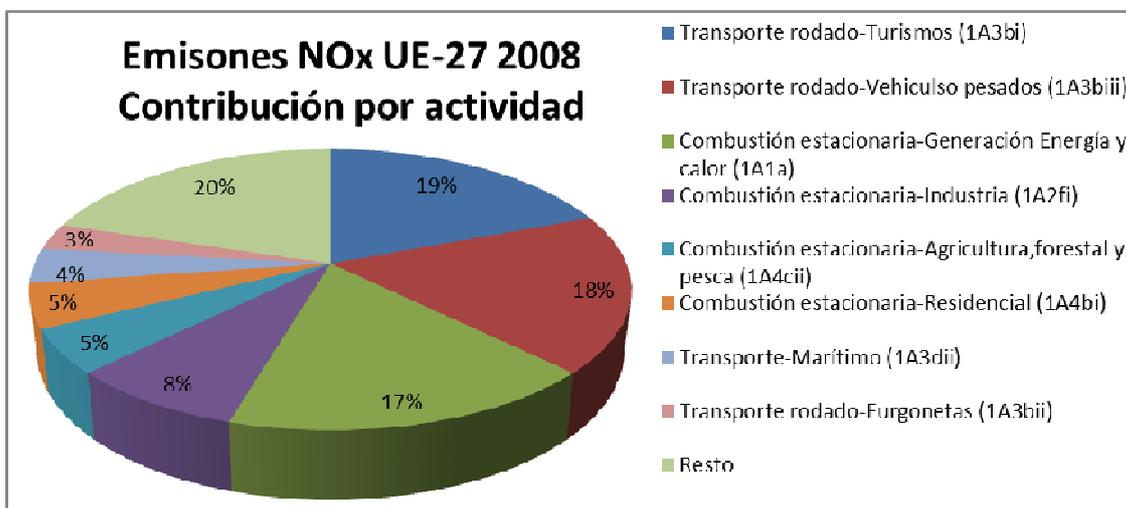


Figura 2. Emisiones de NO_x por sector de emisión en Europa (EU-27) (EEA, 2010).

Las emisiones de NO_x, que muestran una tendencia a la baja en el período 1990-2008 han descendido entre 2007 y 2008 un 6.8%, debido a una disminución en las emisiones reportadas por determinados Estados Miembros, entre los que se encuentran: España, Francia y Reino Unido, especialmente en lo que a generación de energía se refiere. Igualmente, las emisiones de transporte rodado han disminuido significativamente en dichos estados miembros debido, en parte, a una disminución del transporte de mercancías resultante de la actual crisis económica. En el caso concreto de España, las emisiones de NO_x muestran un aumento durante el periodo 1990-2007 de 1341 a 1416 Gg (aumento igual a 6%), disminuyendo a 1236 Gg en 2008 (disminución 2007-2008 del a 13%).

Respecto a PM, los datos también muestran una ligera tendencia a la baja. Las emisiones de PM₁₀ correspondientes al periodo 2000-2008 han descendido un 8% y las de PM_{2.5} un 13%. A nivel Europeo, la principal fuente de emisión de PM, tanto para PM_{2.5} como para PM₁₀, es debida al sector combustión estacionaria doméstica (1A4bi) (28 y 35%, PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente). Las emisiones debidas al transporte rodado-turismos (1A3bi) son inferiores (4 y 5%, PM₁₀ y PM_{2.5}). En

el conjunto de Europa y más concretamente en los países del norte de Europa, las emisiones de PM se ven claramente influenciadas por las emisiones debidas a combustión doméstica. En España las emisiones del sector de plantas de combustión no industrial son inferiores al del conjunto de Europa (15 y 18% del total, PM₁₀ y PM_{2.5}). A nivel Español las emisiones debidas a tráfico rodado (16 y 17% del total, PM₁₀ y PM_{2.5}) y a otros modos de transporte (33 y 43% PM₁₀ y PM_{2.5}) son porcentualmente más significativas. Las emisiones de PM han ido aumentando ligeramente durante el período 2000-2007, para en 2008 descender. En 2008, se observa una reducción respecto a 2007 (9 y 7%, PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente), debida a la actual crisis económica.

En lo que a emisiones de SO_x se refiere, se han reducido considerablemente en Europa para el período 1990-2008 (78%). Especialmente importante ha sido el descenso entre 2007-2008 (20%) debido principalmente a la reducción de las emisiones reportadas por Bulgaria, Polonia y España. Dichas reducciones son resultado de una bajada en las emisiones de Generación eléctrica (1A1a), especialmente de centrales térmicas de carbón. A pesar de ello, dicho sector sigue siendo el que reporta mayores emisiones (54%). En España las emisiones estimadas han descendido a lo largo del periodo 1990-2008 (76%). No obstante, las emisiones de 2007-2008 muestran el descenso interanual más significativo (55%). Como se ha dicho anteriormente, este descenso en España se atribuye al sector de generación eléctrica, debido a la sustitución de combustibles por otros con un menor contenido de azufre (caso de carbón por gas natural) y a la irrupción de energías renovables (energía eólica y solar) sustituyendo a aquellas que dependen de los combustibles fósiles (EEA, 2010a).

En el caso de NMVOCs y CO sus emisiones han mostrado un descenso continuado durante todo el período 1990-2008 en Europa (58 y 51%, respectivamente). En ambos casos, la causa es la drástica reducción de las emisiones debidas al transporte rodado-turismos (1A3bi), resultado de la implementación de los estándares Europeos (referencia) y del catalizador de vías.

Cabe señalar que, a nivel Español, ya ha sido publicado el Inventario de Emisiones a la Atmósfera de España (serie 1990-2009) (MARM, 2010a). Dicho inventario completa los datos presentados en este documento para España con las emisiones de 2009 y ajusta las estimaciones de años previos.

2.2.2 Estado de la calidad del aire en Europa

A nivel Europeo, se establece un intercambio recíproco de datos de las estaciones de calidad del aire en los Estados miembros (CE, 1997 y 2001b). Un total de 36 países se han sumado a la iniciativa, incluyendo los 27 Estados miembros, y han proporcionado datos de calidad del aire para el año 2008, que viene a completar la información de series anteriores (AirBase). Basándose en dicha base de datos, la European Environmental Agency (EEA) y su European Topic Centre on Air and Climate Change (CTC/ACC) publican anualmente el estado de la calidad del aire en Europa; siendo la última edición: *The estate of the air quality in 2008* (ETC/ACC, 2010).

Se observa cómo, en primer lugar, a pesar de que las emisiones han disminuido significativamente en los últimos años (EEA, 2010a), los niveles de inmisión de algunos contaminantes como por

ejemplo PM, NO_x y O₃ no han disminuido de forma tan significativa (EEA, 2010b) (Figura 3). En cambio, las medidas de reducción en materia de emisiones respecto a CO y SO₂, sí que ha propiciado un descenso claro en los niveles de inmisión de dichos contaminantes.

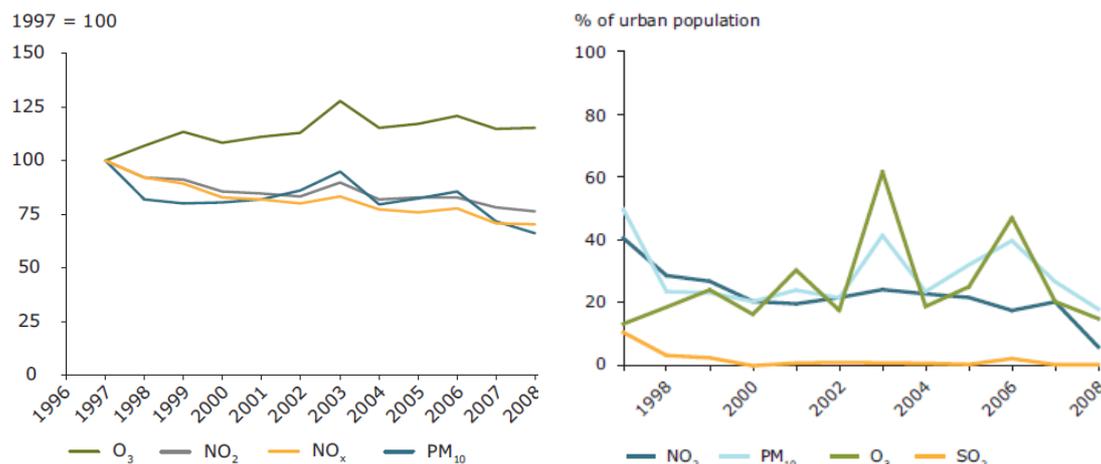


Figura 3. Evolución de los niveles de inmisión en Europa. (Izquierda) Evolución de los niveles medios anuales de inmisión en Europa teniendo en cuenta estaciones: fondo, suburbanas y urbana. El nivel de 100 corresponde al nivel de 1997 (EEA, 2010b). (Derecha) Porcentaje de población residente en zonas urbanas en las que los niveles de inmisión son superiores a los límites legislados (EEA, 2010c).

En lo que a niveles de NO₂ se refiere, mientras que en gran parte de Europa los niveles de inmisión disminuyen, en la Península Ibérica y Austria se observan incrementos en algunas estaciones. Estas tendencias son acordes a la evolución de las emisiones. Las superaciones se encuentran esencialmente en estaciones de tráfico (46% de las estaciones de tráfico superaron el valor límite anual) (ETC/ACC, 2010). La razón es el incremento en el número de kilómetros realizados por vehículo y la *dieselización* del parque móvil (incremento del número de vehículos diesel respecto el de gasolina) (EEA, 2010b).

Respecto a PM, en las zonas con gran densidad de población los niveles de PM₁₀ no han variado desde el año 2000. Una de las razones principales es que las emisiones de tráfico rodado se han mantenido prácticamente invariables en estas zonas. El incremento del volumen de tráfico y la *dieselización* del parque móvil ha propiciado que el resto de medidas acometidas en materia de PM se hayan visto amortiguadas (EEA, 2010b). Los niveles de PM₁₀ muestran una ligera tendencia a disminuir. No obstante, los datos observados sobrepasan los valores límite anuales y, más especialmente, los diarios tanto en estaciones de tráfico (más del 32% de las estaciones de tráfico superan el valor límite diario) y urbanas de fondo (28%). Las observaciones de PM_{2,5} para 2008 no abarcan todo el territorio Europeo de forma homogénea, por lo que no se pueden sacar conclusiones generales. No obstante, en base a los datos disponibles, el valor objetivo anual se supera en el 10% de las estaciones disponibles, principalmente suburbanas e industriales.

El O₃ muestra, más que ningún otro contaminante, variabilidad interanual debido a las condiciones meteorológicas concretas de cada año. En 2008 los niveles límite se han sobrepasado amplia y frecuentemente en toda Europa.

Finalmente, los niveles de SO₂ y CO muestran una progresiva disminución. Tan solo en un limitado número de estaciones los niveles de SO₂ muestran superaciones de los niveles límite para la salud humana.

Dado que el 75% de la población en Europa vive en áreas urbanas y se estima que para 2020 dicho porcentaje aumente hasta el 80% (EEA, 2010c), es preciso analizar más en detalle los niveles de calidad del aire en zonas urbanas. Los niveles de NO_x, PM y O₃ en las zonas urbanas no han disminuido en los últimos años. Se estima que, durante el período 1997-2008, entre el 13 y el 62% de la población urbana en Europa se ha visto expuesta a niveles superiores a los fijados por 2008/50/CE (Figura 3). El número de gente afectada varía anualmente, resultado de la variabilidad de las condiciones meteorológicas y dispersivas y de las emisiones.

En España, los contaminantes primarios que presentan problemas para cumplir con los límites establecidos de calidad del aire para 2009 son NO₂ y PM₁₀ (MARM, 2010b). Para NO₂ las superaciones se observan en las principales aglomeraciones metropolitanas (Figura 4), donde la fuente de emisión principal es el tráfico. Los niveles observados son prácticamente iguales a los de años anteriores. Referente a PM₁₀, los niveles de 2009 muestran una mejoría respecto a años anteriores. Los niveles más elevados se encuentran nuevamente en las principales aglomeraciones y en la zona industrial de Asturias (niveles de PM₁₀ descontando las intrusiones de polvo sahariano). Respecto a los niveles de O₃, éstos son elevados a sotavento de zonas suburbanas o rurales, debido a que se mantienen los niveles de emisión de sus precursores (contaminantes primarios).

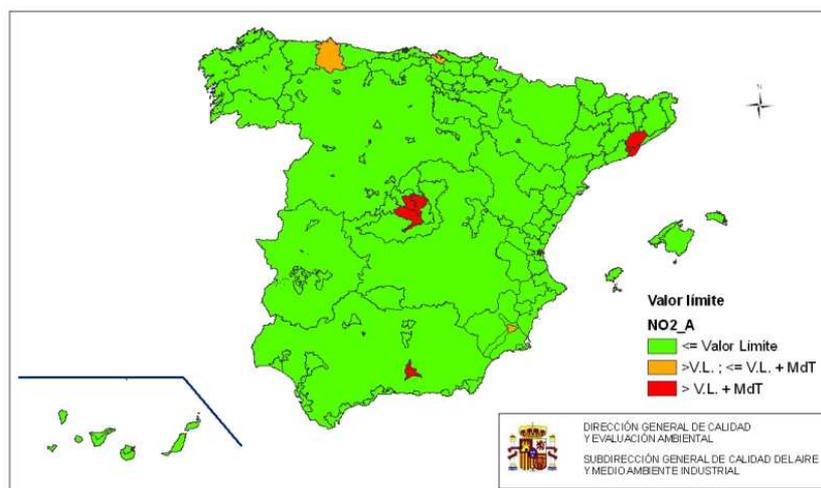


Figura 4. Concentración promedio anual de NO₂ (MARM, 2010b). Niveles más elevados en las áreas metropolitanas de Madrid, Barcelona y Granada.

2.2.3 Transporte

Como se ha indicado en los dos puntos anteriores, la calidad del aire en Europa, y por extensión en España, se ve claramente influenciada por el transporte rodado, especialmente en las zonas urbanas. Desde hace años las administraciones están tomando medidas para reducir las emisiones por vehículo (estándares Euro, apartado 3.1.1). No obstante, el constante y sostenido aumento en la intensidad de tráfico da lugar a que las emisiones totales de tráfico no disminuyan al ritmo esperable. En este sentido, es necesaria la adopción de nuevas medidas que permitan reducir sustancialmente las emisiones de tráfico.

A nivel Europeo (UE-27) el tráfico total de pasajeros (considerando desplazamientos en coche, barco, avión, autobús y tren) ha aumentado un 1.2% el número de pasajeros por kilómetro entre 2006 y 2007, ligeramente por debajo de la tendencia de los últimos años. El tráfico vehicular comprende el 72% del total. El transporte por avión de pasajeros ha experimentado un considerable incremento entre 1997 y 2007, llegando a representar actualmente el 9% del número de pasajeros por kilómetro recorrido (EEA, 2010d).

Referente al transporte de mercancías, entre 1997 y 2007 el número de toneladas-kilómetro ha aumentado un 34% en total, debido al incremento de transporte rodado y por avión (incrementos del 43% y del 35%, respectivamente). Por el contrario, el transporte de mercancías ferroviario ha aumentado ligeramente (10%), dando lugar a una pérdida de representatividad frente a transporte rodado y avión.

A nivel español, el tráfico rodado ha aumentado un 21% en el período 2000-2008 (Eurostat, 2011). Junto con el incremento de la intensidad de tráfico, otro aspecto que se ha señalado como una de las principales causas de los elevados niveles de inmisión de NO₂ es la *dieselización* del parque vehicular. Es decir, el incremento relativo del consumo de diesel respecto a gasolina. El consumo total de carburantes debidos a automoción ha aumentado en el periodo 1993-2010 (M. Fomento, 2011). No obstante, mientras que el consumo de gasolina ha disminuido (-31%), el de gasoil se ha incrementado significativamente (86%) (Figura 5). En 2010, el 74% de los turismos nuevos matriculados, el 90% de los vehículos ligeros y el 100% de los camiones utilizan diesel como combustible (ANFAC, 2011a).

En los núcleos poblados la intensidad de tráfico ha aumentado siguiendo la tendencia general. El transporte total urbano ha crecido en España un 19% en el periodo 1996-2010 (Figura 6). El año 2007, previo a la actual crisis económica, presenta un valor máximo igual a 3,053,790,000 viajeros urbanos, lo cual representa un incremento respecto a 1996 del 25% (INE, 2011).

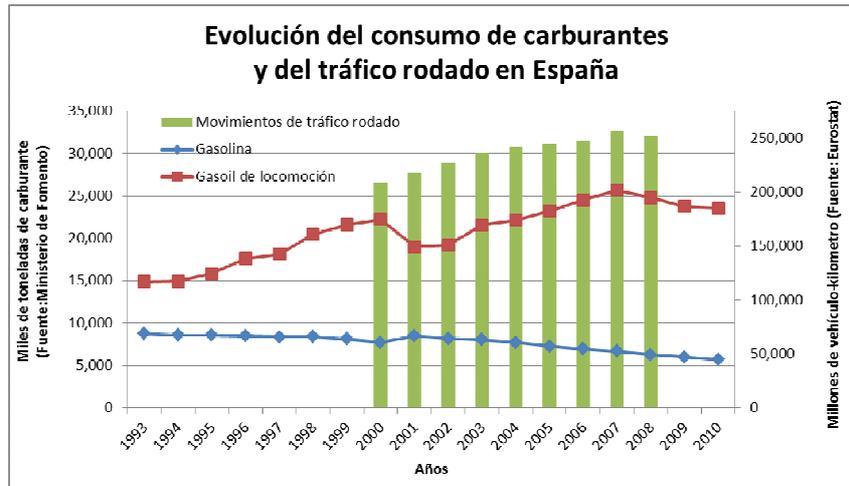


Figura 5. Evolución del consumo de carburantes; gasolina (azul) y gasoil (rojo) (Fuente: Ministerio de Fomento, 2011). Incremento del número de vehículos por km (verde) (Fuente: Eurostat, 2011).

