

movilidad geográfica en un mundo condicionado por el clima

JOHN B. HEYWOOD

El contexto y el desafío ¹

La movilidad geográfica siempre ha sido un valor apreciado. Durante gran parte de la historia de la humanidad ha significado desplazar individuos o mercancías a la velocidad a la que una persona es capaz de caminar, un caballo avanzar, un buey tirar de un carro o un barco surcar el agua impulsado por remos o velas. Hasta el siglo XIX, en que aprendimos a explotar la energía de los hidrocarburos, no fuimos capaces de desplazar ni individuos ni mercancías a mucha más velocidad. La invención del vehículo a motor propulsado por petróleo a finales del siglo XIX y del avión a principios del XX abrió el camino a nuevas maneras de viajar e hizo posible una mayor velocidad en los desplazamientos. Las carreteras ofrecían una amplitud de itinerarios de la que el ferrocarril carecía y los aviones tan sólo precisaban vías aéreas para viajar de un lugar a otro.

Como resultado de estas innovaciones el siglo XX se convirtió en la «edad dorada» de la movilidad geográfica. El volumen de desplazamientos de personas y mercancías creció a un ritmo sin precedentes. Terminado el siglo, individuos cuyas vidas habían transcurrido hasta dentro de un radio de cien kilómetros de distancia de su lugar de nacimiento viajaban ahora hasta continentes remotos por negocios o por placer como si tal cosa. Las materias primas, los productos manufacturados y los alimentos de un extremo del mundo eran accesibles para los habitan-

tes del otro extremo. Las distintas regiones geográficas no participaron de forma igualitaria en esta expansión. Llegado el siglo XXI, para el ciudadano medio de un país rico las largas distancias se han convertido prácticamente en algo irrelevante. Los habitantes de los países pobres, sin embargo, continúan en gran medida desplazándose como lo hicieron sus antepasados.

Todo el mundo está a favor de la movilidad geográfica, tanto por el hecho en sí como porque les permite, de una parte, superar las distancias que separan sus hogares de los lugares donde trabajan, compran, van a la escuela o hacen negocios, visitan amigos o familiares, y de otra, conocer sitios nuevos. A los negocios les conviene la movilidad porque les ayuda a superar las distancias que los separan de sus fuentes de materias primas, de sus proveedores y sus mercados, y a evitar el impacto negativo de la congestión. Sin embargo, crece la preocupación por el hecho de que los sistemas de movilidad dependen hoy por hoy de una única fuente de energía: el petróleo. Y la tensión existente entre el deseo humano de movilidad y su preocupación por el impacto negativo asociado a la misma plantea cuestiones fundamentales relativas a su futuro.

Durante la segunda mitad del siglo XX las consecuencias negativas del aumento de la movilidad se hicieron evidentes a escala regional e incluso global. La contaminación generada por los motores de combustión inter-

¹
Fuente: WBCSD (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, 2004).

na de cientos de vehículos causa la degradación de la calidad del aire en más y más ciudades. La prospección, extracción, transporte y refinamiento de petróleo para su empleo como combustible en medios de transporte daña el medioambiente en un grado cada vez mayor. El ruido que producen en la tierra y en el aire los vehículos que transportan personas y mercancías interrumpe la tranquilidad de millones de personas. Y las emisiones de dióxido de carbono procedente de la combustión de hidrocarburos, gran parte de la cual está relacionada con el transporte, están afectando al clima de nuestro planeta.

Nos vemos por tanto obligados a preguntarnos si el auge de la movilidad geográfica que ha definido los cincuenta últimos años es *sostenible*. El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible o WBCSD define *movilidad sostenible* como «la capacidad de satisfacer las necesidades de la población de desplazarse con libertad, comunicarse, comerciar y establecer relaciones sin sacrificar por ello otros valores esenciales humanos y ecológicos hoy o en el futuro» (WBCSD 2001). De acuerdo con esta definición, los usos actuales de medios de transporte no son sostenibles.

Dicho sencillamente, somos demasiados, consumimos demasiados recursos y lo hacemos de maneras que están dañando irreversiblemente nuestro planeta. El consumo es excesivo para la salud de la Tierra y, además, crece día a día debido al aumento demográfico, a las progresivas afluencia, urbanización y suburbanización y al continuo aumento de las expectativas de los consumidores. Y sin embargo es un hecho casi universalmente reconocido que la movilidad es uno de los elementos más importantes de un nivel de vida deseable.

La mayoría de los ciudadanos de los países ricos estamos satisfechos con nuestros sistemas de transporte, y gran parte del resto de la población mundial aspira a tener lo que nosotros tenemos. Pero cada vez somos más conscientes del precio de la movilidad, el cual incluye el desembolso económico que los usuarios hacen a los proveedores de la misma para que éstos, a su vez, puedan costearla. Pero la cosa va más lejos. El aumento de la movilidad ha venido acompañado de congestión circulatoria, riesgo de muerte y accidente, alteración de ecosistemas y comunidades, contaminación terrestre y del agua y emisión de gases de efecto invernadero.

El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible puso en marcha un gran proyecto llamado «Movilidad en 2030: Los desafíos a la sostenibilidad» (WBCSD 2004), que identificaba siete grandes objetivos para hacer sostenible el transporte:

1. Asegurarse de que las emisiones de agentes contaminantes convencionales relacionados con el transporte no constituyen un riesgo significativo para la salud pública en ningún lugar del mundo.
2. Limitar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) relacionados con el transporte a niveles sostenibles.

3. Reducir de forma significativa el número global de muertes y lesiones graves por accidentes de tráfico tanto en los países desarrollados como en los países en vías de desarrollo.
4. Reducir la contaminación acústica relacionada con los transportes.
5. Mitigar la congestión circulatoria.
6. Paliar las diferencias de acceso a la movilidad que impiden a los habitantes de los países más pobres y a los miembros de grupos sociales económicamente desfavorecidos mejorar sus condiciones de vida y las de sus familias.
7. Preservar y aumentar el acceso a la movilidad para la población en general, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo.