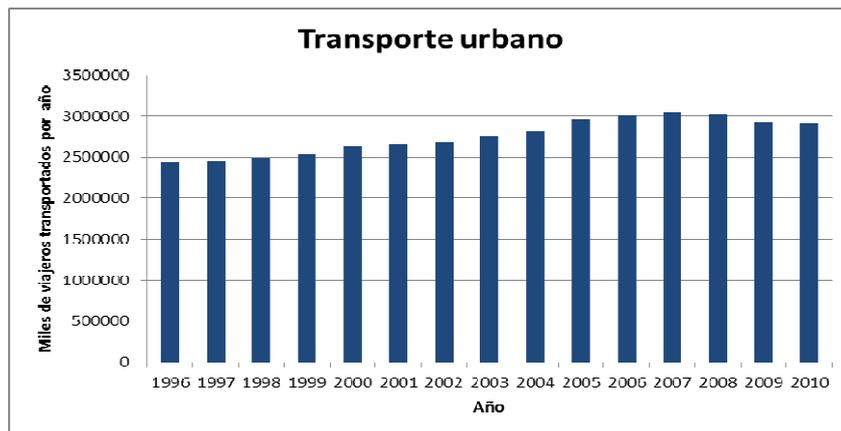


Figura 6. Evolución del transporte urbano en España (Fuente: INE, 2011).

3 Gestión de la calidad del aire en una ciudad: tráfico

Actualmente, la mejora de la calidad del aire en las zonas urbanas es un importante reto en materia de medio ambiente (Fenger,1999; Baldasano et al., 2003). Debido a que el tráfico rodado es la principal fuente de emisiones en un entorno urbano, las administraciones están dirigiendo sus esfuerzos en la disminución de las emisiones (Colville et al., 2001; Querol et al., 2001; Artiñano et al., 2004; Ghose et al., 2004; Nagl et al., 2007).

Con el objetivo de mejorar la calidad del aire en una ciudad, se pueden abordar un conjunto de medidas relativas a tráfico de tipología muy variada (Figura 7). El presente documento se centra en aquellos planes y medidas estratégicas dirigidos a la mejora de la calidad del aire en las ciudades. Estas son: la gestión de la movilidad y la renovación del parque con vehículos cada vez más eficientes y con menores emisiones. Dicha renovación debe ir encaminada en dos direcciones: por un lado, la constante reducción de las emisiones de los vehículos convencionales, y por el otro la introducción de nuevos sistemas como es el caso del vehículo eléctrico. Tanto la gestión de la movilidad como los vehículos menos contaminantes, son las direcciones en las que se está apostando a nivel Europeo, tal y como muestra, la elaboración de *Libro blanco del transporte* y su correspondiente revisión (COM, 2006), el *Libro Verde Hacia una nueva cultura de movilidad urbana* (COM, 2007), *Action Plan on Urban mobility* (COM, 2009) y la *Estrategia europea sobre vehículos limpios y energéticamente eficientes* (COM, 2010).

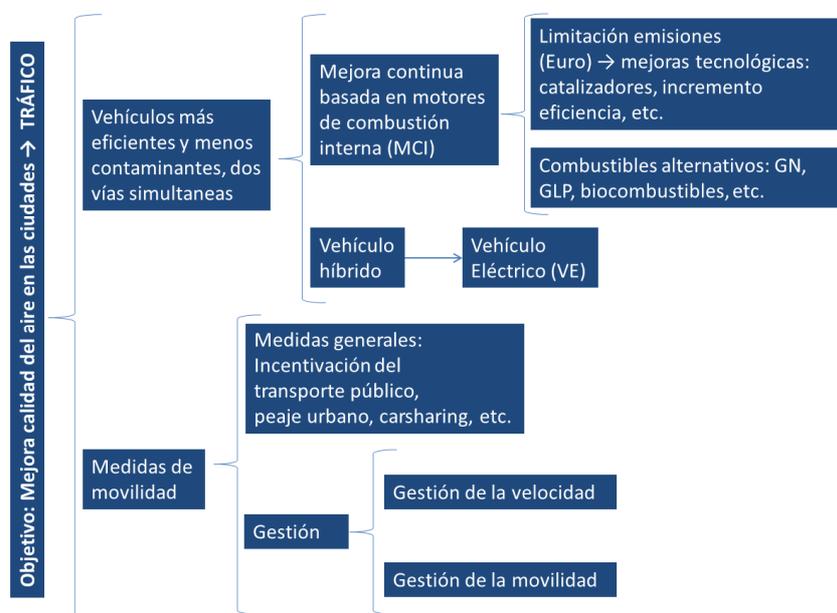


Figura 7. Diagrama con las medidas para la mejora de la calidad del aire urbano mediante la reducción de las emisiones de tráfico.

3.1 Panorama actual de la gestión de la calidad del aire en las ciudades, mejoras tecnológicas y uso de combustibles alternativos.

En los últimos años, los vehículos han reducido su impacto en la calidad del aire gracias a la disminución de sus emisiones y al aumento de la eficiencia energética (Valerio et al., 2008, Dwyer et al., 2010). Estas mejoras se han aplicado en vehículos convencionales basados en motores de combustión interna (MCI) y van encaminadas hacia:

- Mejoras tecnológicas (limitación emisiones, estándares Euro)
- Uso de combustibles alternativos en MCI.

3.1.1 Limitación de las emisiones, estándares Euro

Diferentes mejoras tecnológicas han permitido un progresivo descenso de las emisiones debidas a tráfico en los últimos años. A nivel europeo, dichos descensos han sido promovidos mediante los estándares de emisión para tráfico cada vez más restrictivos; estándares Euro, establecidos en una serie de directivas europeas que modifican la directiva 70/220/CE de 1970 (CE, 1970). En la Figura 8 tal se muestra el continuo descenso de las emisiones para turismos diesel marcados por los estándares Euro. El actual marco regulatorio en materia de emisiones de contaminantes atmosféricos de tráfico viene definido por el Reglamento nº 715/2007 (CE, 2007a). Modificado a continuación por la Regulación 692/2008 (CE, 2008b). Las principales medidas en materia legislativa que han permitido una progresiva reducción de las emisiones hasta llegar al actual marco han sido:

- Euro 1(1993): Directivas 91/441/EEC (turismos) y 93/59/EEC (turismos y camiones ligeros).
- Euro 2 (1996): Directivas 94/12/EC y 96/69/EC.
- Euro 3/4 (2000/2005): Directiva 98/69/CE , nuevas enmiendas en 2002/80/CE.
- Euro 5/6 (2009/2014): Regulación 715/2007 (a nivel político) y Regulación 692/2008 (implantación de la legislación).

Estos estándares dependen del tipo de vehículo y son de obligado cumplimiento para todo vehículo que se venda en Europa una vez entrada en vigor la correspondiente directiva. No obstante, no es de aplicación a los vehículos ya en circulación.

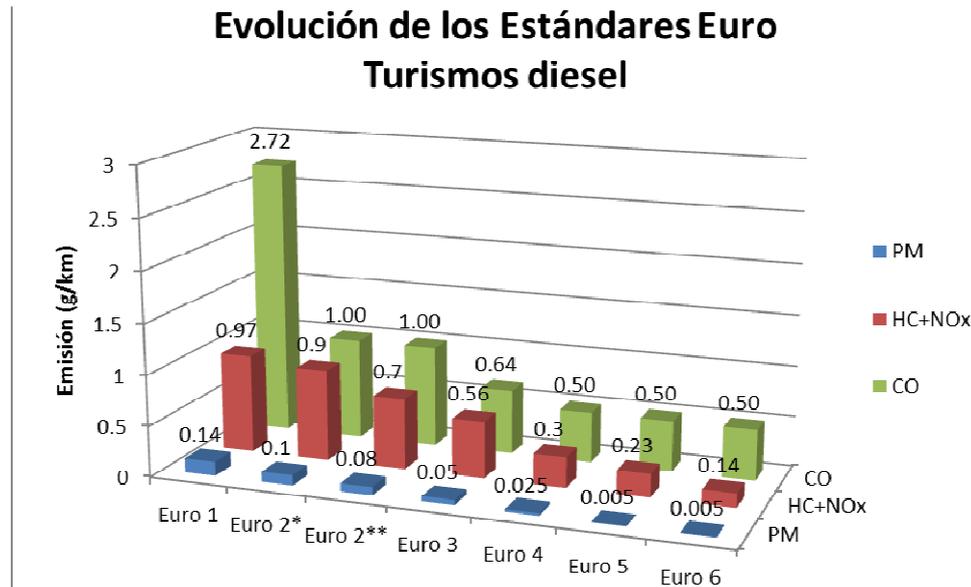


Figura 8. Reducción de las emisiones de tráfico en turismos diesel acorde a los estándares Euro. (*Previo a 30-9-1999, **Posterior a 30-9-1999) (Fuente: Dieselnet, 2010).

Las normativas Euro no obligan a emplear un tipo de tecnología específico, pero sus estándares están basados en las tecnologías disponibles y económicamente viables de acuerdo a un procedimiento establecido de homologación. A continuación se enumeran las principales evoluciones tecnológicas de los vehículos basados en MCI introducidos en los últimos años:

- Catalizadores. La introducción de catalizadores ha sido uno de los mayores avances en la reducción de emisiones desde su obligatoriedad en 1993 en Europa (Twigg et al., 2011).

Los motores de gasolina disponen de “catalizadores de tres vías”, formados por un catalizador de reducción y uno de oxidación con el fin de reducir las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

En cambio, los motores diesel están diseñados para trabajar con exceso de aire lo que imposibilita los catalizadores de reducción. Por lo tanto, estos motores sólo llevan catalizadores de oxidación, que permiten reducir las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y determinadas partículas presentes en los gases de escape.

- Disminución y reducción del peso de los vehículos. La evolución en los materiales empleados para su construcción ha dado lugar a una reducción del consumo y de las emisiones de los vehículos.
- Incremento de la eficiencia del motor. Los principales avances se han obtenido en motores diesel, lo que ha contribuido a su creciente expansión, dando lugar a la dieselización del parque vehicular (FITSA, 2008).

- Filtros de partículas diésel que filtran hasta el 90% de las partículas (Bergmann et al., 2009).
- Tratamiento de los gases de salida mediante una reducción catalítica selectiva (SCR). Esta medida que consiste en un catalizador avanzado que elimina el NO_x ya formado.
- Vehículos híbridos que combinan un motor eléctrico alimentado por baterías y un MCI. Dado que el vehículo híbrido es la primera etapa en la implantación del VE en el apartado 3.2.1 se hablará más extensamente de sus características.

Desde el punto de vista de calidad del aire, las mejoras tecnológicas y el consiguiente descenso de las emisiones de tráfico permite reducir significativamente los niveles de inmisión (Van Wee et al., 2000; Dill, 2004). A nivel Español, sendos estudios; uno centrado en Madrid (Lumbreras et al., 2008a), y otro centrado en Barcelona (Soret et al., 2011), muestran como la proyección del parque vehicular mediante la adopción de estándares de emisión más restrictivos permitiría mejorar los niveles de calidad del aire en ambas ciudades. Especialmente significativa sería la reducción de CO y SO₂ (Soret et al., 2011). No obstante, estos estudios también concluyen que a pesar de dichas reducciones, los niveles de inmisión seguirían siendo elevados y requerirían de otras medidas complementarias.

Las administraciones son conscientes del elevado potencial que presenta la renovación del parque vehicular en materia de calidad del aire urbano. Es por ello que mediante la aprobación de planes, han incentivado la sustitución de vehículos viejos por otros nuevos menos contaminantes (en España: Plan 2000E, Plan VIVE, Plan PREVER, Plan RENOVE).

3.1.2 Combustibles alternativos en los vehículos de combustión interna.

A medida que el número de vehículos aumenta, se incrementa más la necesidad de buscar alternativas a los combustibles fósiles convencionales (gasolina y gasoil). En el presente apartado se hace un repaso a los combustibles alternativos basados en el MCI que pueden sustituir a los combustibles convencionales.

Los biocombustibles líquidos, como el etanol y el biodiesel, pueden mezclarse con combustibles líquidos convencionales hasta una determinada proporción y utilizarse en los motores de combustión existentes. La directiva 2009/30/CE (CE, 2009a) establece las cantidades máximas de biocombustible en mezcla sin etiquetado especial, que en el caso del biodiesel es del 7%. Referente a la mezcla de bioetanol y gasolina, dependerá de la presión de vapor de la gasolina. La incorporación de etanol a la gasolina aumenta la presión de vapor en el combustible resultante, por lo que debe controlarse la presión de vapor de gasolina para limitar la liberación de contaminantes a la atmósfera.

Debido a las limitaciones de los biocombustibles de primera generación (biodiesel y bioetanol), principalmente por sus requisitos de grandes extensiones de cultivo para la producción de los

mismos, se están desarrollando una serie de biocarburantes de segunda generación que permiten utilizar la totalidad de la planta (biomasa lignocelulósica) como materia prima, por lo que necesitan menos extensiones de terreno. Los biocarburantes de segunda generación incluyen el BTL (Biomass To Liquid), el bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica y el biogás.

Más allá de los biocombustibles líquidos, el uso de combustibles alternativos, debido a su estado gaseoso, requieren: la modificación de los motores de combustión, un sistema de almacenamiento de combustible específico a bordo y una red de abastecimiento suficientemente extensa. Estos son:

- Gas natural: aunque el gas natural es un combustible fósil, su combustión tiene menores emisiones, tal y como se explica a continuación. Debido a que es un gas en condiciones normales, éste debe ser almacenado en un estado comprimido; gas natural comprimido (GNC), o en estado líquido; gas natural licuado (GNL).
- Gas licuado de petróleo (GLP): es una mezcla de propano y butano. Se obtiene a partir de procesos de refinado y de los yacimientos de gas natural.
- Biogás: producido mediante la digestión anaerobia de materia orgánica fertilizable, normalmente se utiliza para impulsar turbinas de gas y producir electricidad. Sin embargo, si se depura previamente mejorando su calidad, también se puede usar como combustible en vehículos.
- Combustibles sintéticos: obtenidos mediante procesos termoquímicos a partir de diferentes materias primas: gas natural (GTL), carbón (CTL) y biomasa (BTL).

Finalmente, se debe mencionar el hidrógeno. Por vehículo de hidrógeno se entienden dos tipos muy diferentes: por un lado, el motor de hidrógeno; y por el otro, la pila de hidrógeno. El motor de hidrógeno está basado en un MCI cuyo combustible es el hidrógeno, aprovechando que es el combustible con una mayor ratio potencia/peso (CADS, 2010). Durante la combustión únicamente se produce calor y vapor de agua sin prácticamente emisiones de gases contaminantes (tan solo ligeras cantidades de NOx) ni de efecto invernadero (FITSA, 2008).

La pila de hidrógeno o pila de combustible, consiste en un motor eléctrico conectado a una pila que obtiene la electricidad mediante la hidrólisis del hidrógeno y oxígeno. El punto clave de esta tecnología es la obtención de hidrógeno, tanto la materia prima utilizada como la fuente de energía utilizada. Actualmente, la tecnología más madura para la obtención de hidrógeno es a partir de gas natural por sistemas de conversión química (CADS, 2010). No obstante, el objetivo es poder utilizar fuentes de energía renovables para la obtención de hidrógeno mediante la hidrólisis del agua y utilizar así el hidrógeno como vector energético.

Tabla 3. Cuadro con las ventajas e inconvenientes de cada combustible alternativo.

Combustibles Alternativos	Ventajas	Inconvenientes
Biodiésel	Fuente de energía renovable Aumenta la seguridad de abastecimiento energético. Ahorra energía primaria. Reducción de emisiones de CO ₂ Reducción de contaminantes atmosféricos (CO, COVs, SO ₂ , PM, Metales pesado)	Grandes extensiones de terreno requeridas Puede interferir en el mercado de la alimentación. Baja rentabilidad Ligero aumento de las emisiones de NOx. Menos energía por unidad de volumen y de masa.
Bioetanol	Fuente de energía renovable Aumenta la seguridad de abastecimiento energético. Ahorra energía primaria. Reducción de emisiones de CO ₂ Reducción de contaminantes atmosféricos (CO y COVs)	Grandes extensiones de terreno requeridas Puede interferir en el mercado de la alimentación. Baja rentabilidad Menos energía por unidad de volumen y de masa.
Biocarburantes de segunda generación	Variedad de materias primas, especialmente desechos Emisiones de CO ₂ inferiores que para otros combustibles líquidos. Baja intensidad de cultivo	Tecnologías incipientes poco desarrolladas a nivel industrial. Coste elevado
Gas natural	Reducción de las emisiones de NOx, PM y GEI. Fuente actualmente económica Disponibilidad de materia prima	No es renovable Coste elevado de las estaciones de suministro. Espacio requerido para los depósitos.
GLP	Fuente actualmente económica Reduce las emisiones atmosféricas y de ruido Contribuye a la diversificación energética	No es renovable Coste para adaptar el vehículo al GNL Carencia de infraestructuras existentes
Combustibles sintéticos	Multitud de materias primas	Tecnologías incipientes poco desarrolladas a nivel industrial. Coste elevado
Hidrógeno en MCI	Emisiones de combustión prácticamente nulas (salvo ligeras emisiones de NOx). Tecnología probada	Limitada oferta de vehículos Escasez de abastecimientos Tecnologías de abastecimiento



Junto con el vehículo eléctrico, la pila de hidrógeno es la tecnología que plantea mejores soluciones de cara al futuro del transporte (COM, 2010). Además, el desarrollo y el uso de los vehículos eléctricos y de pilas de combustible se complementan mutuamente debido a que los componentes de sus sistemas de propulsión eléctricos son similares.

A pesar de las indudables ventajas que aporta la pila de hidrógeno, su implantación, a día de hoy presenta algunos puntos débiles. Los sistemas de obtención de hidrógeno no son eficientes y tienen un coste económico elevado. Además, el hidrógeno es un elemento muy ligero y acumula mucha energía en poco peso, si bien el ratio en volumen es muy bajo. La solución al problema del volumen pasa por la licuación, lo que requiere un consumo de energía de entre el 10 y el 30 % (CADS, 2010). Además, frente al VE presenta un punto débil significativo: la pila de combustible en su implantación inicial requiere una red de abastecimiento extensa, mientras que el VE puede basarse en el sistema eléctrico actual sin la necesidad de realizar cambios estructurales (REE, 2011c). Es por ello que las distintas administraciones en su impulso del vehículo limpio y energéticamente eficiente, están mostrando un mayor interés por el vehículo eléctrico (COM, 2010).

A nivel de emisiones de contaminantes atmosféricos, los combustibles alternativos permiten, por lo general, reducir las emisiones contaminantes respecto a los combustibles convencionales, dependiendo del combustible y del contaminante considerado.

La utilización de biodiesel reduce las emisiones de CO, PM, y de forma más significativa, las de NMVOC. Por el contrario, la utilización de biodiesel puede incrementar las emisiones de NO_x si no se tratan posteriormente, por ejemplo; con un sistema SCR. En el caso de bioetanol, se reducen las emisiones de CO, PM y otros contaminantes precursores de ozono. Referente a las emisiones de efecto invernadero (GEI), el uso de biocarburantes permite reducir las emisiones netas de CO₂ respecto a los combustibles convencionales. Se considera que se trata de un ciclo cerrado: la masa vegetal se genera absorbiendo CO₂ de la atmósfera, CO₂ que posteriormente es emitido en su combustión y, así sucesivamente.

La utilización de biomasa como materia prima en la producción de biocarburantes de segunda generación permite reducir las emisiones de GEI de forma más significativa que los biocombustibles convencionales. No obstante, referente a los contaminantes atmosféricos, no hay datos fiables dado que es una tecnología incipiente.

Los vehículos que utilizan gas natural producen menores emisiones de NO_x, CO, NMVOC y especialmente de PM (Gonçalves et al., 2009a). Los vehículos impulsados por GLP presentan unas emisiones de NO_x y MP inferiores a las de los carburantes convencionales.

El empleo de gasóleo sintético (gas a líquido, GTL) contribuye a reducir las emisiones de NMVOC, CO y PM, especialmente durante el arranque en frío. Por el contrario, las de NO_x no se ven alteradas. Finalmente, referente a los MCI que utilizan hidrógeno, tan solo presentan ligeras emisiones de NO_x.

Tabla 4. Efecto en las emisiones de los diferentes combustibles basados en motores de combustión y otros sistemas de propulsión (modificación de FITSA, 2008)

Combustible\Emissiones		NO _x	PM	NM VOC	CO
Motor combustión interna (MCI)	Biodiesel	↗	↘	↓	↘
	Bioetanol	↗	↘	↗	↓
	Biomasa a líquido (BTL)	No se tienen datos fiables			
	Etanol lignocelulósico	No se tienen datos fiables			
	Gas natural	↘	↓	↘	↘
	Gas licuado de petróleo	↓	↘	↗	↗
	Gas a líquido (GTL)	↗	↘	↘	↓
	Hidrógeno en MCI	↘	↓	↓	↓
No basados en MCI	Pila de Hidrógeno	↓*	↓*	↓*	↓*
	Vehículo eléctrico	↓*	↓*	↓*	↓*

Las emisiones del VE y de la pila de hidrógeno dependen de las emisiones en la obtención de electricidad (VE) e hidrógeno (pila de hidrógeno). Teniendo en cuenta fuentes renovables o nucleares, se considera que sus emisiones son nulas (IDAE, 2008).

3.2 Vehículo eléctrico

Al contrario de lo que mucha gente piensa, el vehículo eléctrico (VE) tiene una larga historia. Los primeros prototipos fueron inventados en la década de 1830 (IU, 2011), décadas antes de la invención de los vehículos de gasolina y diesel. Como curiosidad cabe señalar que el primer vehículo en superar los 100 km/h fue un VE denominado: La Jamais Contente el 29 de Abril de 1899 (Figura 9). Lo cual muestra como en aquellos tiempos el VE tenía unas prestaciones que incluso podían superar a las de los vehículos de combustión interna (VCI), incipientes en aquel entonces.



Figura 9. La Jamais Contente, primer vehículo en superar la barrera de los 100 km/h el 29 de Abril de 1899. Era un vehículo eléctrico.

No obstante, a partir de inicios del siglo XX, los VCI empezaron a imponerse en detrimento del VE. Los principales factores que dieron lugar al impulso del VCI fueron (NOW, 2009): la falta de potencia del VE, la creciente disponibilidad del vehículo de combustión interna con la fabricación en cadena del modelo T de la casa Ford (año 1908), la disminución del precio del petróleo y la limitación de distancia por parte del VE. Con ello el VE se vio relegado a un segundo plano, y tan solo en momentos puntuales de crisis del petróleo con los correspondientes incrementos de precio (década de 1970), se planteó nuevamente el VE como alternativa del MCI (IU, 2011).

3.2.1 Electrificación progresiva del transporte; el vehículo híbrido.

El continuo incremento del precio del petróleo junto con las ventajas en materia de eficiencia energética hace que la electrificación del transporte sea una alternativa a considerar (ETC/ACC, 2009). A esto hay que añadirle las ventajas en materia de reducción de emisiones que se derivan. Fruto de ello es la evolución desde el VCI hasta el VE, representada por los diferentes vehículos híbridos:

Microhíbridos: representa el primer escalón entre el VCI y un VE. El motor de combustión interna (MCI) dispone de un sistema “start-stop”, que hace que el motor deje de funcionar al detenerse el vehículo y vuelve a arrancar cuando se deja de accionar el pedal del freno. Presenta una reducción del consumo que oscila entre 5-10%. (FECM, 2009)

Mildhíbridos. El vehículo dispone de un MCI que trabaja conjuntamente con el motor eléctrico (ME), pero este último no puede funcionar solo. Las ventajas que presenta este tipo de vehículo frente a uno de combustión interna convencional son: el sistema “start-stop” y un freno regenerativo

que permite reducir la velocidad de un vehículo, transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. La reducción del consumo de combustible varía entre 10-15%. (ETC/ACC, 2009)

Híbridos o Full Hybrid Electric Vehicle: A diferencia de los mildhíbridos, el vehículo híbrido hace un especial énfasis en el ME. El MCI permanece como motor principal, pero es complementado con un sistema eléctrico más potente. Esta configuración permite que el ME pueda trabajar conjuntamente con el MCI en momentos de elevada demanda y que igualmente pueda funcionar él solo a velocidades bajas. Este mayor peso del ME frente al MCI permite aumentar significativamente la eficiencia del vehículo y reducir así el consumo de combustible entorno al 25-30% respecto a los MCI. (Bost, 2009; UNSA, 2009).

En función de la disposición de los dos motores de los vehículos híbridos, éstos pueden ser:

- Vehículos híbridos en serie: toda la energía química-térmica del MCI pasa a un generador que la transforma en energía eléctrica. A continuación, éste la transmite a un sistema de baterías y de ahí a un motor eléctrico que la transforma en energía mecánica que transmite a las ruedas. La ventaja de la configuración en serie es que, como el MCI no está ligado directamente a la tracción, éste puede funcionar a régimen constante y en el punto de rendimiento óptimo. El mayor inconveniente es que toda la energía térmica generada se transforma en energía eléctrica, lo que genera pérdidas de eficiencia.
- Vehículos híbridos en paralelo: permiten que el sistema de transmisión sea accionado tanto por el MCI como por el eléctrico, o por ambos a la vez. La principal ventaja es que, al poder funcionar los dos motores simultáneamente, ambos motores pueden ser de menor potencia. El mayor inconveniente es el incremento de la complejidad del sistema.
- Vehículos híbridos mixtos: combina las dos disposiciones anteriormente explicadas, con lo que se consigue aglutinar las ventajas de ambos sistemas. Esta configuración es la más extendida actualmente, comenzó a comercializarse con el Toyota Prius en 1997.

Híbridos enchufables (Plug-in hybrid electric vehicle): los vehículos híbridos enchufables son una evolución de los vehículos híbridos convencionales y representan la última etapa antes del VE. Consta de un sistema eléctrico de mayor capacidad que permite reducir el MCI. La batería se carga mediante el generador mientras que el vehículo está en funcionamiento y también cuando está parado, conectándolo al sistema eléctrico. La mayor ventaja es el incremento de autonomía del ME. La reducción del consumo de combustible oscila mucho en función de la capacidad del ME respecto al convencional, entre el 40 y el 65% (FECM, 2009).

El vehículo híbrido es el puente tecnológico entre el VCI y el VE. Su progresivo desarrollo debe permitir la evolución del VE. En la Figura 10 se muestra la evolución en emisiones directas de CO₂, de los VCI hasta el VE. En el extremo de la derecha, se observan las emisiones de un determinado vehículo actual con unas emisiones que superan los 260 gCO₂/km (Lexus GS 430). El híbrido correspondiente rebaja dichas emisiones a poco más de 180 gCO₂/km. Siguiendo el eje de abscisa, si la tecnología actual lo permitiera (capacidad de las baterías actuales), dicho vehículo en su versión eléctrica tendría unas emisiones inferiores a 100 gCO₂/km dependiendo del mix energético

considerado. En el caso que su fuente de energía fuera renovable, sus emisiones serían nulas (IDAE, 2008).

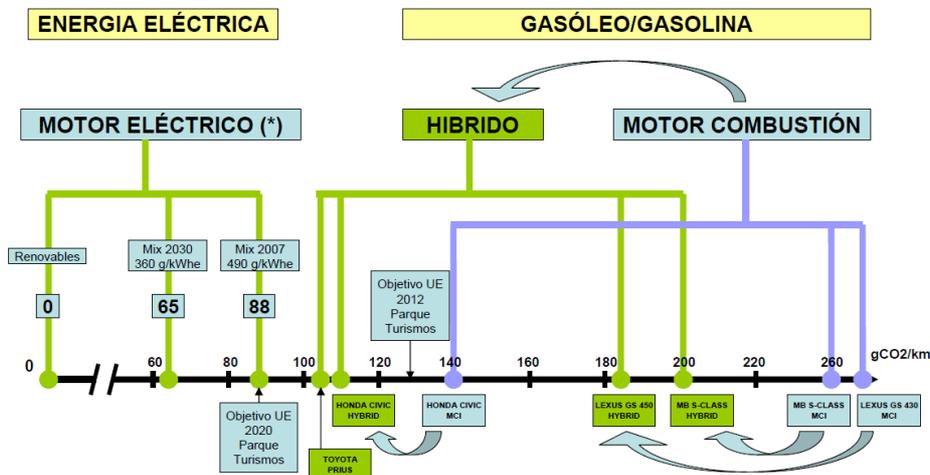


Figura 10. Diagrama que muestra la evolución del motor de combustión al eléctrico pasando por el puente tecnológico que representa el vehículo híbrido (IDAE, 2008).

3.2.2 Vehículo eléctrico; características

El VE es propulsado únicamente por un motor que se alimenta de una batería incorporada en el vehículo. La energía de la batería que ha sido cargada mediante una conexión al sistema eléctrico produce la energía necesaria para el vehículo (motriz y auxiliar). El VE muestra una mayor eficiencia del depósito a la rueda (traducción del término acuñado en inglés: tank to wheel efficiency), dada la mayor eficiencia del ME junto con la recuperación realizada por el freno regenerativo.

El VE presenta un notable ahorro de energía primaria si se compara con un VCI. Dicha comparación depende mucho de la eficiencia energética de sendos motores y de la eficiencia del mix de generación eléctrica, como muestran numerosos estudios en esta materia: EABEV, 2009; WWF, 2008; CONC 2007; MIT, 2000; DEBA, 2008; ILEA, 2005. En la Figura 11 se muestra un ejemplo comparativo del rendimiento energético de los VE frente a los VCI. Considerando la situación de peor caso para los VE, menor eficiencia energética en la fase de generación de la electricidad (centrales térmicas convencionales con un rendimiento entorno al 30%) el rendimiento del VE es significativamente superior (24%) al del VCI (16%) (Berry et al., 2009).

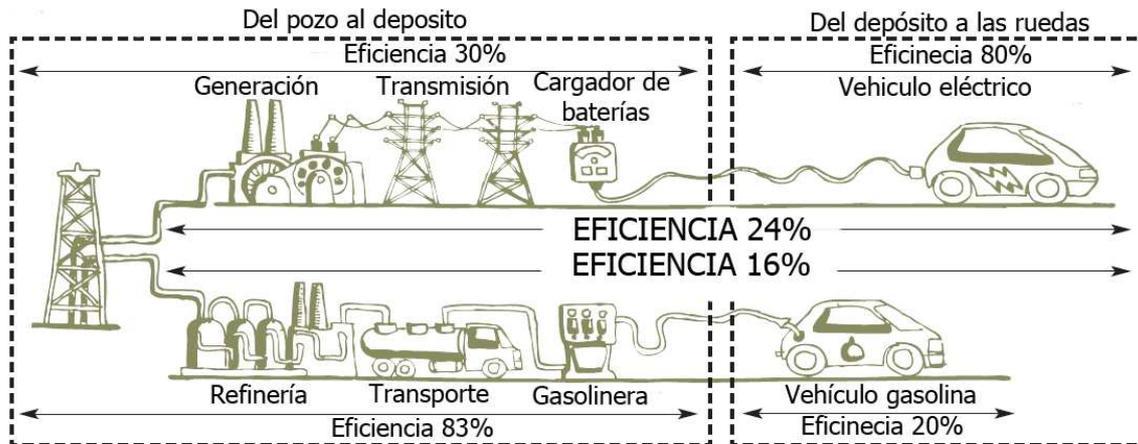


Figura 11. Comparación de la eficiencia energética del pozo a las ruedas entre un vehículo eléctrico y uno de gasolina (modificación de Berry et al., 2009).

El potencial del VE para sustituir el VCI debe tener en cuenta diferentes características del VE. Por un lado, sus limitaciones: menor autonomía y la necesidad de recargas frecuentes (ECC/ACT, 2009). Y por el otro, sus ventajas: alta eficiencia energética en periodos de paradas y aceleraciones (FITSA, 2006). Con ello, el mayor potencial del VE actualmente se encuentra ligado a zonas urbanas (PBL, 2009; ETC/ACC, 2009; EAVEV, 2009). Ya que en ellas el porcentaje de desplazamientos cortos es muy elevado. Tomando el ejemplo de Londres, el 84% del total de desplazamientos en coche son inferiores a los 20 km, y el 95% inferiores a 75 km por día (MAYO, 2009). Patrones similares son comunes en el resto de ciudades Europeas (ECC/ACT, 2009).

Otro factor que favorece el desarrollo del VE en las ciudades es el gran potencial de las motos eléctricas. Las motos tienen una demanda de energía inferior a la de los vehículos de cuatro ruedas y dada las limitaciones de las baterías actuales y de necesidad de recarga (ECC/ACT, 2009) su implantación es más fácil. A ello hay que sumarle el gran nicho de mercado que tienen las motos en las ciudades. Actualmente, un elevado porcentaje de desplazamientos en las ciudades se realiza en moto. En la ciudad de Barcelona, el 41.8% de los desplazamientos privados en 2010 se realizaron en moto (BCN, 2011). En las principales ciudades asiáticas como por ejemplo Pekin o Shanghai, las administraciones locales han promovido un notable incremento de las motos eléctricas mediante restricciones a las motos convencionales, con el objetivo de mejorar la calidad del aire (WWF, 2008).

Finalmente cabe resaltar otras ventajas que presenta el VE frente a los VCI a parte de las referentes a eficiencia energética y emisiones-calidad del aire como son: la reducción de emisiones de GEI, disminución de los niveles de ruido o la significativa simplificación de los vehículos.

El incremento de la eficiencia energética del pozo a las ruedas (desde que se extrae el combustible hasta la generación de energía motriz) del VE permite un ahorro en la emisión de GEI significativa (EPRI, 2007a). Además si se considera un mix energético basado en energías renovables, la reducción de dichas emisiones directas es del 100% (IDAE, 2008).

Los niveles de ruido urbanos tienden a exceder los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los cuales son producidos principalmente por el tráfico rodado (EEA, 2010d; PBL, 2009). Los niveles de ruido producidos por los VE son bajos a velocidades bajas y en momentos de aceleración, si se compara con un VCI, lo que daría lugar a una reducción significativa del ruido en las zonas urbanas (PBL, 2009).

Otra característica significativa de los VE es la drástica simplificación de la mecánica de los vehículos. Se estima que un VE contiene un 90% menos componentes que un VCI (CADS, 2010). En materia de medio ambiente, esto implica una reducción de recursos en su fabricación y facilita su tratamiento y la recuperación de materiales al final de la vida útil.

3.2.3 Retos del vehículo eléctrico: baterías e integración en el sistema eléctrico.

Los retos tecnológicos que plantea la implantación del VE están ligados a los propios vehículos (carga y capacidad de la batería), a la infraestructura de recarga, y la generación de energía (IVECAT, 2010).

Las baterías son el sistema de almacenaje de energía de los VE. A pesar de los constantes avances conseguidos en el sector, actualmente las baterías presentan una modesta capacidad de almacenaje. La densidad de energía es del orden 100 veces inferior a la de un VCI (ITRE, 2010). Esto limita de forma significativa la autonomía de los VE (CADS, 2010). A parte del reto del incremento de su capacidad, las baterías también plantean otros retos, como la modalidad y los ciclos de carga, la vida útil y su coste, que suele representar alrededor del 50% del valor del vehículo (CADS, 2010).

Actualmente, por lo general, la recarga de una batería se realiza mediante la red eléctrica convencional y requiere aproximadamente un tiempo de 8 horas (SchneiderE, 2010). Este tipo de recarga, denominada estándar, permitirá una inicial introducción del VE e igualmente será la mayoritaria si se regula la recarga.