Es una lista de objetivos extremadamente ambiciosa. Nuestro desafío es obtener progresos en algunos puntos concretos sin perder de vista el contexto general. Para hacer frente a este reto resulta de ayuda plantearnos la pregunta: ¿cuáles son los elementos verdaderamente *no sostenibles* de los medios de transporte actuales? Hace una década participé en la elaboración de un estudio de la US National Academies sobre este tema (NRC 1997), que concluía que los factores de insostenibilidad eran dos: el primero era el riesgo de cambio climático causado por las emisiones de CO₂, a las cuales el transporte contribuye de manera significativa. El otro era la degradación de los ecosistemas y la reducción de la biodiversidad resultantes de las ya mencionadas emisiones y del impacto de las infraestructuras. Se trata de dos asuntos fundamentales porque la movilidad creciente está agravándolos de forma inevitable. Ambos están relacionados con las exigencias de energía del transporte. En este ensayo explicaré cómo podemos reducir el consumo de energía de los medios de transporte y la emisión de gases de efecto invernadero y, en consecuencia, su impacto en el cambio climático. Para ello no basta centrarse en el segundo objetivo del WBCSD de reducir las emisiones de GEI. Al mismo tiempo debemos tratar de que se cumplan los objetivos seis y siete, porque el aumento de la movilidad es esencial para asegurar el crecimiento económico en todas las regiones del mundo. Y también debe avanzarse en el resto de los objetivos si la mejora en los niveles de movilidad ha de seguir siendo un factor decisivo en el progreso económico y social.

Tamaño, crecimiento y complejidad

Nuestros sistemas de transporte en el mundo desarrollado desplazan a personas en automóvil, autobús, tren y avión. En los países en desarrollo también se usan la bicicleta y otros vehículos de dos y tres ruedas. El transporte de mercancías se hace principalmente por carretera y ferrocarril a partes iguales, aunque el transporte aéreo aumenta con rapidez. Los camiones pesados son los más empleados en el transporte por carretera. Los sistemas de transporte pue-

den ser de escala urbana, nacional o regional. Las figs. 1 y 2 muestran el estado actual y la proyección a futuro de las estadísticas básicas por región y modalidad de transporte tanto de personas como de mercancías. El crecimiento continuado que se produce cada año a un ritmo de un pequeño tanto por ciento es evidente. En la actualidad las regiones desarrolladas y en vías de desarrollo del mundo son comparables en escala, pero los índices de crecimiento en los países en desarrollo son más altos. Estas proyecciones (WBCSD 2004) están basadas en gran medida en el crecimiento demográfico y en la renta per cápita. Para 2050 se espera que estas estimaciones se hayan duplicado.

Las cifras indican la gran magnitud que ha adquirido el transporte: el número de vehículos en uso, los kilómetros que recorren y el peso de las mercancías que transportan. Con una población mundial de 6,8 millones y 800 millones de vehículos, la distancia media recorrida es de 5.000 kilómetros por persona y año (en Estados Unidos la media es de 20.000 kilómetros por persona y año y en África de 3.000). En el presente son los países desarrollados los que dominan el uso de vehículos, pero pronto los alcanzarán grandes áreas del mundo en vías de desarrollo. El transporte de mercancías es de 8 toneladas por persona y día. El consumo de combustible en los transportes se acerca a los 3.500 litros por persona y año, del cual casi la mitad es gasolina, un tercio es diesel y una sexta parte combusti-

ble para aviones. Todo ello cifra la producción total mundial de petróleo en alrededor de 92 barriles al día (cada barril contiene 159 litros). Estas tasas de consumo son tan grandes que resultan inabarcables. Pero además crecen a una tasa anual de aproximadamente el 2%.

¿Por qué preocuparnos del futuro? y, sobre todo, ¿cómo está afectando nuestro consumo energético a nuestro entorno? La razón es el tamaño de estos sistemas, su crecimiento aparentemente inexorable y el daño que hacen al medioambiente. Funcionan con combustibles derivados del petróleo (gasolina, diesel y combustible de aviones) a unas cantidades inimaginables. Cuando estos combustibles se queman en el interior de los motores el carbón presente en ellos se oxida y se convierte en el dióxido de carbono causante del efecto invernadero. La cantidad de dióxido de carbono que penetra en la atmósfera como resultado de la quema de estos combustibles es inmenso. Los transportes son responsables del 25% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Conforme los países en vías de desarrollo se motorizan, cosa que está ocurriendo a gran velocidad, la demanda global de combustible supondrá un problema. También aumentará de forma significativa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Los vehículos ligeros de Estados Unidos (automóviles, furgonetas, todoterrenos y camionetas), cuya cantidad asciende a unos 250 millones,



Figura 1(a)

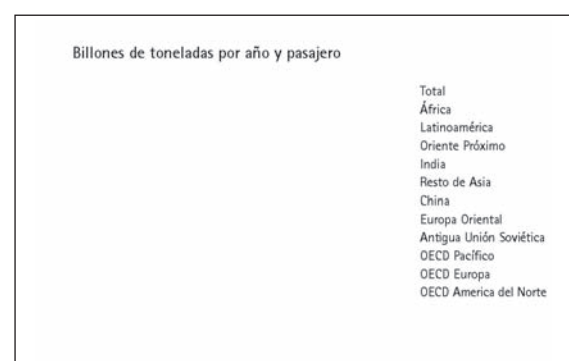


Figura 2(a)

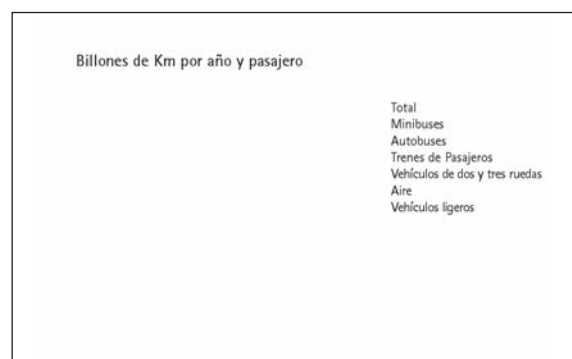


Figura 1(b)

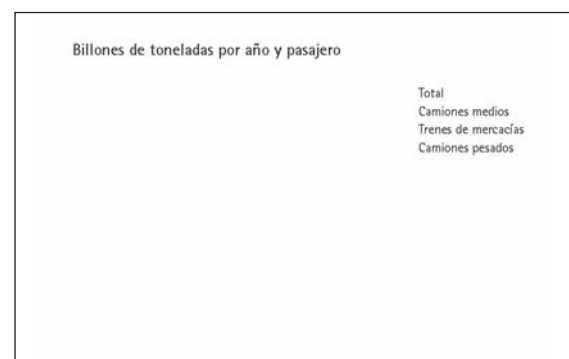


Figura 2(b)

Figura 1. (a) Movilidad por individuo y región; (b) movilidad por individuo y modalidad de transporte; proyección hasta 2050 (WBCSD 2004).