Igualmente, ante la necesidad de recargas más rápidas, se está trabajando en diferentes direcciones. Por un lado mediante cargas rápidas o ultrarrápidas (10-30 minutos), que a la larga pueden reducir la vida útil de la batería (Lunz B.et al., 2011). En Japón se ha instalado la red más extensa de puntos de recarga rápidas a nivel mundial (Chademo, 2011). Por el otro, se está planteando la opción de un cambio de baterías (aproximadamente 3 minutos), que iría ligado con un sistema de alquiler de la batería lo que reduciría considerablemente la inversión inicial. Renault, en su gama de VE que plantea introducir en el mercado durante 2011 y 2012, presenta el sistema *quickdrop* que consiste en un sistema de sustitución de baterías (Renault, 2011).

Finalmente, el VE como nuevo consumidor de electricidad, presenta nuevos retos en relación con el sistema eléctrico y la generación de electricidad. En primer lugar, referente a la nueva demanda que representa el VE. En segundo lugar, si dicha demanda podrá ser soportada por el sistema eléctrico

actual. No obstante, a su vez, su integración en la red puede ayudar a gestionar de forma más eficiente el sistema eléctrico, reduciendo las grandes diferencias que se producen entre períodos de mayor y menor consumo, y a su vez, facilitando la integración de las energías renovables.

A nivel Español, de manera bastante regular, la demanda del sistema está comprendida entre 22.000 y 45.000 MW con grandes diferencias entre la máxima demanda y las horas valle (CADS, 2010). Recientemente se ha aprobado el Real Decreto 647/2011 (M.Presidencia, 2011), que introduce una tarifa supervalde para fomentar la recarga del VE en las horas de menor demanda. El Real decreto reforma la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, para incluir en el marco normativo de dicho sector un nuevo sujeto, los gestores de cargas del sistema, que prestarán servicios de recarga de electricidad, necesarios para un rápido desarrollo del vehículo.

En la Figura 12 se puede observar la demanda de electricidad del día 25 de Febrero de 2010 (REE, 2011a). Presenta el patrón típico con significativa diferencia entre el punto de máxima demanda y las hora valle. Igualmente, en la figura en detalle de generación de energía eólica se puede observar cómo la baja demanda, conlleva desconexiones de la eólica.

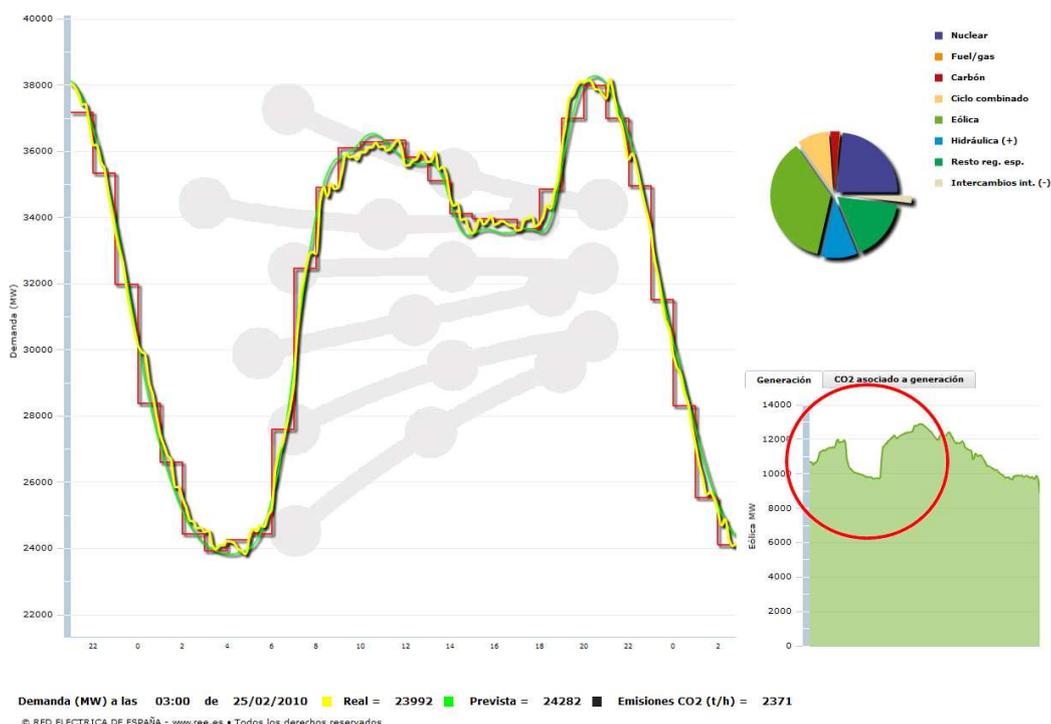


Figura 12. Demanda de energía eléctrica del día 25 de Febrero de 2010. En la figura de la derecha se muestra la demanda correspondiente a energía eólica, y se observa la desconexión debida a la bajada de la demanda (resaltado con un círculo en rojo) (modificación de REE, 2011a).

La introducción de los VE en sustitución de los VCI es una de las principales medidas para conseguir aumentar la penetración de las energías renovables en el sector transporte, en línea con el objetivo de la Directiva Europea 2009/28/CE (CE, 2009) que determina, que la cuota de energía

procedente de fuentes renovables en todos los tipos de transporte en 2020 sea, como mínimo, equivalente al 10% de su consumo final de energía en el transporte.

Igualmente, si se quieren alcanzar los objetivos europeos de eficiencia energética para 2020 (COM, 2011), habrá que realizar grandes esfuerzos en el sector transporte. Actualmente, el transporte representa el 32.6% del consumo total de energía final en la EU-27 (Eurostat, 2011).

Según Red Eléctrica de España (REE, 2011b), existen diferentes escenarios de recarga, si bien todos ellos deben tener en cuenta varios factores: el volumen de la demanda, las horas en las que se produce la demanda y la forma de gestión de la demanda, concepto de gestión. Con ello se definen tres escenarios (Figura 13):

- **Demanda en hora punta:** es evidente que dicho escenario es preciso evitarlo ya que sería el momento más desfavorable. Entre las 18 y las 22 horas con la vuelta de la gente a casa se da el pico de la demanda de energía. Requeriría de un sobredimensionamiento del sistema, ineficiencia y no facilitaría la conjugación con las energías renovables.
- **Demanda en horas valle:** supondría la generación de nuevos picos de demanda. A pesar de que el sistema no necesitaría un redimensionamiento, se observarían problemas de gestión e integración de las energías renovables.
- **Demanda en horas valle con gestión de la demanda (concepto de smart grids):** de esta manera, se aportaría mayor eficiencia y operatividad al sistema, y permitiría una mejor integración de las renovables. Según REE, considerando un escenario de recarga en valle con gestión inteligente, se podrían introducir 6.5 millones de VE en el sistema eléctrico actual, sin ninguna inversión en activos de generación y transporte (REE, 2011c).

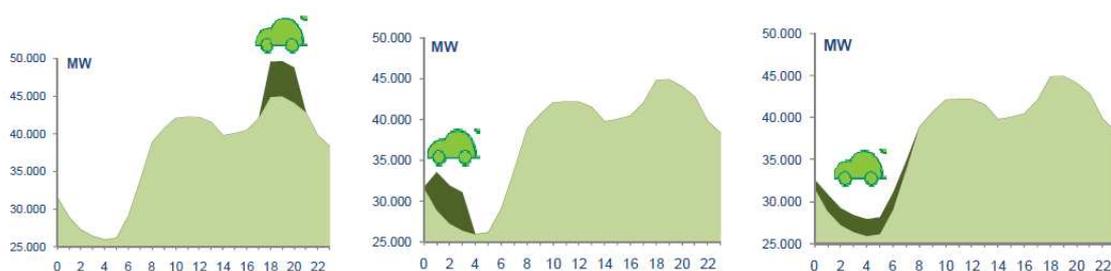


Figura 13. Escenarios de recarga del vehículo eléctrico. De izquierda a derecha: horas punta-horas valle-horas valle con gestión de demanda (REE, 2011c).

En un futuro, la implantación masiva del VE supondrá disponer de una enorme capacidad de almacenamiento de energía eléctrica. REE, (2011c) estima que, si la totalidad del parque de vehículos español fuera eléctrico, este parque podría almacenar la totalidad de la demanda española.

El V2G (vehicle to grid) podría permitir a los vehículos inyectar energía en la red en momentos de máxima demanda.

3.2.4 Vehículo eléctrico, herramienta para mejorar la calidad del aire en las ciudades.

Las ventajas en materia de emisiones y calidad del aire por parte del VE hace tiempo que se conocen. La primera iniciativa para incentivar el uso del VE como medida de mejora de la calidad del aire aparece en 1966, el Congreso de EEUU presenta los primeros proyectos de ley que recomiendan el uso del VE (NOW, 2009).

La principal diferencia del VE respecto al VCI, en cuanto a emisión de gases y partículas contaminantes a la atmosfera es que el VE no tiene emisiones de combustión o de tubo de escape. No obstante si se deben considerar aquellas emisiones debidas a la generación de energía, las cuales dependerán del mix energético correspondiente (EPRI, 2007a, IDAE, 2008).

Igualmente, el VE también tiene otros dos tipos emisión asociados (FITSA, 2007); las emisiones de resuspensión y las emisiones debidas al desgaste de frenos, ruedas y pavimento. Ambos procesos dan lugar a emisiones de PM. Las emisiones de resuspensión son el resultado del paso del vehículo por un pavimento en el que previamente se ha depositado MP (Pay et al., 2011). En el caso de las debidas al desgaste de frenos, ruedas y pavimentos, son el resultado de la abrasión provocada por el propio vehículo en funcionamiento (EMEP/EEA, 2009).

En los últimos años se está avanzando en el estudio de la reducción de emisiones resultantes de la introducción del VE y de híbridos enchufables (Kintner-Meyer et al 2007, Knipping and Duvall 2007, NREL 2007, Stephan and Sullivan 2008, Sioshansi 2009, Kantor et al 2009, Jansen et al 2010). En ellos se analizan diversos escenarios, que representan diferentes grados de integración del VE y del PHEH. Los resultados muestran como los nuevos vehículos considerados permiten reducir las emisiones procedentes del tubo de escape o de combustión, pero, que a su vez, en función del grado de integración y del mix energético considerado en la recarga, conllevan un incremento en las emisiones de generación de energía.

Un punto clave es el mix energético considerado durante la recarga. Alguno de estos estudios asumen que la carga del vehículo se realiza mediante una determinada fuente de energía, o bien mediante un mix energético concreto coherente con la generación de energía de una región en particular (Sioshansi et al., 2009, Kintner-Meyer et al 2007).

Jansen et al., (2010) plantean una metodología basada en una correlación entre las recargas y datos históricos de generación de energía. Mediante el análisis de los datos históricos, determinan la capacidad de cada fuente de energía en particular, con discriminación horaria. Esto permite diferenciar los rangos horarios de recarga con menores emisiones asociadas. En la Figura 14 (izquierda), se observa la generación energética procedente para cada tipo de fuente en el escenario base. Si se compara el escenario base con el escenario de recarga en horas valle (derecha), se

observan incrementos totales en las horas valle debido a un incremento en la generación eléctrica procedente de turbinas de gas natural (NGST) y ciclos combinados (NGCC). El estudio concluye que la introducción del VE permite reducir las emisiones de NOx, no así la del resto de contaminantes considerados (SO₂, NMVOC), y que, por lo tanto, la adopción del VE debe ir acompañada de un incremento en las fuentes de energía no contaminantes.

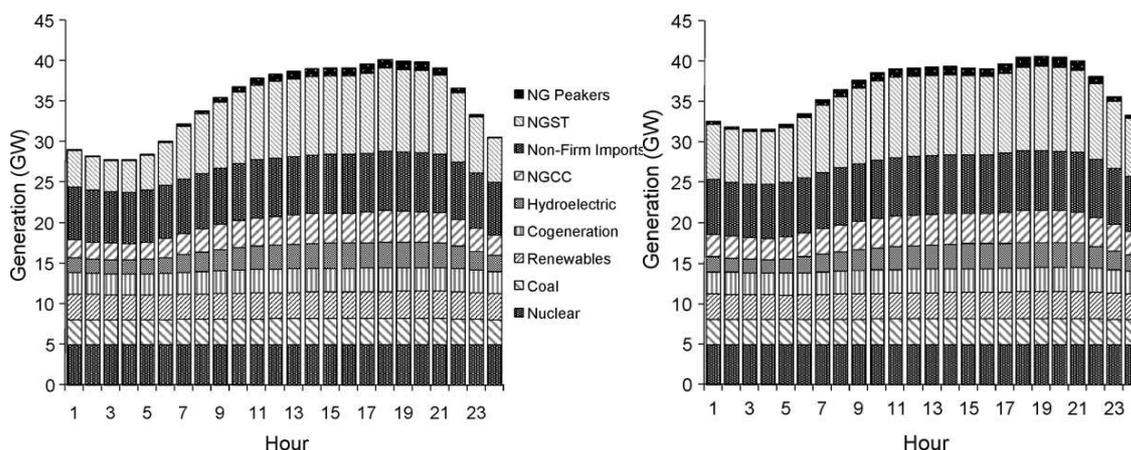


Figura 14. Comparación del mix energético del escenario base para el sistema del oeste de EEUU en 2001 (izquierda) y del escenario futuro de recarga en horas valle con el incremento de las fuentes de energía NGST y NGCC (Jansen et al., 2010).

Finalmente, y enlazando con la posibilidad en el futuro de que los VE puedan volcar energía en el sistema en momentos de máxima demanda (V2G), un reciente estudio del National Renewable Energy Laboratory (NREL) del Departamento de Energía de EEUU concluye, que con el V2G, se conseguiría una importante reducción de emisiones contaminantes, muy especialmente de NOx. (Shiohshashi et al., 2009).

En materia de calidad del aire, el número de estudios que planteen la introducción del VE es mucho más reducido y las consideraciones de generación eléctrica para la recarga más simplistas. Por ejemplo: Kantor et al., (2009) plantea un escenario en el que una nueva central nuclear en Toronto asuma las recargas del VE. Thompson et al (2009) plantea un escenario de introducción del VE mediante la recarga en horas nocturnas gracias al incremento de la generación eléctrica en centrales de carbón (observación: dado que las centrales térmicas de carbón tienen periodos de arranque largos desde el punto de vista conceptual este planteamiento parece poco plausible). Igualmente en EPRI, (2007b) se analiza la introducción del PHEV en EEUU teniendo en cuenta las proyecciones estimadas por el Departamento de Energía de EEUU, que estima aumentos en la generación de energía basada en las centrales de carbón. En ellos se observa como los niveles de inmisión de NOx mejoran significativamente mientras que los de otros contaminantes, cómo es el caso de material particulado, aumentan debido al uso de carbón.

Thomson et al (2011) va un paso más allá. Basándose en el mix energético actual, junto con las fuentes de energía previstas, plantea diferentes escenarios futuros de recarga basados, en la medida

de lo posible de fuentes no emisoras de contaminantes (esencialmente energía eólica), y el resto, en centrales térmicas. Los resultados muestran mejoras en los niveles de inmisión de NO_x, debido al descenso de las emisiones de tráfico. Estas reducciones en los niveles de NO_x conlleva reducciones en los niveles de Ozono, aunque en determinadas zonas, el descenso de NO_x da lugar a ligeros incrementos en los niveles de ozono (Sillman and He, 2002). El estudio no aporta información relativa al resto de contaminantes como son el SO₂, PM , etc.

En resumen, el VE presenta un gran potencial en cuanto a la mejora de la calidad del aire urbano. Debido a que no presenta emisiones directas de tubo de escape o combustión, permite reducir las emisiones de tráfico en el entorno urbano y por consiguiente mejorar los niveles de inmisión.

No obstante, las emisiones se trasladan a la generación de energía que afectará de forma indirecta en la calidad del aire urbano. A pesar de ello, la mayor eficiencia energética total (desde la extracción del combustible fósil a la tracción de las ruedas del vehículo) que presenta el VE frente al VCI, hace el que el balance de emisiones totales del VE sea inferior. Si además se considera una recarga del VE mediante fuentes de energía que no presenten emisiones a la atmósfera (renovables y energía nuclear), el resultado es una reducción del 100% de las emisiones de combustión respecto a los vehículos convencionales.

3.2.5 Perspectivas del vehículo eléctrico

Tal y como se muestra en los apartados previos, el VE tiene unas ventajas asociadas en materia de eficiencia energética, reducción de emisiones, mejora de la calidad del aire, etc. No obstante el tiempo requerido para que el VE sustituya parte del parque vehicular de forma significativa, sugiere que el VE tendrá un leve impacto durante la próxima década (Brandy, 2011). Antes de presentar proyecciones y planificaciones de algunas de los escenarios previstos de implementación es importante hacer un repaso a algunos datos socioeconómicos que determinaran la introducción del VE.

En primer lugar, el reto tecnológico que plantean las baterías es un punto clave. La introducción del VE en el mercado depende, en gran medida, de la evolución de las baterías que permitan un mayor almacenaje de energía eléctrica (ETC/ACC 2009). Ello requiere una gran inversión en investigación este campo (COM, 2011).

Desde el punto de vista económico, el VE se mueve entre dos sectores económicos muy potentes: el energético y el del transporte. Entre las 10 empresas con más ingresos a nivel mundial, 9 corresponden al refino de petróleo y a la producción de vehículos (WWF, 2008): 1º Wal-Mart, 2º ExxonMobil, 3º Royal Dutch/Shell, 4º BP, 5º General Motors, 6º DaimlerChrysler, 7º Chevron, 8º Toyota, 9º Total y 10º ConocoPhillips. Además, dentro de las 50 mayores en número de ingresos, el 46% de dichos ingresos se concentran en estos dos sectores (Figura 15). Todo esto hace pensar que el sector dispone del capital suficiente para poder invertir en los retos tecnológicos que plantea el VE, como se ha dicho, especialmente referente a las baterías. Por otro lado, el gran peso de estos

sectores puede favorecer otras opciones y determinar la evolución del VE, como se explica en el reportaje *Who killed the electric car* (Paine, 2006).

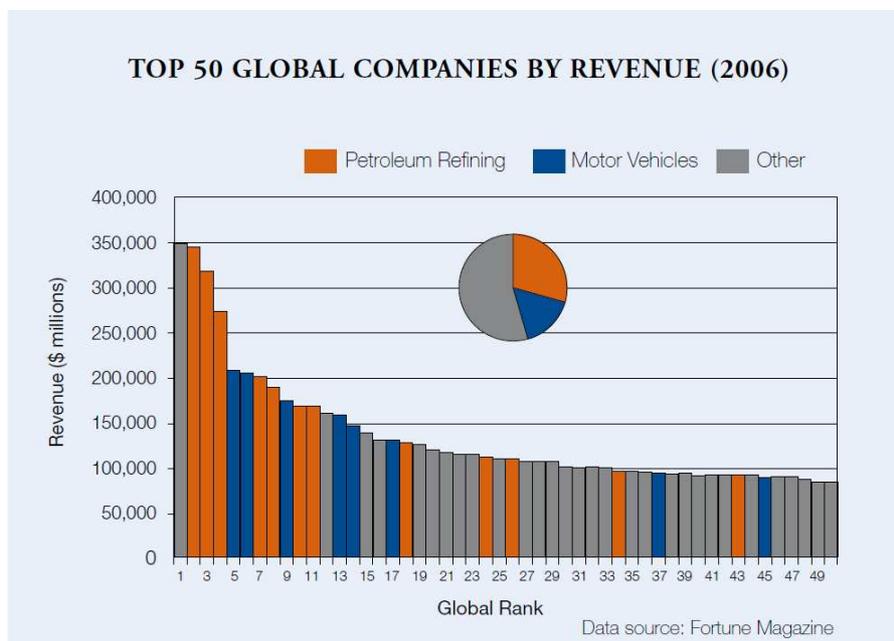


Figura 15. Cincuenta primeras empresas a nivel mundial en número de ingresos. En naranja las del sector de refino de petróleo y en azul las de fabricación de vehículos (WWF, 2008).

También mirando desde el punto de vista económico pero esta vez a nivel usuario, actualmente, una de las vías de incentivación del VE son las subvenciones en la compra (IDAE, 2008). Pero no hay que olvidar que, el consumo de carburante reporta a los estados importantes ingresos. En 2010 el Estado Español recaudó 18.383 millones de € (ANFAC, 2011b). En el futuro, una significativa integración del VE representaría una importante reducción de dicha recaudación, lo cual comportaría la necesidad de encontrar una situación de consenso entre las subvenciones y las recaudaciones.

Finalmente, desde el punto de vista social y económico, la sustitución del VCI por el VE viene determinada por la tasa de renovación del parque vehicular. Se estima que actualmente en España el 35.7% de los vehículos tienen más de 10 años (ANFAC, 2011c).

De todas estas premisas se deriva que; la introducción del VE requiere de una planificación a largo plazo, en la que el VE vaya ganando terreno a los VCI. La International Energy Agency (IEA) en 2008 publicó Energy Technology Perspectives. Scenarios and strategies to 2050 (IEA, 2008). En él se define un escenario que permite un 50% de reducción de las emisiones de CO₂ a nivel global para 2050 (BLUE Map scenario). En dicha reducción el transporte contribuye con un 30%. Esto se consigue mediante un incremento de EV y de PHEV (Figura 16). Este escenario tiene en cuenta el incremento del número de vehículos y también considera una rápida evolución de la tecnología de los vehículos ligeros en este periodo y que el VE y el PHEV dominen el mercado del automóvil en el 2030 (IEA, 2009).

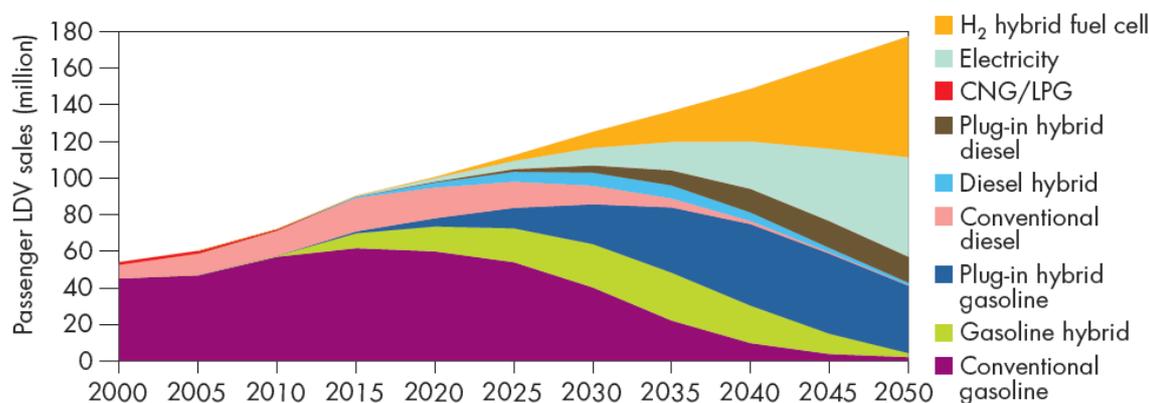


Figura 16. Evolución de la venta de vehículos por tipo estimada en el escenario BLUE Map (IEA, 2009).

A nivel Español, el impulso del VE se ha canalizado en un principio a través del proyecto MOVELE (IDAE, 2008) y se ha continuado mediante la Resolución del 20 de diciembre de 2010 (BOE, 2011). Tienen por objetivo contribuir con la instalación de puntos de recarga en las ciudades incluidas (Barcelona, Sevilla y Madrid) y fomentar la adquisición del VE mediante subvenciones en la compra. Las perspectivas iniciales contemplaban para 2010 la introducción de 2,000 VE que no se han cumplido, y de 1,000,000 para 2014. Estas proyecciones son muy optimistas y difícilmente se puedan cumplir. Por ejemplo, a nivel mundial, uno de los principales fabricantes, REVA, tiene una capacidad de producción de 30,000 unidades anuales (DIUE, 2010).

En España, diferentes administraciones locales y algunas empresas también están apostando por el VE mediante proyectos piloto que muestren su viabilidad, entre otros (Figura 17):

- Dentro del proyecto LIVE (LIVE, 2010) el ayuntamiento de Barcelona ha incorporado a su flota de vehículos municipales un total de 380 VE.
- Recientemente el ayuntamiento de Barcelona ha firmado un convenio con el RACC y Honda para evaluar la adaptabilidad de una moto eléctrica de la marca japonesa en la ciudad. Mientras que en el continente asiático las motos eléctricas han irrumpido fuertemente en los últimos años, existen alrededor de 20 millones de motos eléctricas en China (IEA, 2009), esta será la primera prueba piloto a nivel europeo.
- En 2008 correos incorporó un conjunto de VE formado por vehículos de 2 y 4 ruedas.
- El ayuntamiento de Badajoz también ha incorporado un total de 15 unidades a su flota.



Figura 17. Ejemplos de vehículo eléctrico en circulación en España. De izquierda a derecha y de arriba abajo: vehículo perteneciente a la flota adquirida por Correos, vehículo de limpieza de Badajoz, vehículo de limpieza de la ciudad de Barcelona y modelo de Honda que circulará por Barcelona en el marco de un proyecto piloto para probar la viabilidad de la motocicleta eléctrica en Europa.

3.3 Medidas de movilidad

Como se ha indicado en el apartado 2.2.2, el 75% de la población europea vive en entornos urbanos. Los transportes públicos, los automóviles, camiones, ciclistas y peatones comparten un mismo espacio. El transporte urbano es responsable de hasta el 70% de las emisiones procedentes de transporte (COM, 2006). Además, es en las ciudades y sus vías de acceso donde se concentran los problemas de congestión.

Actualmente, el sistema de transporte no es sostenible. Analizando las proyecciones a los próximos 40 años, es evidente que el transporte no puede desarrollarse por la misma vía. En un escenario tendencial (Business as usual), considerando el objetivo del 10% de fuentes renovables establecido para 2020 (CE, 2009b), para el año 2050, las emisiones de CO₂ procedentes del transporte seguirían estando una tercera parte por encima de su nivel de 1990. Los costes de la congestión aumentarían en cerca de un 50% (COM, 2011).

El sector del transporte por sí solo representa una parte importante de la economía: en la UE supone un 5% de los puestos de trabajo y representa cerca del 7% del PIB (COM, 2006). Se trata de un sector que, además, contribuye en gran medida al funcionamiento de la economía europea en su conjunto.

Con ello, la opción de restringir la movilidad no se plantea. Además, no parece probable, que la alternativa que plantean vehículos más sostenibles y combustibles menos contaminantes por si solos produzcan las necesarias reducciones de las emisiones. Y obviamente, lo que no van a resolver son los problemas derivados de la congestión (COM, 2011).

El modo de incrementar la movilidad y, al mismo tiempo, reducir la congestión y la contaminación es el reto común a todas las grandes ciudades. Las medidas de movilidad engloban desde medidas generales (medidas de información, promocionales, etc.) a planes de movilidad urbano basados en medidas de gestión de la movilidad, que también pueden incluir la creación de nuevas infraestructuras.

3.3.1 Medidas generales de movilidad

Existe un amplio abanico de medidas generales de movilidad, que en su conjunto complementan y ayudan a la mejora de planes más completos y ambiciosos de transporte o de movilidad. Éstas se pueden clasificar en (CE, 2007b; EPOMM, 2010):

- Medidas de información: proporcionan al viajero información y asesoramiento a través de múltiples medios de comunicación. Ejemplos: servicios de información en viajes por parte de la administración local, etc.
- Medidas promocionales: fomentan el cambio de comportamiento voluntario a través de sensibilización y la promoción de soluciones alternativas al uso del vehículo privado. Es decir, sensibilizan y fomentan el uso de alternativas existentes. Ejemplos: Día Europeo sin coche, promoción del transporte público, etc.
- Acciones de apoyo e integración: incentivación tarifaria de los medios de transporte con menor impacto y penalización del vehículo privado. Ejemplos: zonas limitadas al estacionamiento de residentes.
- Medidas de organización y coordinación: que proporcionan al conductor alternativas al uso individual del vehículo. Ejemplos: car pooling (juntar a dos o más personas que quieran hacer el mismo recorrido y realizarlo conjuntamente en un solo vehículo), car sharing (sistema de alquiler de vehículos en un área concreta), etc.
- Medidas de educación y formación sobre movilidad: como por ejemplo en escuelas o en sitios turísticos.
- Medidas vinculadas a lugares concretos: organización del transporte de empresa, de colegios.
- Telecomunicaciones y la organización flexible del horario: por ejemplo, facilitar el teletrabajo, las gestiones por internet, etc.

Las medidas generales, por si solas, pueden tener un leve impacto en cuanto a reducción de las emisiones y mejora de la calidad del aire, no obstante complementadas entre si permiten mejorar

significativamente la movilidad. Igualmente, medidas más completas y ambiciosas de movilidad no se entienden sin la consideración de numerosas de estas medidas.

3.3.2 Gestión de la movilidad y de la velocidad de circulación

La congestión en las ciudades es uno de los principales problemas que tiene consecuencias económicas, sociales, sanitarias, y medioambientales negativas. El problema se localiza normalmente en las zonas urbanas y sus accesos. Una red de transporte fluida permitiría que las personas y mercancías llegaran a tiempo, limitando así los efectos. La solución, es un sistema previamente planificado y gestionado. Dicha gestión, se puede realizar mediante la limitación de velocidad (gestión de la velocidad) y/o mediante la integración de los distintos tipos de transporte y mercancías (gestión de la movilidad) (COM, 2007, CE, 2007b).

La gestión de la velocidad es una medida comúnmente adoptada ya que disminuye los niveles de congestión, ruido y accidentes. Además también puede dar lugar a una reducción de los niveles de emisión. Las emisiones dependen de la velocidad de circulación, así como de la antigüedad del vehículo, peso, cubicaje y del contaminante. Por lo tanto no existe una velocidad óptima común para todos los vehículos en circulación (Keller et al., 2008). Dicha velocidad óptima, dependiendo del contaminante y vehículo, se encuentra en un rango entre 60-100 km/h (Ntziachristos and Samaras, 2000), con lo que en la medida de que la gestión de la velocidad acerque la velocidad de circulación a dicho rango, conllevará una reducción directa de las emisiones.

En Baldasano et al., (2010) se analiza el impacto sobre las emisiones y la calidad del aire de la limitación a 80 km/h en las vías de acceso a la ciudad de Barcelona. Previamente, la limitación era de 100 km/h en el 63.2% en los tramos afectados, y de 120 km/h en el 20.4%. Por lo tanto, la limitación a 80 km/h además de disminuir los niveles de congestión, ruidos y accidentes, acercaba el límite de velocidad al rango óptimo, dando lugar a una reducción de las emisiones y la consiguiente mejora de los niveles de inmisión (entre 5-8% en la concentración promedio diaria en las vías afectadas).

Por otro lado, en muchas ciudades Europeas se están definiendo zonas con limitación de la velocidad a 30 km/h. En Panis et al., 2011 se analiza la reducción del límite de velocidad en las ciudades (de 50 a 30 km/h), y se concluye que la medida no comporta significantes variaciones en las emisiones de contaminantes atmosféricos. La razón es que, la medida no acerca el límite de velocidad al rango óptimo.

En resumen, la reducción de la velocidad en una ciudad, no parece la solución más apropiada desde el punto de vista de la reducción de las emisiones. No obstante, sí que puede ayudar a integrar otras medidas de movilidad ya que permite reducir la congestión. Además tiene otras ventajas asociadas como son la reducción de ruido y accidentes. Referente a las vías de entrada y salida de las ciudades, al tener límites de velocidad más elevados, una reducción de la velocidad puede comportar significativas reducciones en cuanto a emisión de contaminantes.

Referente a la gestión de la movilidad, ésta pretende la reducción de las emisiones de tráfico mediante la aplicación de limitaciones de circulación a los vehículos más contaminantes, reducción del transporte privado, la planificación urbana, etc. consiguiendo la modificación de patrones y comportamientos de los viajeros (EPOMM, 2010).

En la Figura 18 se observan los modos de transporte utilizados por los habitantes de las ciudades españolas de entre 50.000-500.000 habitantes y las que tienen más de 500.000 (MFomento, 2008). En ambos casos los recorridos a pie/bicicleta representan porcentajes superiores al 40%. El desplazamiento en vehículo privado es superior en el caso de las ciudades más pequeñas (39,4%, frente a los 28,9% de las ciudades con más de 500.000 habitantes). Mientras que el transporte en metro o autobús urbano es muy superior en las ciudades grandes (22.1% frente a 6.3). En las ciudades grandes la disponibilidad de transporte público es mucho más presente lo que posibilita su uso. El tren, autobuses interurbanos y otros representan valores inferiores al 3%.

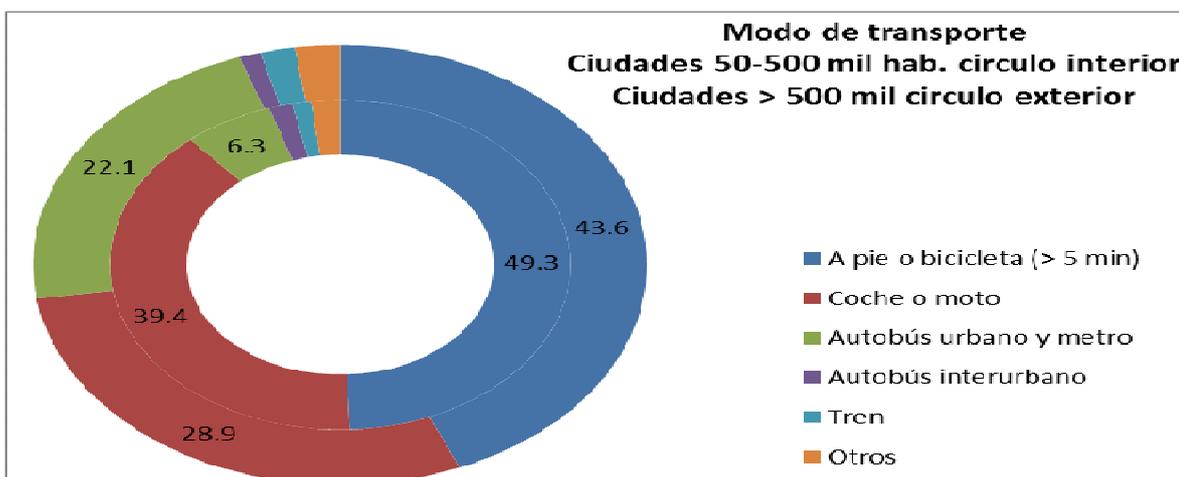


Figura 18. Porcentaje del modo de transporte utilizado en las ciudades con más de 500,000 habitantes (círculo exterior) y ciudades con más de 50,000 habitantes y menos de 500,000 (círculo interior) (M. Fomento, 2008).

Los planes de movilidad o de gestión de la movilidad de las ciudades van encaminados a una conversión más significativas del transporte de vehículo privado en: por un lado, si es posible desplazamientos a pie o bicicleta, y por el otro desplazamientos en transporte público (autobús, metro, tranvía, etc.) (COM, 2007).

La reducción del número de vehículos en circulación es una de las principales estrategias para la reducción de las emisiones. Moriarty and Honery (2008a, 2008b, 2007) muestran como la tendencia al incremento del uso del vehículo privado es insostenible. Especialmente en las los entornos urbanos. El crecimiento de las ciudades ha dado lugar a que la gente se haya ido desplazando a las afueras, lo que ha motivado el incremento del transporte privado (Kahn and Schwartz, 2008). Por ello, para reducir los niveles actuales de emisión, las mejoras tecnológicas y el uso de combustibles menos contaminantes no son suficientes por si solos, y se evidencia la necesaria gestión de la movilidad (Moriarty and Honery 2008a, 2008b, 2007).

A nivel Español dos estudios se centran en la reducción de las emisiones en la ciudad de Madrid y Barcelona. Lumbreras et al., (2008a, 2008b) presenta un conjunto de escenarios con el objetivo de reducir las emisiones de tráfico en la ciudad de Madrid. El escenario de gestión de la movilidad considera una reducción del 10% en los desplazamientos en vehículo privado que se compensa con un incremento del transporte público y la conversión de determinadas calles en vías peatonales para facilitar el desplazamiento a pie y en bicicleta. Dicho escenario es el más eficiente en cuanto a la reducción de emisiones junto con el que considera la renovación del parque vehicular.