Figura 2. (a) Transporte de mercancías por región; (b) Transporte de mercancías por modalidad; proyección hasta 2050 (WBCSD 2004).

consumen en la actualidad 600.000 millones de litros de gasolina por año. Si otros países consumieran gasolina al mismo ritmo, el consumo mundial crecería en casi un 10%.

Varios países han empleado estándares de emisión de CO₂ para reducir el consumo de energía en los transportes y la emisión de GEI. Puesto que los hidrocarburos derivados del petróleo tienen un 87% de carbón en su composición, su consumo y las emisiones de CO₂ resultantes están directamente relacionadas: la combustión de 1 kilo de combustible libera 3,2 kilos de CO₂. Se espera que la reducción de consumo establecida por las nuevas regulaciones sea del 30% en 2020; dentro de más de 10 años. En 25 años (es decir, para 2035), se cree posible llegar a un factor de reducción 2. Mirando más hacia el futuro, a 2050, las estimaciones indican que hará falta al menos una reducción del 70% de los niveles de emisión de GEI para mantener los niveles de CO₂ de la atmósfera por debajo de las 550 ppm (partes por millón), una concentración considerada por muchos como la mejor a la que podemos aspirar en nuestros intentos por detener el calentamiento global. Todos estos objetivos, a corto, medio y largo plazo, presentan numerosos desafíos, porque los cambios necesarios para que se cumplan (ya sea el desarrollo de mejores tecnologías o la implementación de medidas de conservación) a *tamaño escala* requieren grandes cantidades de esfuerzo, tiempo y dinero.

Nuestras opciones de cambio

Si miramos al futuro, ¿qué oportunidades tenemos para hacer los medios de transporte más sostenibles a un coste aceptable? Existen varias opciones que supondrían una diferencia fundamental. Podríamos mejorar o cambiar la tecnología de los vehículos para hacerla más eficiente; podríamos cambiar la manera en que usamos nuestros vehículos para consumir menos combustible; podríamos reducir el tamaño y el peso de nuestros vehículos; podríamos usar otros tipos de combustible con menores huellas de carbono. Es muy probable que tengamos que adoptar

todas estas medidas si queremos llegar a la reducción drástica de la energía consumida en transportes y a la emisión de gases de efecto invernadero que se considera necesaria.

Al examinar las alternativas debemos tener presente los siguientes aspectos de nuestro actual sistema de transportes. En primer lugar, se adapta bien a su contexto primario, el de proporcionar movilidad en el mundo desarrollado. El paso del tiempo le ha permitido evolucionar de forma que mantiene un equilibrio económico entre sus costes y las necesidades de sus usuarios. En segundo lugar, este sistema vasto y optimizado depende por completo de una sola fuente de energía: el petróleo. Y ha desarrollado tecnologías —motores de combustión interna en la tierra y motores de inyección (turbina de gas) para el aire— de manera que el funcionamiento de los vehículos se adapta perfectamente a las propiedades de este combustible. Por último, los vehículos son duraderos, por lo que la reducción de su impacto medioambiental se prolonga durante mucho tiempo. Limitar y después reducir el impacto local y global de la energía empleada en transportes llevará décadas.

Fijémonos en la eficacia con la que empleamos energía en nuestros vehículos. Los índices de eficacia pueden llevar a malentendidos: lo que cuenta en realidad es el combustible que se consume cuando se está conduciendo. La figura 3 muestra el flujo de energía en un típico turismo de tamaño medio que circula en ciudad. Sólo alrededor del 16% de la energía generada por el combustible impulsa de hecho las ruedas: sus otras funciones son contrarrestar la resistencia aerodinámica, la del rodamiento de los neumáticos y acelerar el vehículo. El consumo de combustibles puede limitarse reduciendo las pérdidas en el sistema de propulsión (Kasseris y Heywood 2007). El motor a gasolina actual tiene una eficiencia de alrededor de un 20% en la circulación urbana, aunque puede llegar al 35% en condiciones óptimas. Pero muchos desplazamientos cortos con la transmisión y el motor fríos, sumados al impacto del clima invernal y a una conducción agresiva empeo-

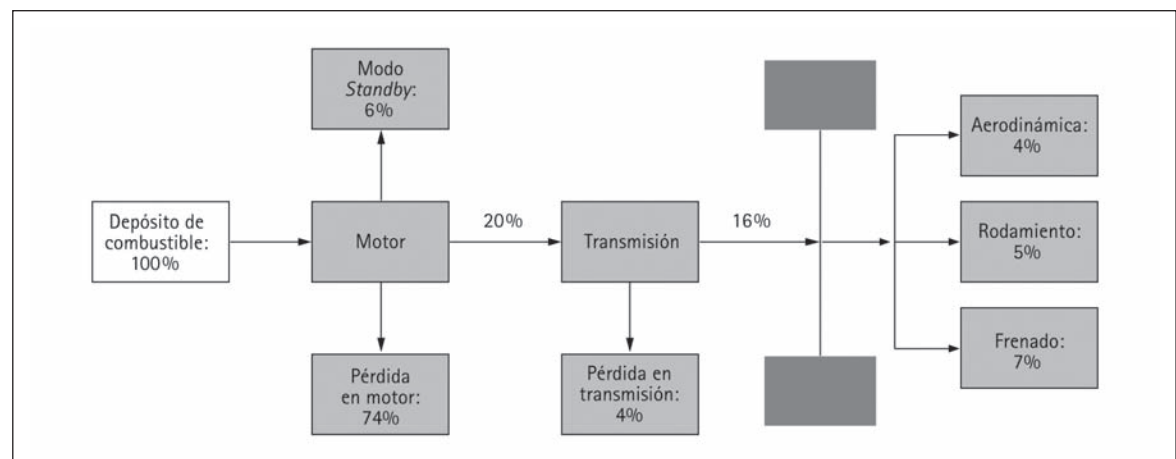


Figura 3. La energía fluye desde el depósito del vehículo a las ruedas en un coche de pasajeros típico en un área urbana (Bandivadekar et al. 2008).