En el caso de Barcelona, Soret et al., (2011) presenta tres escenarios futuros de gestión de la movilidad. El escenario que permite una mejora más significativa de los niveles de calidad del aire comporta una reducción del transporte privado y una modificación del callejero mediante la conversión de algunas calles en peatonales creando grandes manzanas y añadiendo determinados cambios de sentido.

A nivel Europeo son las propias ciudades las que han tomado la iniciativa (COM, 2006; COM, 2007). Londres, Estocolmo, Atenas, Kaunas, Gdynia y otras ciudades han establecido políticas de movilidad como alternativa al vehículo privado. Dada la problemática concreta de cada ciudad, no hay una solución única en cuanto a gestión de la movilidad. El papel de la Unión Europea en este sentido es el de promover el estudio y el intercambio de las mejores prácticas.

A modo de ejemplo, se analiza el caso de Londres que en 2008 introduce una zona de bajas emisiones (Low Emission Zone; LEZ) (TLondon, 2008). Los vehículos, en función de los estándares de emisión (apartado 3.1.1), pueden o no, circular dentro de la LEZ. La medida afecta a (TLondon, 2011):

- A partir del 4 de febrero de 2008, estándar de Euro III respecto a partículas para camiones de más de 12 toneladas.
- A partir del 7 de julio de 2008, estándar de Euro III respecto a partículas para camiones de entre 3,5 y 12 toneladas, autobuses y autocares.
- A partir del 3 de enero de 2012, estándar de Euro III respecto a partículas para furgonetas grandes y minibuses.
- A partir del 3 de enero de 2012, estándar de Euro IV para camiones de más de 3,5 toneladas, autobuses y autocares.

En términos de calidad del aire, la reducción de las emisiones debida a la introducción de la LEZ permite reducir los niveles de contaminación atmosférica para los contaminantes principales: NO₂ y PM₁₀. En MAYO, (2010) se presentan estimaciones de los niveles de calidad del aire para 2011 teniendo en cuenta la LEZ y otras medidas como la sustitución del parque vehicular. Referente a PM₁₀, se estima que la concentración promedio anual se encuentre por debajo del valor límite anual (40 µg/m³) y tan solo en determinadas localizaciones en las que los niveles de emisión se encuentran cercanos a los niveles máximos legislados, se recomienda la aplicación de medidas adicionales (Figura 19). En cuanto a NO₂, los resultados muestran que la introducción de la LEZ

permite reducir los niveles de inmisión de NO₂, el número de calles en los que se supera el valor límite anual para 2015 (40 µg/m³), se reduce en un 15% (Figura 19) (MAYO, 2010).

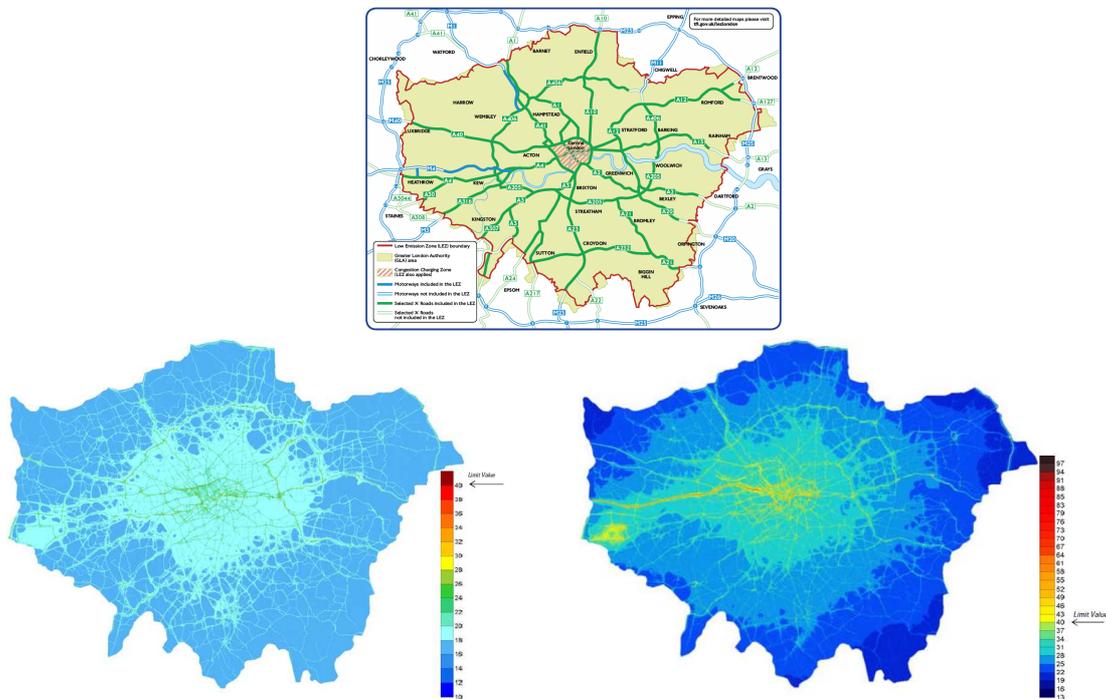


Figura 19. Aplicación de la Low Emission Zone en Londres. Arriba, mapa de la zona que delimita la LEZ con las principales vías afectadas que incluyen algunas autopistas (TLondon, 2011). Abajo-izquierda: Concentración promedio anual de PM₁₀ (µg/m³) proyectada para 2011 teniendo en cuenta la reducción de emisiones de la LEZ (MAYO, 2010); y abajo-derecha: proyección para 2011 de la concentración anual promedio de NO₂ (µg/m³) (MAYO, 2010).

En resumen, todo este conjunto de medidas, en su efecto sobre la calidad del aire, tienen una respuesta específica de carácter local debido a: composición del parque vehicular, orografía, condiciones meteorológicas características, etc. Ello implica que su evaluación es específica y por tanto sus resultados y conclusiones no son universales y generalizables.

4 Objetivos

Ante el objetivo de mejorar la calidad del aire en las ciudades, un punto clave es la disminución de las emisiones de tráfico (Nagl et al., 2007, entre otros). Para ello, no hay una única solución: mejoras tecnológicas, combustibles alternativos, vehículo eléctrico, medidas de gestión de la movilidad, etc. El objetivo debe ser la implantación de diferentes medidas complementarias entre ellas, ya que por sí solas, ninguna de ellas podrá mejorar los niveles de calidad del aire urbano a corto plazo (Lumbreras, 2008a).

El presente proyecto se enmarca dentro del conjunto de trabajos referentes al efecto del tráfico rodado en la calidad del aire urbano realizados por el grupo de Ciencias de la Tierra del BSC-CNS (Figura 20).

El objetivo principal de esta propuesta es evaluar diferentes alternativas orientadas a la mejora de la calidad del aire urbano basadas en el vehículo eléctrico y en la gestión de la movilidad. El estudio se centrará en la aplicación de dichas medidas en las ciudades de Barcelona y Madrid.

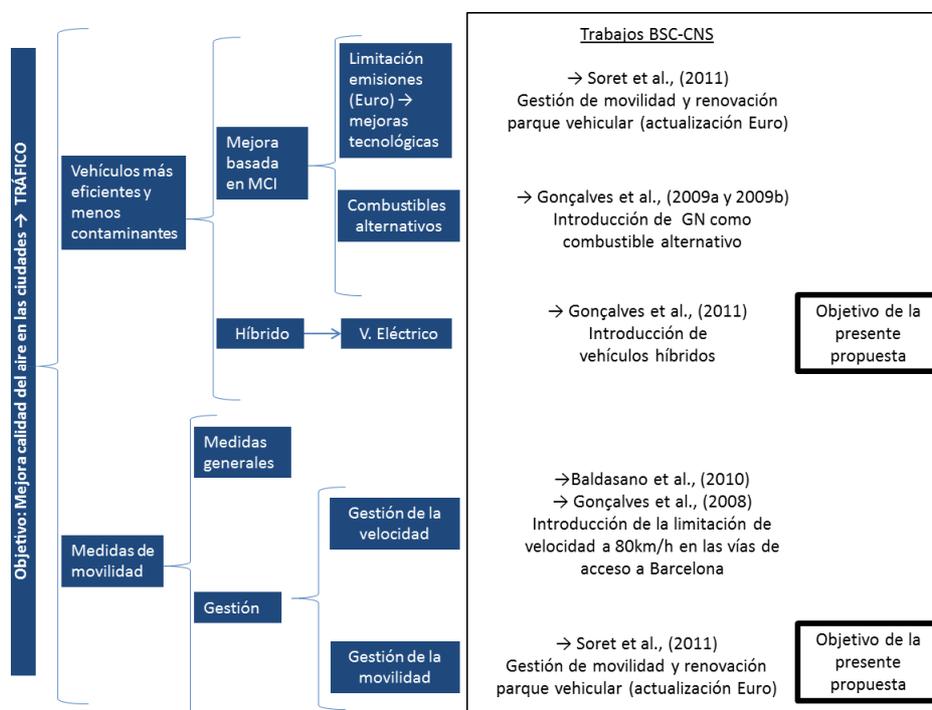


Figura 20. Diagrama con las medidas para la mejora de la calidad del aire urbano mediante la reducción de las emisiones de tráfico completado con las publicaciones del grupo de Ciencias de la Tierra del BSC-CNS.

Los objetivos complementarios del estudio son:

- Análisis de detalle de las diferentes fuentes de emisión de las ciudades de Barcelona y Madrid, y sus áreas metropolitanas.
- Selección del periodo de estudio que comprenda los patrones atmosféricos principales de la zona de estudio. Se realiza un estudio de las situaciones sinópticas más representativas y significativas que afectan a la región de estudio y se analizarán los datos de observación de calidad del aire y meteorológicos.
- Evaluación del modelo meteorológico y de calidad del aire comparando con datos medidos.

Los objetivos específicos relativos al vehículo eléctrico:

- Determinar el grado de implantación del vehículo en las ciudades que permita reducir los niveles de inmisión por debajo de los niveles legislados.
- Análisis de la introducción del VE diferenciando entre tipos de vehículos, dando especial énfasis a la introducción de motos eléctricas.
- Evaluar los efectos de cambio producidos en materia de emisiones y de calidad del aire con la introducción del VE, tanto en lo que se refiere a la reducción de emisiones directas de tráfico como al incremento de emisiones debidas a generación energética.
- Consideración de emisiones de resuspensión, y las debidas al desgaste de neumáticos, frenos y pavimento del VE, que en el resto de estudios consultados no se tienen en cuenta.
- Estudio de la capacidad del sistema eléctrico y sus fuentes de generación. Así como su proyección estimada para los próximos años.

Los objetivos específicos relativos a la gestión de la movilidad:

- Análisis de la planificación de tráfico en cada ciudad
- Definición de las medidas de movilidad óptimas en cada ciudad.
- Consideración del potencial de los medios de transporte.
- Comparación de la situación actual con un escenario tendencial, en el que la intensidad de tráfico aumente siguiendo la tendencia de los últimos años

5 Metodología

La metodología del estudio se divide en tres etapas principales:

- Selección de los días de estudio representativos de la dinámica atmosférica de la región de estudio.
- Definición de los escenarios de estudio y modelización de los mismos
- Análisis y discusión de los resultados.

El primer paso es la selección de los días de estudio. Para ello se aplica un estudio climático de retro-trayectorias para cuantificar las situaciones meteorológicas que se presentan como dominantes en la zona de interés basado en la metodología descrita en Jorba et al., (2004). Además se analizarán los datos de observación de la red de calidad del aire y estaciones meteorológicas.

El segundo paso es la definición de los escenarios de estudio mediante la elaboración del inventario de emisiones con la aplicación del modelo HERMES en base horaria y resolución espacial de 1 km x 1 km. A partir de las emisiones se realizan las simulaciones de calidad del aire con el modelo fotoquímico (CMAQ) utilizando la meteorología simulada con el modelo WRF-ARW.

Finalmente, el tercer paso consiste en analizar y discutir los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de estudio y compararlos con el escenario base.

5.1 Marco de estudio

El presente estudio se centrará geográficamente en la ciudad de Barcelona y Madrid, y sus áreas metropolitanas.

Inicialmente el año utilizado para las simulaciones será el 2004 debido a que el modelo de emisiones HERMES en la actualidad tiene dicho año como año de referencia. No obstante, se trabajará para poder actualizar el sistema.

Se seleccionarán un periodo de estudio de verano y otro de invierno representativos de la dinámica atmosférica particular en diferentes periodos del año.

5.2 Escenarios de estudio

A continuación se definen un conjunto de escenarios de estudio que permitirán analizar los resultados en cuanto a emisiones y calidad del aire de la introducción del VE y gestión de la movilidad en la ciudad de Barcelona y Madrid.

Referente a la introducción del VE.

Se analizarán dos escenarios de introducción del VE. Un primer escenario basado en las previsiones actuales que presenta el sector denominado Previsto (Pre). Y un segundo escenario en el que se fuerce la introducción del VE para mejorar drásticamente los niveles de inmisión denominado Objetivo (Ob). En ambos escenarios la introducción de la moto eléctrica tendrá un papel destacado dado su menor necesidad de carga, cosa que está facilitando su introducción en otras ciudades, especialmente asiáticas.

Paralelamente, la introducción del VE no se puede aislar-desconectar del sistema eléctrico, y de la generación de energía. Igualmente se definirán dos escenarios de recarga. Ambos escenarios tendrán en cuenta una recarga centrada básicamente en horas valle. El primero considerará una recarga basada en la capacidad del conjunto de las fuentes de generación (Gen). Y un segundo escenario que considere que toda la energía procede de fuentes renovables (Ren).

Como resultado se definirán 4 escenarios de estudio más un escenario Base con la situación actual (Tabla 5).

Tabla 5. Escenarios de estudio para el análisis del efecto del VE en la calidad del aire y emisiones.

Escenario	Descripción	Evolución de las emisiones específicas	
		Tráfico	G. Eléctrica
Base	Situación actual	-	-
Pre-Gen	Previsión de implantación del VE y recarga mediante la el mix energético previsto.		
Pre-Ren	Previsión de implantación del VE y recarga procedente de energías renovables (esencialmente eólica).		
Ob-Gen	Escenario en el que se fuerza en la introducción del VE que conlleva un mayor consumo de energía basado en el mix energético previsto.		
Ob-Ren	Se fuerza la introducción del VE y se supone un incremento de la introducción de las energías renovables.		

Referente a escenarios de gestión de movilidad.

Se definirán diferentes escenarios de movilidad en base a la planificación urbana de las ciudades de Barcelona y Madrid teniendo en cuenta:

- Redistribución el callejero actual con el objetivo de mejorar la movilidad.
- Conversión de parte del transporte privado en transporte público.

En el caso de Barcelona, los escenarios se detallan en la Tabla 6. Las supermanzanas consisten en la conversión en peatonales de las vías con menor intensidad de tráfico convirtiendo las calles que las rodean en ejes principales de comunicación.

Tabla 6. Escenarios de estudio para el análisis del efecto de la gestión de la movilidad.

Escenario	Descripción	Δ del nº de vehículos respecto E. base
Base	Situación actual	-
Business as Usual	Proyección basada en el la evolución de los últimos años con el correspondiente incremento en el número de vehículos por km.	+37%
Supermanzanas	Introducción de las supermanzanas	-32%
Supermanzanas y cambio de sentido	Introducción de las supermanzanas y determinados cambios de sentido.	-24%

5.3 Principales herramientas

Las simulaciones se realizarán mediante el sistema de modelización de la calidad del aire formado por HERMES/WRF-ARW/CMAQ.

5.3.1 Modelo de emisiones: HERMES

El inventario de emisiones se realiza mediante el modelo de emisiones HERMES (Baldasano J.M. et al., 2008), desarrollado para España con alta resolución espacial (1 km^2) y temporal (1h), y que se encuentra implantado en un entorno GIS para la estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de diferentes sectores de emisores: generación de energía eléctrica, industria, incineración, domestico-comerciales, solventes, tráfico, biogénicas, transporte aéreo y transporte portuario.

Principalmente, el modelo de emisiones (Figura 21) se centra en la estimación de los contaminantes fotoquímicos en fase gas y material particulado, incluyendo los precursores de ozono troposférico empleando una alta resolución espacial y temporal. Incluye fuentes biogénicas y antropogénicas y

es esencial a la hora de proporcionar datos al modelo de calidad del aire con una periodicidad horaria. Para ello se utiliza información como usos del suelo (usos del suelo *CORINE Land Cover Map* de alta resolución, densidad de población, ubicación industrial, etc.). Parte de un enfoque bottom-up estimando las emisiones para cada una de las celdas en las que se ha dividido el área de estudio, por medio del establecimiento de todos los parámetros para cada celda en particular. El valor total de la emisión se obtiene por la agregación de las estimaciones efectuadas para cada celda. Las emisiones horarias de cada fuente se han especiadas según las categorías del mecanismo químico Carbon Bond IV, necesario para el funcionamiento del modelo fotoquímico.

La alta complejidad del dominio de estudio (usos del suelo, topografía, orografía, etc.) y el complejo patrón de emisiones tanto naturales como antropogénicas fuerza al uso de modelos de emisiones que tengan en cuenta estas particularidades.

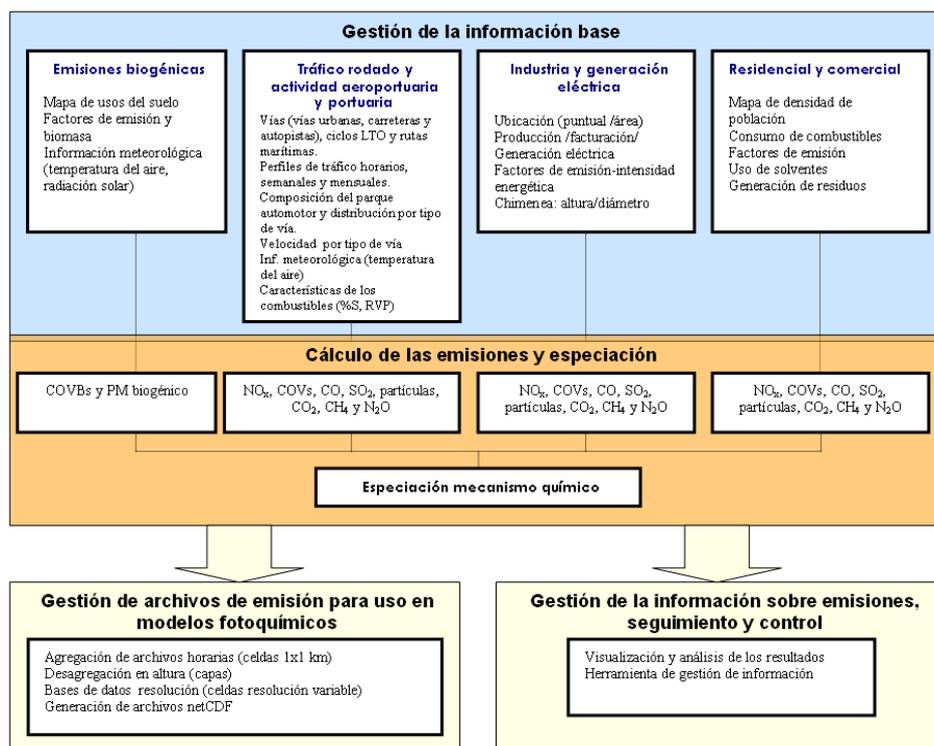


Figura 21. Estructura del modelo de emisiones HERMES.

5.3.2 Modelo meteorológico: WRF-ARW

El modelo meteorológico mesoscalar no-hidrostático WRF (Michalakes, J. et al) (Figura 22) representa el fruto de un proyecto ambicioso planteado por el National Center of Atmospheric Research (NCAR), y el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) de Estados Unidos entre otros organismos estadounidenses con el objetivo de desarrollar un modelo mesoscalar de última generación con los últimos avances en modelización meteorológica mesoscalar. Para ello

cuenta con la experiencia adquirida con el modelo meteorológica MM5 de la Pennsylvania State University y el modelo Eta del NCEP, el primero orientado a estudios científicos y el segundo a operaciones de predicción del tiempo. Este modelo se empezó a desarrollar en el año 2000 y actualmente dispone de un gran número de opciones. Éstas incluyen la capacidad de trabajar con anidamientos múltiples, tiene la capacidad de trabajar como modelo hidrostático o no-hidrostático, posee la capacidad de asimilar datos de observaciones meteorológicas, e incorpora los últimos avances en parametrizaciones físicas. El sistema se ha implementado en numerosas plataformas informáticas y se ha reestructurado para su mejor aplicación. Actualmente se considera el modelo que incorpora los últimos avances en modelización mesoscalar con todo el estado del conocimiento en este campo, siendo un modelo de referencia a nivel mundial.

Los modelos de mesoescala de área limitada necesitan de información meteorológica para la inicialización y las condiciones de contorno durante la simulación. Esta información proviene de modelos meteorológicos globales. Para ello, se ha trabajado con los reanálisis del modelo meteorológico global del National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Estos datos están en formato GRIB, y contienen información de las variables temperatura, componente U del viento, componente V del viento, geopotencial, humedad relativa para los niveles de presión estándar de 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 100, 50 hPa y en superficie la presión reducida a nivel del mar, la temperatura de la superficie del mar y el suelo, la temperatura, y las componentes horizontales del viento cada 6 horas. Esta información se transforma a la malla de trabajo del modelo mesoscalar no-hidrostático de área limitada WRF, utilizado como módulo meteorológico para las simulaciones fotoquímicas. Así, se definen los dominios de estudio y los niveles verticales del modelo. Éste, al trabajar con coordenadas verticales sigma en presión, impone la necesidad de interpolar la información original del modelo global de niveles de presión estándar a los niveles sigma. Una vez realizado el proceso se verifica que los análisis no contengan errores o inconsistencias y se validan los datos de inicialización.

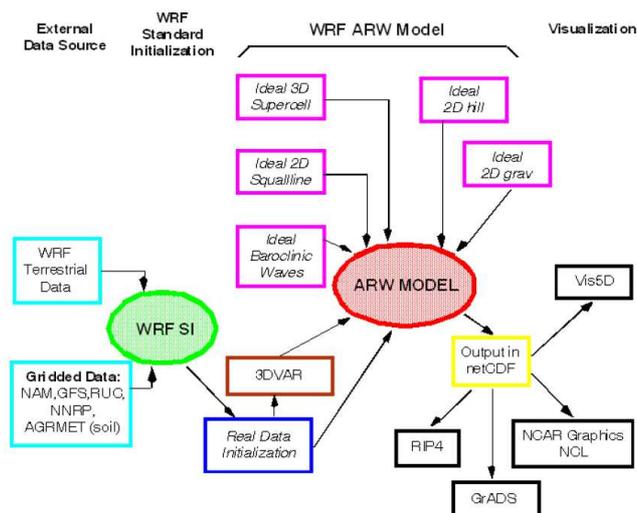


Figura 22. Sistema de modelización meteorológica mesoscalar WRF.

5.3.3 Modelo fotoquímico: CMAQ

La elección de un modelo de transporte químico (CTM) para ser aplicado en el área de estudio debe considerar hipótesis bastante estrictas, puesto que el área de estudio tiene una alta complejidad. La elección del modelo viene condicionada, además de por el dominio de estudio, por la extensión de uso del CTM y el soporte y la documentación disponible. Otro punto a considerar es la disponibilidad de modelos de código abierto. Igualmente, el modelo debe ser multiescala, permitiendo la realización de anidamientos y que esté suficientemente documentado y soportado. El sistema de transporte químico CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modelling System) (EPA, U.S.A.) (Byun, D.W. et al., 1999), además de cumplir estos requisitos, permite simular química en fase gas y heterogénea, aerosoles con química acuosa de forma modular y analizar la química en nubes de forma detallada (Figura 23). Los esquemas tipo Carbon Bond IV que se utilizan para su análisis incluyen extensiones con química acuosa y aerosoles.

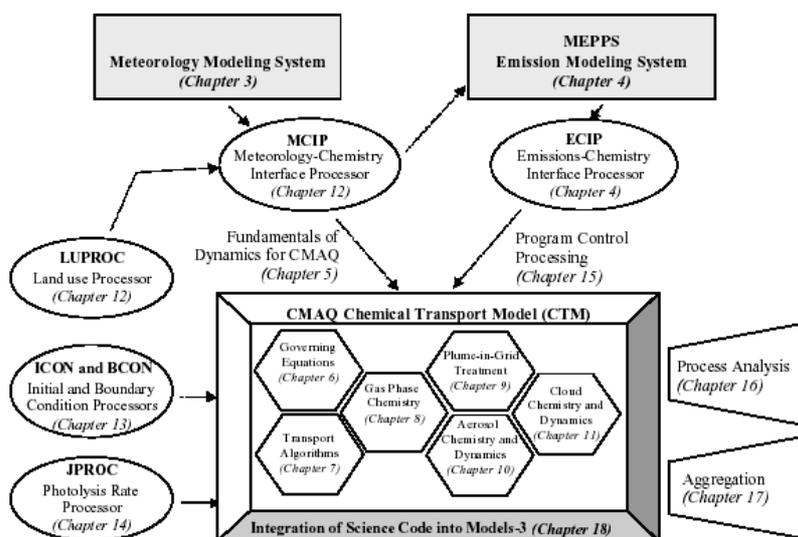


Figura 23. Estructura del modelo de calidad del aire CMAQ.

5.4 Infraestructura computacional

Para la realización de las simulaciones de calidad del aire, se cuenta con la infraestructura del supercomputador MareNostrum ubicado en el Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). Fundado en 2005, ha heredado toda la tradición de diversos grupos de investigación en supercomputación como el CEPBA (Centro Europeo de Paralelismo de Barcelona) y en modelización atmosférica como el LMA (Laboratorio de Modelización Ambiental), y se ha visto incrementado con la incorporación de MareNostrum, el Supercomputador más potente de Europa, y quinto del mundo, de acuerdo con la lista top500 de junio de 2005.

Sus características son:

- MareNostrum: supercomputador basado en procesadores PowerPC, arquitectura BladeCenter, sistema operativo abierto Linux, y red de interconexión Myrinet.
- 94.21 Teraflops de rendimiento de pico teórico (90 billones (90×10^{12}) de operaciones por segundo).
- 10.240 procesadores PowerPC 970MP en 2560 Nodos con 4 núcleos.
- 20 TB de memoria.
- 280 + 90 TB de almacenamiento.
- 3 redes de interconexión
- Myrinet
- Gigabit Ethernet
- Ethernet



Figura 24. Supercomputador MareNostrum ubicado en el BSC-CNS

6 Plan de trabajo

A continuación se presenta el plan de trabajo asociado a la elaboración de la Tesis Doctoral, con una duración aproximada de dos años. Las diferentes tareas y la estimación de su durada se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Plan de trabajo con las tareas y su duración estimada.

	Tareas	Duración	Inicio	Finalización
Proyecto	Revisión bibliográfica	8 meses	15/09/2010	15/05/2011
	Definición de objetivos	15 días	15/05/2011	31/05/2011
	Elaboración propuesta tesis	1 mes	01/06/2011	01/07/2011
	Elaboración presentación	15 días	01/07/2011	15/07/2011
	Análisis del área de estudio	1 mes	15/07/2011	15/08/2011
	Selección de los días de simulación	1 mes	15/08/2011	15/09/2011
	Planteamiento de escenarios	3 meses y medio	15/09/2011	01/01/2012
	Análisis de la configuración del modelo	3 meses	01/01/2012	01/04/2012
Tesis	Simulación del escenario base	1 mes	01/04/2012	01/05/2012
	Validación del escenario base	1 mes	01/05/2012	01/06/2012
	Simulación del resto de escenarios	3 meses	01/06/2012	01/09/2012
	Evaluación de resultados	3 meses y medio	01/09/2012	15/12/2013
	Discusión y conclusiones	3 meses y medio	15/12/2013	15/03/2013
	Elaboración del documento de tesis	3 meses	01/04/2013	01/07/2013
	Elaboración de la presentación	15 días	01/07/2013	15/07/2013

7 Referencias

- 1 ANFAC, 2011a. Estadísticas. Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones. (<http://www.anfac.com/estad.htm>, Junio 2011)
- 2 ANFAC, 2011b. Informa nº32. El Estado recaudó del automóvil, un total de 24.688 millones de € en el año 2010. Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones.
- 3 ANFAC, 2011c. Estadísticas, parque de vehículos. Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones. (<http://www.anfac.com/estad.htm>, Junio 2011)
- 4 Artiñano, B., Salvador, P., Alonso, D.G., Querol, X., Alastuey, A., 2004. Influence of traffic on the PM10 and PM2.5 urban aerosol fractions in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment* 334–335, 111–123.
- 5 Baldasano, J.M., Valera, E., Jiménez, P., 2003. Air quality data from large cities. *The Science of the Total Environment* 307, 141–165.
- 6 Baldasano J.M., L. P. Güereca, E. López, S. Gassó, P. Jimenez-Guerrero, 2008: Development of a high resolution (1 km x 1 km, 1 h) emission model for Spain: the High-Effective Resolution Modelling Emission System (HERMES). *Atmospheric Environment*, 42: 7215-7233
- 7 Baldasano J.M., Gonçalves M., Soret A., Jiménez-Guerrero P., 2010. Air pollution impacts of speed limitation measures in large cities: The need for improving traffic data in a metropolitan area . *Atmospheric Environment*, 44 (25): 2997-3006, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.05.013, ISSN:1352-2310, August 2010.
- 8 BCN, 2011. Dades bàsiques de mobilitat. Ajuntament de Barcelona. 28 p.
- 9 Bergmann M., Kirchner U., Vogt U., Benter T., 2009. On-road and laboratory investigation of low-level PM emissions of a modern diesel particulate filter equipped diesel passenger car, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 11, April 2009, Pages 1908-1916, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.039.
- 10 Berry, I., Khusid, M., Kasseris, M., i Mak, A., 2009. What's the Deal with Hybrid and Electric Cars? MIT Electric Vehicle Team.
- 11 Bost, 2009. The Boston Consulting Group: The comeback of the electric car? How real, how soon, and what must happen next.
- 12 Brandy J., O'Mahony M., 2011. Travel to work in Dublin. The potential impacts of electric vehicles on climate change and urban air quality. *Transportation research*. doi:10.1016/j.trd.2010.09.006
- 13 Byun, D.W., Ching, J.K.S. (Eds.), 1999. Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report N. EPA-600/R-99/030, Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.



- 14 CADS, 2010. Diagnosi i perspectives del vehicle elèctric a Catalunya. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible. ISBN 978-84-393-8293-5. (http://www15.gencat.cat/cads/AppPHP/images/stories/publicacions/informesespecials/2010/ver_si_ie_10_web.pdf, Junio 2011).
- 15 CE, 1970. Council Directive 70/220/EEC of 20 March 1970 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by gases from positive-ignition engines of motor vehicles. Official Journal of the European Union. L 76, 6/4/1970, p. 1–22
- 16 CE, 1996. Directive 96/62/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 1996 on ambient air quality assessment and management .Official Journal of the European Union. L 296 , 21/11/1996 P. 0055 - 0063
- 17 CE, 1997. 97/101/EC: Council Decision of 27 January 1997 establishing a reciprocal exchange of information and data from networks and individual stations measuring ambient air pollution within the Member States. Oficial Journal of the European Union. L 35, 5.2.1997, p. 14–22
- 18 CE, 2001a. Directive 2001/81/EC of the European Parliament of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. Oficial Journal of the European Union. L309/22. 27.11.2001
- 19 CE, 2001b. 2001/752/EC: Commission Decision of 17 October 2001 amending the Annexes to Council Decision 97/101/EC establishing a reciprocal exchange of information and data from networks and individual stations measuring ambient air pollution within the Member States. Oficial Journal of the European Union L 282 , 26/10/2001 P. 0069 - 0076
- 20 CE, 2004. Directive 2004/107/EC of the European Parliament of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Oficial Journal of the European Union. L23/3. 26.1.2005. 14pp
- 21 CE, 2007a. Reglamento N° 715/2007 Del Parlamento Europeo y del Consejo de junio de 2007 sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos. DO L 171 de 29.6.2007
- 22 CE, 2007b. European Comission: Sustainable Urban Transport Plans. Preparatory document in relation to the follow-up of the thematic strategy on the urban environment. Luxembourg.
- 23 CE, 2008a. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Oficial Journal of the European Union. L 152, 11.6.2008, 44p.
- 24 CE, 2008b. Reglamento (CE) no 692/2008 de la Comisión de 18 de julio de 2008 por el que se aplica y modifica el Reglamento (CE) n o 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos. DO L 199 de 28.7.2008.



- 25 CE, 2009a. Directiva 2009/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 98/70/CE en relación con las especificaciones de la gasolina, el diésel y el gasóleo, se introduce un mecanismo para controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se modifica la Directiva 1999/32/CE del Consejo en relación con las especificaciones del combustible utilizado por los buques de navegación interior y se deroga la Directiva 93/12/CEE. Diario oficial de la unión Europea. L 140/88.
- 26 CE, 2009b. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE
- 27 Chademo, 2010. Charge the moving. (<http://www.chademo.com>, Junio 2011)
- 28 Colville, R.N., Hutchinson, E.J., Mindell, J.S., Warren, R.F., 2001. The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric Environment* 35, 1537–1565.
- 29 COM, 2006. Por una Europa en movimiento. Movilidad sostenible para nuestro continente. Revisión intermedia del Libro Blanco del transporte de la Comisión Europea de 2001. Comisión Europea. 22.6.2006
- 30 COM, 2007. Libro verde. Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana. Comisión Europea. 25-9-2007
- 31 COM, 2009. Action Plan on Urban Mobility. European community. 30.9.2009
- 32 COM, 2010. Estrategia europea sobre vehículos limpios y energéticamente eficientes. Comisión Europea. 28.4.2010
- 33 COM, 2011. Libro blanco. Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y solvente. Comisión Europea. 28-3-2011.
- 34 CONC, 2007. CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context.
- 35 DEBA, 2008. Deutsche Bank Securities Inc.: Electric Cars: Plugged In – Batteries must be included.
- 36 Dieselnet, 2010. Emission standards, European Union. (<http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>, Junio 2011)
- 37 Dill J., 2004. Estimating emissions reductions from accelerated vehicle retirement programs, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 9, Issue 2, March 2004, Pages 87-106, ISSN 1361-9209, DOI: 10.1016/S1361-9209(03)00072-5.
- 38 DIUE, 2010. La indústria del vehicle verd: capacitats actuals i oportunitats de futur per a Catalunya. Departament d'innovació, Universitats i Empresa, Generalitat de Catalunya. 7 Junio de 2010. Barcelona



- 39 Dwyer H., Ayala A., Zhang S., Collins J., Huai T., Herner J., Chau W., 2010. A study of emissions from a Euro 4 light duty diesel vehicle with the European particulate measurement programme, Atmospheric Environment, Volume 44, Issue 29, September 2010, Pages 3469-3476, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.06.028.
- 40 EABEV, 2009. European Association for Battery Electric Vehicles: Energy consumption, CO2 emissions and other considerations related to Battery Electric Vehicles.
- 41 EEA, 2005. Environment and Health. European Environment Agency, European Commission, Joint Research Centre, Report 10/2005, 40 pp.
- 42 EEA, 2006. Urban sprawl in Europe: the ignored challenge. EEA Report No 10/2006. European Environment Agency.
- 43 EEA, 2009. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook — 2009. Office for Official Publications of the European Communities. No 9/2009. Luxembourg. ISBN 978-92-9213-034-3 ISSN 1725-2237 DOI 10.2800/23924
- 44 EEA, 2010a. European Union emission inventory report 1990 — 2008 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). European Environment Agency. EEA Technical report No 7/2010.
- 45 EEA, 2010b. The European environment state and outlook 2010 air pollution. European Environmental Agency. Office of the European Union. Luxembourg. ISBN 978-92-9213-152-4. doi:10.2800/57792.
- 46 EEA, 2010c. The European Environment, state and outlook 2010: Urban environment. European Environmental Agency. Office of the European Union. Copenhagen. ISBN 978-92-9213-151-7 doi:10.2800/57739
- 47 EEA, 2010d. Towards a resource-efficient transport system. TERM 2009: indicators tracking transport and environment in the European Union. European Environmental Agency. N°2/2010.
- 48 EMEP/EEA, 2009. Air Pollutant Emissions Guidebook, 2009.
- 49 EMEP/EEA, 2009. Ntziachristos L., Boulter P Emission inventory guidebook, 2009. Road vehicle tyre and brake wear.
- 50 EPOMM, 2010. Gestión de la movilidad: Definición y categorización de las medidas de gestión de la movilidad. European Platform on Mobility Management.
- 51 EPRI, 2007a. Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, vol. 1, Nationwide Greenhouse Gas Emissions; 1015325; EPRI: Palo Alto, CA.
- 52 EPRI, 2007b. Environmental Assessment of PlugIn Hybrid Electric Vehicles, vol.2, United States Air Quality Analysis Based on AEO-2006 Assumptions for 2030; 1015326; EPRI: Palo Alto, CA.
- 53 ETC/ACC, 2009. Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe. European Topic Center and Air and Climate Change, Technical paper 2009/4.