ran de manera significativa el consumo de combustible, como también lo hace el tiempo que se pasa con el coche detenido pero con el motor en marcha. Estos aspectos de la conducción real reducen de hecho el índice medio de eficiencia, de manera que tan sólo un 10% aproximadamente de la energía química almacenada en el combustible sirve de hecho para mover las ruedas. Amory Lovins, un gran defensor de los vehículos más ligeros y eficientes, lo explica de esta manera: con un vehículo de un 10% de eficiencia y con un conductor, un pasajero y equipaje —lo que supondría una carga útil aproximada de 140 kilos, un 10% del peso del vehículo— sólo un 1% del combustible del vehículo se emplea para mover la carga útil (Lovins et al. 2005). No hay duda de que esto puede mejorarse.

Cuando hacemos el cálculo de los índices de emisión de gases de efecto invernadero generada por el uso de vehículos debemos incluir la energía necesaria para producir el combustible a partir del petróleo en crudo y después distribuirlo, conducir el vehículo durante su vida media (de 150.000–240.000 kilómetros), así como la fabricación, el mantenimiento y la posterior destrucción del vehículo. Estas fases se conocen con los nombres de *well-to-tank* (eficiencia desde el pozo al depósito), que equivale a alrededor del 15% del consumo total de energía y emisiones de GEI, *tank-to-wheel* (del depósito a las ruedas, 75%) y *cradle-to-grave* (literalmente de la cuna a la tumba, aunque sería más apropiado decir de la fábrica al desguace), que supone un 10%. Vemos que la energía requerida para producir el combustible deviene especialmente importante cuando tomamos en consideración combustibles no derivados del petróleo, como los biocombustibles o el hidrógeno, así como los nuevos sistemas de propulsión de vehículos, pues lo que importa aquí es lo que realmente se usa y lo que se emite.

Enseguida explicaré que mejorando la tecnología existente de los vehículos ligeros se puede conseguir mucho. Si se invierte más dinero en mejorar la eficiencia de los trenes de transmisión existentes, se reduce el peso de los vehículos y la resistencia aerodinámica y si se mejoran los neumáticos podremos reducir el consumo de combustible a alrededor de una tercera parte del actual durante los próximos 20 años, lo que supondría una mejora anual de alrededor del 3%. Esta reducción del consumo de combustible costaría unos 2.000 dólares por vehículo. Teniendo en cuenta lo que costarán los carburantes en el futuro, esta cantidad no incrementaría el coste general de poseer un vehículo. De hecho, el incremento de los costes que supone mantener un vehículo se ha producido de manera continuada durante los últimos 25 años, pero lo que sucede es que hemos invertido en coches más grandes, pesados y veloces y en camiones más ligeros, en lugar de hacerlo en eficiencia en el consumo de carburantes. Aunque resulta especialmente evidente en Estados Unidos, este cambio gradual a coches más grandes y potentes se da y sigue dándose en todas partes.

¿Cuáles son nuestras opciones en cuanto a motores o sistemas de propulsión? Podemos seguir empleando motores de ignición que funcionen con gasolina o con biocombustibles como el etanol. Los vehículos eléctricos híbridos o HEV (*hybrid electrical vehicles*), con motor de combustión interna y motor y batería eléctricos, son otra opción cada vez más viable. En la próxima década más o menos, los vehículos eléctricos híbridos recargables en la red podrían convertirse en una alternativa seria, que emplearía cualquiera de los carburantes líquidos existentes junto con electricidad para recargar sus baterías. Más a largo plazo, es posible predecir para 2030 el uso generalizado de vehículos de hidrógeno y de vehículos de batería eléctrica, pero ello podrá suponer un aumento de los costes. Además es probable que para entonces sean ya una realidad la reducción del peso de los vehículos y de la resistencia a los neumáticos y al aire, con lo que se mejorarán los sistemas de propulsión. Hay que señalar que la incorporación de un motor y una transmisión más pequeños, ligeros y eficientes a vehículos ligeros supondría combinar todos estos avances de maneras especialmente ventajosas.

Los motores de gasolina e ignición estándares siguen mejorando su potencia por unidad de volumen desplazado así como su eficiencia operativa media en aproximadamente un 2% por año. Estas mejoras proceden de la reducción de la fricción, del control variable de las válvulas del motor, de la desactivación de los cilindros cuando el motor no está muy cargado, de la inyección directa de combustible al cilindro del motor, del aumento de la tasa de compresión del motor y del uso de avanzados sensores que controlan el funcionamiento del motor. Se está aumentando el rendimiento del motor de gasolina incrementando la presión de aire mediante un turbocargador. Ello permite reducir el tamaño del tren de transmisión y que éste sea más eficiente. Los motores diesel también pueden mejorar su eficiencia, aunque no tanto como los de gasolina. Los que se fabriquen en el futuro deberán incorporar tecnología (purgadores y catalizadores) para reducir la emisión de gases en sus tubos de escape con objeto de controlar las partículas contaminantes y el óxido de nitrógeno (NO_x). Ello supondrá costes más elevados y penalización en el precio del combustible. Por lo tanto, los futuros motores de gasolina o diesel con turbocargadores serán más parecidos en cuanto a funcionamiento, potencia por volumen desplazado y eficiencia operativa media. Y, lo que es más importante, el futuro motor de gasolina será significativamente más económico —alrededor de la mitad de precio— que el diesel.

Los HEV que se fabrican y se venden hoy día suponen un porcentaje muy pequeño dentro del mercado. Los híbridos actuales están dotados de una batería, un motor eléctrico, un generador, controles de potencia eléctrica y un avanzado sistema de transmisión. Casi todas las configuraciones actuales emplean una combinación híbrida similar, en la que la transmisión tiene capacidad para des-

conectar tanto el motor de combustión como el eléctrico de las ruedas, y un sistema de gestión inteligente que apaga el motor cuando la carga es ligera o no hay carga, y que recupera hasta el 90% de la energía de frenado convirtiéndola en energía eléctrica. Estos «híbridos recargables» reducen de forma significativa el consumo de combustible, y la magnitud del ahorro dependerá del tipo de conducción (por ejemplo, si es conducción urbana a baja velocidad o de alta velocidad por autopista) además de otros detalles clave. En el futuro, cuando esté perfeccionada la tecnología híbrida, la reducción del consumo de combustible en motores de gasolina podrá alcanzar el 40 o el 50%. La «conducción eléctrica» reforzada por un motor de combustión interna ya constituye una atractiva opción de futuro. Es probable, sin embargo, que resulte entre 2.000 y 3.000 dólares más cara que el tren de transmisión convencional mejorado (Bandivadekar et al. 2008).

El vehículo híbrido conectable a la red (o PHEV, por sus siglas en inglés) funciona, como su nombre indica, con gasolina y electricidad y lleva una batería más grande que puede recargarse desde un enchufe o toma de corriente. Emplea un sistema de batería avanzado (por ejemplo, con tecnología de litio-iones) en una configuración similar a la del híbrido convencional. El PHEV supera el umbral de la batería de estado de carga o SOC y opera con un dispositivo en «modo de agotamiento» (CD, *charge-depleting*) que emplea la energía eléctrica de la batería para proveer de potencia al vehículo. Cuando llega el umbral mínimo de SOC, el vehículo cambia al modo de agotamiento, que equivale al del HEV convencional. Funciona con energía eléctrica y de combustión. Conviene señalar que la electricidad que usa el vehículo consume cerca de tres veces más que la energía primaria producida con carburantes. La tecnología de vehículos híbridos conectables a la red está aún en fase de desarrollo y resulta demasiado costosa para que pueda implantarse en el mercado. Además necesitará electricidad «verde» para que su contribución a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero sea significativa o supere a la de los híbridos recargables convencionales.

Los vehículos de batería eléctrica o BEV obtienen toda la energía que requieren de la red eléctrica. Para su implantación será necesario un replanteamiento del tamaño, el coste y la gama de los vehículos, ya que la gama media de 650 kilómetros de autonomía con el depósito lleno no parece plausible en un vehículo completamente eléctrico desde el punto de vista de los costes y del peso; incluso pensar en 300 kilómetros parece poco viable. Por tanto los BEV no tienen de momento grandes posibilidades comerciales, aunque están concebidos fundamentalmente para uso urbano.

La célula de combustible para propulsión de vehículos incorpora un sistema de membrana de intercambio de protones (PEM) para alimentar un motor eléctrico, que hace funcionar el vehículo, por lo general con una confi-

guración en serie. Una célula de combustible opera como una batería, en el sentido de que transforma la energía química presente en el hidrógeno del carburante en electricidad. Su principal diferencia respecto a la batería es que la entrada de combustible (hidrógeno) y oxidante (aire) a los electrodos de la célula es continua. En una configuración híbrida de célula de combustible, la batería, que almacena energía eléctrica, mejora el rendimiento general del sistema y permite la regeneración del mismo durante la frenada. Este híbrido emplea la misma batería de alta potencia de litio-iones, que ahora empieza a incorporarse en los vehículos híbridos convencionales. Los vehículos de célula de combustible deben todavía superar numerosos obstáculos tecnológicos y reducir significativamente sus costes antes de que puedan comercializarse a gran escala. Concretamente, el rendimiento y la durabilidad de la célula de combustible están limitados por las propiedades de los materiales de membrana de electrolito actuales, por los requerimientos del catalizador y por lo complicado de los sistemas de gestión necesarios para su funcionamiento. Además de ello hace falta desarrollar sistemas de almacenamiento del hidrógeno dentro de los propios vehículos para poder ampliar la gama de los mismos, lo que por el momento supone un problema de costes y peso. Por supuesto, producir y distribuir hidrógeno, es decir, crear una infraestructura de este combustible, supone también un gran desafío.

Los sistemas de transmisión de los vehículos son también muy importantes. Los automáticos son muy populares en Estados Unidos, sobre todo debido a su facilidad de uso, y esta popularidad se está extendiendo a otros países. Es muy probable que su eficiencia mejore en un periodo de corto a medio plazo al incrementar en número de marchas y reducir así la pérdida de energía por el mecanismo de cojinetes y gracias a elementos de sellado y sistema hidráulico. Aunque las marchas de cuatro cambios siguen dominando el mercado estadounidense, las de cinco se están volviendo habituales. Las de seis velocidades y las manuales automatizadas existen en algunos modelos de coches y es probable que su uso se estandarice en la próxima década. Los vehículos de lujo han empezado además a incorporar cajas de cambio de siete y ocho marchas, que podrían ser habituales a medio plazo. Por tanto para el futuro se predice una eficiencia en el sistema de cambio de marchas de entre el 90 y el 95%. Se trata de una mejora significativa en comparación con la anterior generación de sistemas de transmisión.

La reducción del peso de los vehículos es otra forma obvia de mejorar el consumo de combustible. La figura 4 ilustra las necesidades de combustible de un vehículo ligero de tamaño medio en Estados Unidos. La regla general es que una reducción del 10% en el peso del vehículo puede reducir el consumo de carburante en un 5-7% si se acompaña de una reducción proporcional del tamaño del motor, de materiales de fabricación más ligeros y de un rediseño