- 54 ETC/ACC, 2010. European exchange of monitoring information and state of the air quality in 2008 ETC/ACC Technical Paper 2010/1. WJA Mol, PR van Hooydonk and FAAM de Leeuw (ETC/ACC). NL, 77 pp.
- 55 Eurostat, 2011. Transport data base.
(http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database, Mayo 2011)
- 56 FECM, 2009. Guía del vehículo eléctrico. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- 57 Fenger, J., 1999. Urban air quality. *Atmospheric Environment* 33, 4877–4900.
- 58 FITSA, 2007. Tecnologías de propulsión híbrida y las evidencias científicas de su eficacia. Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil
- 59 FITSA, 2008. Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión: situación y perspectivas para automoción. Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil. ISBN: 978-84-612-2622-1.
- 60 Ghose, M.K., Paul, R., Banerjee, S.K., 2004. Assessment of the impacts of vehicular emissions on urban air quality and its management in Indian context: the case of Kolkata (Calcutta). *Environmental Science & Policy* 7, 345–351.
- 61 Gonçalves M., Jiménez-Guerrero P., López E., Baldasano J.M., 2008. Air quality models sensitivity to on-road traffic speed representation: Effects on air quality of 80 km h⁻¹ speed limit in the Barcelona Metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 42 (36): 8389-8402, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.08.022. ISSN:1352-2310 , November 2008.
- 62 Gonçalves M., Jiménez-Guerrero P., Baldasano J.M., 2009a. Emissions variation in urban areas resulting from the introduction of natural gas vehicles: Application to Barcelona and Madrid Greater Areas (Spain). *Science of The Total Environment*, 407 (10): 3269-3281, doi:10.1016/j.scitotenv.2009.01.039 , ISSN: 0048-9697 , March 2009.
- 63 Gonçalves M., Jiménez-Guerrero P., Baldasano J.M., 2009b. High resolution modeling of the effects of alternative fuels use on urban air quality: Introduction of natural gas vehicles in Barcelona and Madrid Greater Areas (Spain) . *Science of The Total Environment*, 407 (1): 776-790, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.10.017. ISSN: 0048-9697, January 2009.
- 64 Gonçalves M., Jiménez-Guerrero P., Baldasano J.M., 2011. The Challenge of Improving Urban Air Quality. Effects of Hybrid Cars Introduction in Barcelona and Madrid (Spain). *Int. J. Environment and Pollution* (in press)
- 65 IDAE,2008. Movele. Instituto para la diversificación y el ahorro energético. (<http://www.movele.es/portada.html>, Junio 2011)
- 66 IEA, 2008. Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios and Strategies to 2050. International Energy Agency. OECD Publishing. ISBN: 9789264041424
- 67 IEA, 2009. Technology Roadmap. Electric and plug-in hybrid electric vehicles. International Energy Agency. OECD Publishing.



- 68 ILEA, 2005. Institute for Lifecycle Environmental Assessment; Mazza, P. et al.: Wind-to-wheel energy assessment. Seattle.
- 69 INE, 2011. Total de viajeros y por tipo de transporte. (www.ine.es , Junio 2011)
- 70 ITRE, 2010. Challenges for a European market for electric vehicles. Industri, research and energy, Policy department. European Parliament. Brussels.
- 71 IU, 2011. Plug-in Electric Vehicles: A practical plan for progress. Indiana University. School of Public and Environmental Affairs at Indiana University. Febrero 2011.
- 72 IVECAT, 2010. Estratègia d'impuls del vehicle elèctric a Catalunya. Generalitat de Catalunya.
- 73 Jansen K. H., Brown T. M. and Samuelsen G. S., 2010. Emissions impacts of plug-in hybrid electric vehicle deployment on the US Western grid J. Power Sources 195 5409–16
- 74 Jorba, O., Perez, C., Rocadenbosch, F., Baldasano, J.M., 2004. Cluster analysis of 4-day back trajectories arriving in the Barcelona Area, Spain, from 1997 to 2002. Journal of Applied Meteorology 43, 887-901.
- 75 Kahn, M., Schwartz, J., 2008. Urban air pollution progress despite sprawl: The 'greening' of the vehicle fleet, Journal of Urban Economics, Volume 63, Issue 3, May 2008, Pages 775-787, ISSN 0094-1190, DOI:10.1016/j.jue.2007.06.004.
- 76 Kantor I., et al., 2010. Air quality and environmental impacts of alternative vehicle technologies in Ontario, Canada, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 35, Issue 10, Novel Hydrogen Production Technologies and Applications, Novel Hydrogen Production Technologies and Applications, Pages 5145-5153, ISSN 0360-3199, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.071.
- 77 Keller, J., Andreani-Aksoyoglu, S., Tinguely, M., Flemming, J., Heldstab, J., Keller, M., Zbinden, R., Prevot, A.S.H., 2008. The impact of reducing the maximum speed limit on motorways in Switzerland to 80 km h⁻¹ on emissions and peak ozone. Environmental Modelling and Software 23, 322–332.
- 78 Kintner-Meyer M, Schneider K and Pratt R, 2007. Impact Assessment of Plug-In Hybrid Vehicles on Electric Utilities and Regional US Power Grids. Part I: Technical Analysis. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory.
- 79 Knipping E. and Duvall M., 2007. Environmental Assessment of Plug-In Electric Hybrid Vehicles vol 1 Nationwide Greenhouse Gas Emissions. Palo Alto, CA: Electric Power Research.
- 80 LIVE, 2010. Live-Endolla't a Barcelona. Ajuntament de Barcelona. Barcelona Activa. (<http://w41.bcn.cat/web/guest;jsessionid=48C205D609956D45C0B23965911F3DA6>, Junio 2011)
- 81 Lumbreras J., Valdes M., Borge R., Rodriguez M.E., 2008a. Assessment of vehicle emissions projections in Madrid (Spain) from 2004 to 2012 considering several control strategies, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 42, Issue 4, May 2008, Pages 646-658, ISSN 0965-8564, DOI: 10.1016/j.tra.2008.01.026.



- 82 Lumbreras J., Valdes M., Borge R., Rodriguez M.E., 2008b. A model to calculate consistent atmospheric emission projections and its application to Spain, *Atmospheric Environment*, Volume 42, Issue 21, July 2008, Pages 5251-5266, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.067.
- 83 Lunz B., Hackbarth A., Leuthold M., 2011. Presentation: A Study on Plug-In Hybrid Electric Vehicles. Wind to Wheel congress in Barcelona. 2011-05-26.
- 84 M. Fomento, 2008. Encuesta de movilidad de las personas residentes en España (Movilia 2006/2007). (http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ESTADISTICAS_Y_PUBLICACIONES/INFORMACION_ESTADISTICA/Movilidad/Movilia2006_2007/default.htm, Junio 2011).
- 85 M. Fomento, 2011. Boletín estadístico on-line. (<http://www.fomento.gob.es/BE/?nivel=2&orden=18000000>, Mayo 2011)
- 86 M.Presidencia, 2011. Real Decreto 647/2011, de 9 de mayo, por el que se regula la actividad de gestor de cargas del sistema para la realización de servicios de recarga energética. Boletín ofical del Estado Núm. 122 Lunes 23 de mayo de 2011 Sec. I. Pág. 51098
- 87 MARM, 2010a. Inventario de emisiones a la atmósfera de España. Edición 2011 (serie 1990-2009) Sumatorio de los resultados de acidificadores, eutrofizadores y precursores de ozono. Madrid, Diciembre 2010. (http://www.mma.es/secciones/calidad_contaminacion/atmosfera/emisiones/pdf/Sumario_Inventario_de_Emisiones_de_Espania_OTROS_GASES_-_serie_1990-2009.pdf, Junio 2011)
- 88 MARM, 2010b. Informe de la evaluación de la calidad del aire en 2009. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- 89 MAYO, 2009. Mayor of London: An electric vehicle delivery plan for London. London. (<http://www.london.gov.uk/archive/mayor/publications/2009/docs/electric-vehicles-plan.pdf>, Junio 2011)
- 90 MAYO, 2010. Clearing the air. The Mayor's Air Quality Strategy. Greater London Authority. 2010. London. (<http://www.london.gov.uk/publication/mayors-air-quality-strategy>, Junio 2011).
- 91 Michalakes, J., J. Dudhia, D. Gill, T. Henderson, J. Klemp, W. Skamarock, and W. Wang, 2005: The Weather Research and Forecasting Model: Software architecture and performance. Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. W. Zwiefhofer and G. Mozdzyński, World Scientific, 2005, pp 156 – 168.
- 92 MIT, 2000. Massachusetts Institute of Technology; Weiss, M.A. et al.: On the road in 2020 – A life-cycle analysis of new automobile technologies. Boston.
- 93 MITIC, 2011. Resolución de 20 de diciembre de 2010, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se publica la Resolución del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, por la que se establecen las bases reguladoras para la segunda convocatoria del Programa de Ayudas del IDAE para la Adquisición y Uso de Vehículos Eléctricos, en el marco del Proyecto Piloto de Movilidad Eléctrica, dentro del Plan de Activación del Ahorro y la Eficiencia Energética 2008-2011 y del Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012. BOE-A-2011-109



- 94 Monks P.S., et al., 2009. Atmospheric composition change - global and regional air quality, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 33, ACCENT Synthesis, October 2009, Pages 5268-5350, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.08.021.
- 95 Moriarty P., Honnery D., 2007. The prospects for global green car mobility, *Journal of Cleaner Production*, Volume 16, Issue 16, November 2008, Pages 1717-1726, ISSN 0959-6526, DOI:10.1016/j.jclepro.2007.10.025.
- 96 Moriarty P., Honnery D., 2008a. The prospects for global green car mobility, *Journal of Cleaner Production*, Volume 16, Issue 16, November 2008, Pages 1717-1726, ISSN 0959-6526, DOI: 10.1016/j.jclepro.2007.10.025.
- 97 Moriarty P., Honnery D., 2008b. Low-mobility: the future of transport. *Futures* 40, 865-872.
- 98 Nagl, C., Mossmann, L., Schneider, J., 2007. Assessment of plans and programmes reported under 1996/62/EC – Final Report. Report REP-0079. European Commission. Viena, December 2006, 139 pp. Available from: (<http://ec.europa.eu/environment/air/ambient.htm>, May, 2011).
- 99 NOW, 2009. Timeline: History of the Electric Car. (<http://www.pbs.org/now/shows/223/electric-cartimeline.html>, Junio 2011)
- 100 NREL, 2007. Costs and Emissions Associated with Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging in the Xcel Energy Colorado Service Territory. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-640-41410 (<http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/41410.pdf> ,Junio 2011).
- 101 Ntziachristos, L., Samaras Z., 2000. COPERT III. Computer programme to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors (Version 2.1). European Environmental Agency Technical Report N.49, 86 pp.
- 102 Paine C., 2006. Who killed the electric car? Sony Pictures Classics.
- 103 Panis L., et al., 2011. PM, NOx and CO2 emission reductions from speed management policies in Europe, *Transport Policy*, Volume 18, Issue 1, January 2011, Pages 32-37, ISSN 0967-070X, DOI: 10.1016/j.tranpol.2010.05.005.
- 104 Pay M.T., Jiménez-Guerrero P., Baldasano JM, 2011. Implementation of resuspension from paved roads for the improvement of CALIOPE air quality system in Spain . *Atmospheric Environment* 45 (3): 802-807, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.10.032, ISSN: 1352-2310
- 105 PBL, 2009. Electric driving – Evaluating transitions based on system options. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL); Nagelhout, D. & Ros, J.P.M.:
- 106 Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Plana, F., Ruiz, C.R., Cots, N., Massague, G., Puig, O., 2001. PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment* 35, 6407–6419.
- 107 REE, 2011a. Demanda eléctrica en tiempo real. Red Eléctrica de España. (<https://demanda.ree.es/demandaEng.html>, Junio 2011)
- 108 REE, 2011b. El sistema eléctrico español. Red Eléctrica de España. Madrid.



- 109 REE, 2011c. El vehículo eléctrico, visión del operador del sistema. Red Eléctrica de España, Departamento de gestión de la demanda. 12 de Mayo de 2011.
- 110 Renault, 2011. Sistema Quickdrop. Renault. (<http://www.renault.com/en/capeco2/vehicule-electrique/pages/entretien-thierry-koskas.aspx>, Junio 2011)
- 111 SchneiderE, 2010. Vehículo Eléctrico ¿Tan sencillo como Plug&Play?. Junio 2010.
- 112 Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N., 1998. Atmospheric chemistry and physics. John Willey & Sons, Inc., 1326 pp.
- 113 SGPPCC, 2008. RESOLUCIÓN de 14 de enero de 2008, de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo de 7 de diciembre de 2007, del Consejo de Ministros, por el que se aprueba el II Programa Nacional de Reducción de Emisiones, conforme a la Directiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos. Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático.
- 114 Sillman, S., He, D., 2002. Some theoretical results concerning O₃-NO_x-VOC chemistry and NO_x-VOC indicators. *J Geophys Res* 107 (D22):4659. doi:10.1029/2001JD001123.
- 115 Sioshansi, R. Denholm, P., 2009. Emissions impacts and benefits of plug-in hybrid electric vehicles and vehicle-to-grid services? *Environmental Science&Technology*, (2009) 43.
- 116 Soret A., Jimenez-Guerrero P., Baldasano J.M., 2011. Comprehensive air quality planning for the Barcelona Metropolitan Area through traffic management. *Atmospheric Pollution Research*, 2 (3): 255-266, doi:10.5094/APR.2011.032, ISSN: 1309-1042, July 2011.
- 117 Stephan C. H. and Sullivan J., 2008. Environmental and energy implications of plug-in hybrid-electric vehicles *Environ. Sci. Technol.* 42 1185–90 Institute
- 118 Thompson T., Webber M. and Allen D. T., 2009. Air quality impacts of using overnight electricity generation to charge plug-in hybrid electric vehicles for daytime use *Environ. Res. Lett.* 4 014002.
- 119 Thompson T.M., King C.W., Allen D.T., Webber M.E., 2001. Air quality impacts of plug-in hybridelectric vehicles in Texas: evaluating threebattery charging scenarios. *Environmental research letters*. 024004 (11pp).
- 120 TLondon, 2008. Low Emissions Zone. Transport of London. (<http://www.tfl.gov.uk/roadusers/lez/17678.aspx> , Junio 2011)
- 121 TLondon, 2011. From 3 January 2012 there will be tighter emissions standards and more vehicle types included. Are you affected?. Transport of London. (<http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/roadusers/lez/LEZ/lez-leaflet-jan-2012.pdf> , Junio 2011)
- 122 Twigg M., 2011. Catalytic control of emissions from cars, *Catalysis Today*, Volume 163, Issue 1, Special issue on Industrial Catalysis, 12 April 2011, Pages 33-41, ISSN 0920-5861, DOI: 10.1016/j.cattod.2010.12.044.



- 123 UNSA, 2009. Technologies for sustainable vehicles. University of South Australia & South Australian Department of Trade and Economic Development.
- 124 Valerio F., Stella A., Pala M., Balducci D., Piccardo MT., Cipolla M., 2008. The effect of EURO-0 vehicle substitution on polycyclic aromatic hydrocarbon and carbon monoxide concentrations in an urban area, Atmospheric Environment, Volume 43, Issue 8, March 2009, Pages 1520-1526, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.11.039.
- 125 Van Wee, B., Moll, H.C., Dirks, J., 2000. Environmental impact of scrapping old cars. Transportation Research Part D 5 (2), 137–143.
- 126 WHO, 2004. Health aspects of air pollution. Results from WHO project “Systematic review of health aspects of air pollution in Europe”. WHO Regional Office for Europe.
- 127 WHO, 2006. Air Quality Guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. World Health Organization.
- 128 WHO, 2007. Health relevance of particulate matter from various sources. Report on a WHO Workshop Bonn, Germany, 26–27 March 2007. World Health Organization Regional Office for Europe.(www.euro.who.int/en/whatwe-do/health-topics/environmental-health/air-quality/publications/pre2009/health-relevance-of-particulate-matter-from-various-sources, Mayo 2011).
- 129 WHO, 2008. Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution. World Health Organization Regional Office for Europe. (www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78647/E91843.pdf, Mayo 2011).
- 130 WWF, 2008. Plugged in, the end of the oil age. World Wide Fund for Nature.
- 131 WWF, 2009. World Wide Fund for Nature (WWF): Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO2-Emissionen in Deutschland. Kurzstudie. Frankfurt.