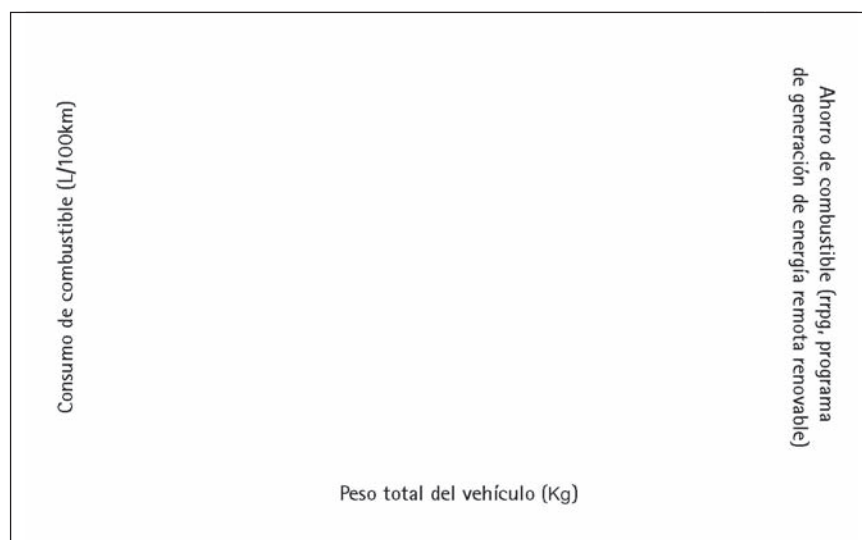


Figura 4. Relación entre consumo de combustible y peso en vehículos ligeros basado en los modelos de vehículos estadounidenses en 2005 (Cheah et al. 2008).

adecuado del coche. Eliminar una plaza de un automóvil de pasajeros puede reducir su peso en un 10%, aproximadamente. Sin embargo, el tamaño de los coches es una de las prestaciones que los consumidores más valoran.

La reducción de la resistencia al rodado de los neumáticos es otra manera de ahorrar combustible. No olvidemos que las nuevas tecnologías de fabricación de neumáticos pueden introducirse primero en el mercado de recambio de ruedas y por tanto obtener resultados más rápidamente que si se implementan sólo en la fase de fabricación del coche. La supervisión de la presión de los neumáticos y que éstos tengan el aire adecuado también son factores que contribuyen al consumo eficiente.

La reducción de emisión de GEI en vehículos de gasolina y diesel con motor de combustión interna y en HEV es proporcional a la reducción en consumo de petróleo. Esta reducción podría ir más allá, si el contenido en carbón de los combustibles pudiera rebajarse empleando biocombustibles con niveles bajos de carbón. Para los PHEV, los BEV y los FCV, las emisiones «del pozo al depósito» producidas durante la generación y el suministro de electricidad e hidrógeno afectan en gran medida el potencial de reducción en la emisión de GEI. La mejora de la eficiencia en la producción de electricidad, así como las cada vez mayores contribuciones procedentes de fuentes de energía nucleares y renovables y de hidrocarburos con captura y almacenamiento de carbono podrían muy bien disminuir las mencionadas emisiones *well-to-tank* debidas a la generación de electricidad. De esta manera, los híbridos conectables a la red se convertirían en una alternativa atractiva a la hora de limitar las emisiones GEI y de petróleo.

Examinemos con mayor detalle nuestras opciones en cuanto a combustibles se refiere. Nuestros sistemas de transporte actuales —por tierra, mar y aire— han empleado de forma extensiva hidrocarburos derivados del petró-

leo. Ello se debe a que son combustibles líquidos, tienen una alta densidad de energía y encajan bien con las tecnologías actuales: motores de ignición, diesel y turbinas de gas. Un ejemplo de su atractivo para la industria de la automoción es que cada vez que repostamos hoy nuestros coches, la energía de los combustibles fluye por la manguera que sostenemos en la mano a una velocidad de 10 megavatios, lo que asegura otros 650 kilómetros de conducción y habiendo empleado sólo 5 minutos en repostar.

Puesto que los combustibles derivados del petróleo dominan el sector de transportes, han desarrollado unos sistemas de refinado y distribución a gran escala. En Estados Unidos se distribuye anualmente más de 1.365.000 de litros de derivados refinados del petróleo, lo que supone un tercio de la producción mundial. La capacidad de fuentes de combustible alternativas de ser compatibles e integrarse en estos sistemas de refinado y distribución es por tanto un aspecto clave de su viabilidad.

¿Cuáles son las alternativas posibles? El uso de gas natural en transporte varía desde menos del 1% en vehículos de la gran mayoría de los países hasta el 10% en un par de ellos, donde las políticas tributarias lo han convertido en una alternativa económica. El gas natural presenta características favorables a su empleo en el motor de combustión, pero se trata de un combustible gaseoso que debe comprimirse y después almacenarse en tanques de alta presión dentro del vehículo. Los inconvenientes de un combustible gaseoso (menor potencia específica del motor, gama de conducción limitada, tareas de compresión en el momento de repostar, necesidad de llevar a bordo tanques de almacenamiento con las limitaciones de espacio que ello supone, costes extra y emisión de metano) contrarrestan con mucho la principal ventaja de este combustible: su baja tasa de emisión de GEI.

Las arenas petrolíferas (por ejemplo, los depósitos alquitranosos de Canadá) y el petróleo pesado (más denso que el normal, se concentra en Venezuela) ya constituyen una fracción creciente (de alrededor del 5%) de los combustibles empleados en transportes. Con el tiempo, otras fuentes no petrolíferas de otros combustibles fósiles, tales como la conversión de gas natural a estado líquido, el aceite de esquisto bituminoso y el carbón, serán una realidad. Estas alternativas pueden ser combustibles de alta calidad y se espera que su volumen de producción crezca de forma continuada. Sin embargo, las emisiones de dióxido de carbono que se liberan durante su producción son más altas que las de la producción basada en derivados del petróleo, debido a la cantidad de energía requerida para obtenerlos y a su elevado contenido de carbono.

Los combustibles líquidos derivados de biomasa tienen potencial para contribuir de forma significativa al suministro de energía para el transporte. Fuentes de biomasa incluyen el maíz, las hierbas de la pradera, el pasto varilla, el miscanto, los desechos forestales y urbanos y otros cultivos específicamente orientados a la fabricación

de biocombustibles. Los productos manufacturados finales incluyen el metanol, el biodiesel y —es probable que en el futuro— los combustibles análogos a la gasolina y el diesel. Antes de su implantación es necesario resolver cuestiones cruciales como la disponibilidad de tierras de cultivo adecuadas, las emisiones de gases de efecto invernadero consecuencia del cambio de uso de la tierra de cultivo, las necesidades de agua y fertilizantes, la degradación de la tierra con el paso del tiempo, la contaminación de las aguas y las necesidades energéticas durante la producción. Existe un potencial importante en la contribución de los biocombustibles al transporte, pero su grado exacto aún debe someterse a extensos análisis. Dentro de 20 años, en Estados Unidos alrededor de un 30% de la energía empleada en transportes podría proceder de biocombustibles.

Los biocombustibles, la electricidad y el hidrógeno requieren distintos análisis del ciclo de producción y distribución de combustibles, que hoy constituye un factor clave. Los impactos de los biocombustibles varían: pueden ser desde, como en el caso del etano hecho de maíz, comparables en cuanto a emisión de gases GEI durante el ciclo completo de vehículos de gasolina, a inferior que el de éstos (el etanol fabricado a partir de caña de azúcar en Brasil) y a mucho menor cuando se trata de un combustible basado en la conversión en celulosa de biomasa. La carga que pueden suponer la necesidad de energía eléctrica y la emisión de GEI varían, puesto que dependen de cómo se genera la electricidad. Cuando se genera a partir de hidrocarburos la carga que supone la electricidad es sustancial, y el uso mucho más eficiente de la electricidad en el vehículo queda anulado por la ineficiencia procedente de la generación de electricidad en la planta eléctrica y en la distribución. Las cuestiones que importan aquí son: ¿cuáles son las fuentes viables de electricidad verde —es decir, de baja emisión de GEI— para el transporte con, digamos, híbridos conectables, y cuándo estará disponible dicha electricidad? El hidrógeno plantea inte-

rogantes similares: ¿cómo puede producirse y distribuirse con bajos niveles de emisión de GEI? Cualquier hidrógeno que se produzca a corto plazo habrá de proceder casi obligatoriamente del gas natural, cuyos índices actuales de consumo de energía y de emisión de GEI no difieren gran cosa de los resultantes del empleo de vehículos con combustibles derivados del petróleo.

Rendimiento de estas tecnologías de transporte

Hemos hecho proyecciones del rendimiento y los costes de todas estas tecnologías de propulsión para vehículos a 25 años. La figura 5 muestra las proyecciones para los principales vehículos con tren de transmisión (Bandivadekar et al. 2008). Se prevé un consumo de combustible más eficiente (con un rendimiento y un tamaño del vehículo constantes), pero también un aumento de los costes. La reducción media del tamaño del vehículo (del 20%) costará unos 700 dólares. En Europa y Asia el tamaño medio de los vehículos equivale a dos tercios del de Estados Unidos. Además, en Europa aproximadamente la mitad de los vehículos de pasajeros son diesel, de manera que la eficiencia media de consumo de combustible es ya mayor.

En general estos futuros vehículos más eficientes con sus diferentes trenes de transmisión costarán unos 2.000 dólares más que los de gasolina, entre 2.500 y 3.000 los vehículos de turbogasolina, entre 3.500 y 4.300 los diesel y entre 4.500 y 5.500 los híbridos, todos en comparación con sus actuales equivalentes convencionales, de motor de gasolina. Los híbridos conectables a la red y los vehículos de célula de combustible costarán probablemente entre 6.000 y 8.000 dólares más. En el momento presente el concepto de vehículo con sistema de batería y una capacidad significativa de almacenamiento interno no está aún listo para su implantación generalizada en el mercado.

En los vehículos de tecnología convencional, el ahorro de combustible que estos nuevos sistemas de propulsión hacen posible compensaría el aumento en los costes, tomando como referencia el precio actual de los carburantes. Pero a fecha de hoy este incentivo sólo ha resultado en un menor coste de las mejoras tecnológicas aplicadas a los vehículos y todavía no ha creado un mercado fuerte y en expansión para tecnologías nuevas y más eficientes tales como los vehículos híbridos, aunque los elevados precios del combustible y el hecho de que el diesel está gravado con menos impuestos que la gasolina, además del perfeccionamiento de la tecnología diesel, han hecho que esta opción suponga el 50% del nuevo mercado automovilístico de Europa.

Por lo tanto es importante completar el análisis ciclo de vida de un vehículo teniendo en cuenta el consumo de energía y las emisiones de GEI tanto durante su fabricación como durante su uso. El ciclo de producción del vehículo supone en la actualidad un 10% de la energía y de la emisión de GEI. Dentro de unos 25 años habrá ascendido al 15-20% debido al uso creciente de nuevos mate-

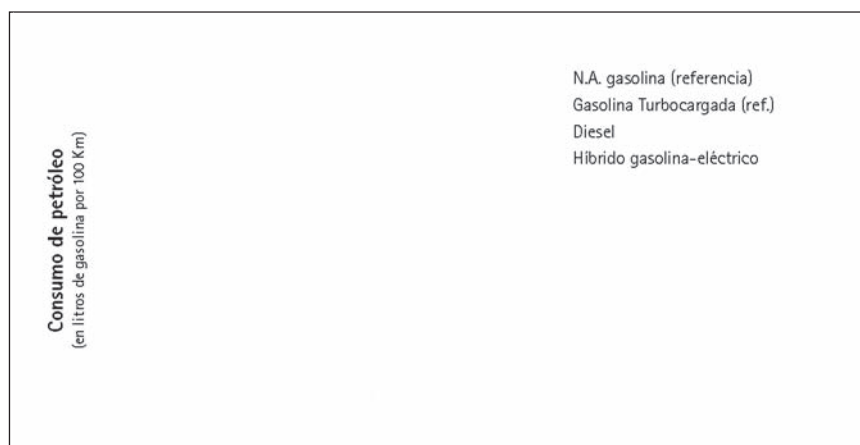


Figura 5. Consumo de combustible en los vehículos actuales y futuros con diferentes trenes de transmisión avanzados para 2006, 2020 y 2035 (Bandivadekar et al. 2008).

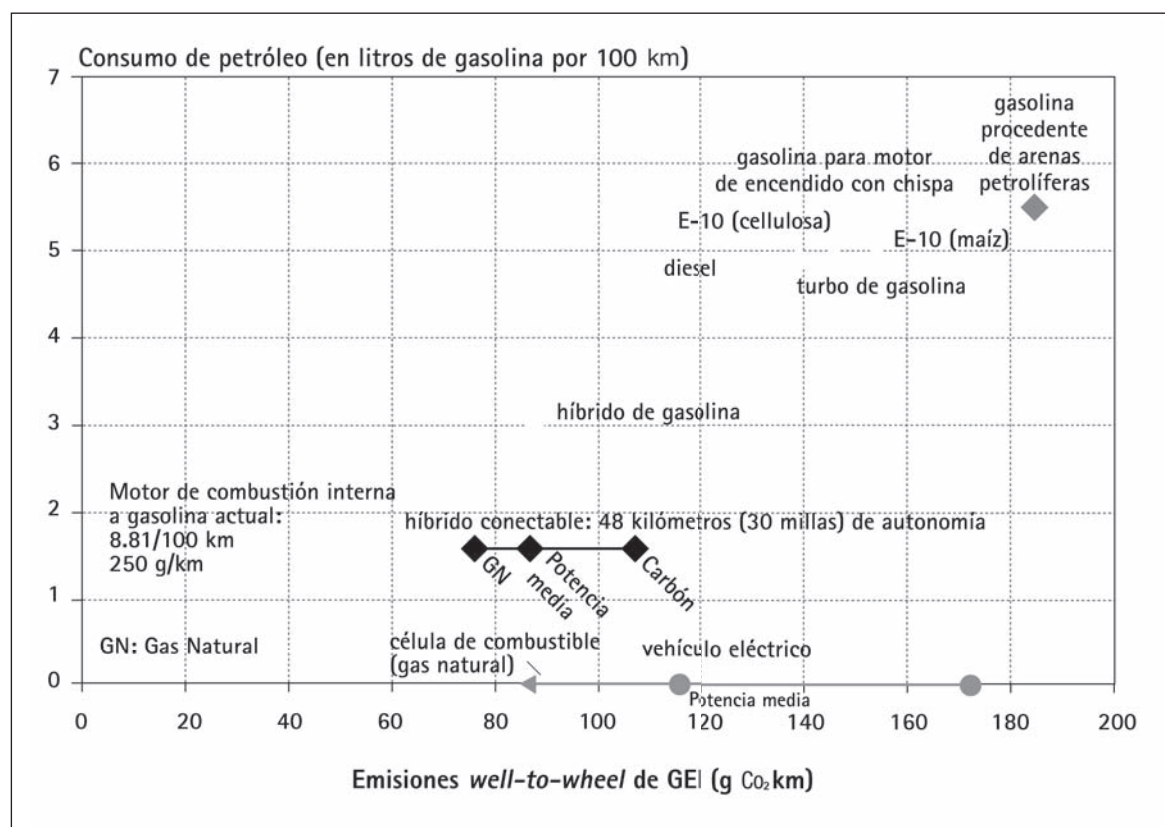


Figura 6. Consumo de petróleo y emisiones *well-to-wheel* de GEI de los futuros coches (2035) con sistemas de propulsión y fuentes de combustible diferentes (Bandivadekar et al. 2008).

riales más ligeros y más intensivos desde el punto de vista energético, así como a la reducción en el consumo de carburantes. El ciclo de producción y distribución de carburantes procedentes de hidrocarburos supone alrededor de un 20% del consumo de energía y emisión de GEI; los combustibles de hidrocarburos procedentes de fuentes petrolíferas no convencionales, como las arenas petrolíferas, supondrán aproximadamente el doble.

La figura 6 ilustra una comparación entre el consumo de petróleo como carburante y las emisiones *well-to-wheel* de GEI de estos distintos sistemas de propulsión del futuro, en un automóvil estadounidense de peso medio y con una proyección a 25 años. En lo que se refiere a consumo de combustible, los vehículos híbridos, eléctricos y de célula de combustible revelan una reducción significativa. Pero, claro está, estos vehículos también consumen electricidad de la red o hidrógeno procedente de una nueva infraestructura de producción y distribución. Estos requerimientos energéticos adicionales anulan la reducción de emisiones de GEI. Con sistemas de suministro eléctrico derivados del carbón y del gas natural (como los existentes en Estados Unidos), las emisiones de GEI adicionales están compensadas por las emisiones de la generación de electricidad. Con generación de energía eléctrica nuclear y renovable el panorama se vuelve más halagüeño. Las emisiones de un coche con batería eléc-

trica son peores en gran parte debido al peso extra que suponen las baterías. Como vemos aquí, las futuras emisiones de GEI por vehículo podrían con tiempo reducirse a una tercera parte de las que se dan actualmente. Las mejoras en los motores convencionales, en los sistemas de cambio de marchas y la reducción de la longitud y el peso de los vehículos, logrará disminuir el consumo de petróleo en un 30 o 40%. Podría obtenerse un 10% adicional mediante la utilización de cantidades plausibles de biocombustibles. La tecnología híbrida, por su parte, aporta una significativa reducción del 40%. Aunque los híbridos conectables y los de células de combustible con hidrógeno reducen significativamente e incluso eliminan el consumo de petróleo, en la fase de transición necesaria para su implantación su impacto en cuanto a emisión de gases de efecto invernadero no es mucho menor que el de los híbridos convencionales de gasolina.

Ventajas y comerciabilidad

Hasta el momento hemos comparado las características entre vehículos tomando como referencia un rendimiento constante y un tamaño fijo; es decir, cuando proyectamos estos vehículos a futuro sus características no varían. Los datos que poseemos de las dos últimas décadas demuestran que el rendimiento y el tamaño de los vehículos han aumentado a un ritmo constante, en espe-

cial el rendimiento. En Estados Unidos, mientras que los trenes de transmisión de los vehículos se han vuelto cada vez más eficientes en los últimos 20 años, el consumo de combustible en carretera se ha mantenido constante. En Europa, la mejora del rendimiento no ha sido tan grande y alrededor de la mitad de los avances en cuanto a eficiencia del motor se han traducido en reducción de consumo de combustible. Es esencial concentrar esfuerzos en reducir el consumo actual de combustible, y en el caso de Estados Unidos puede decirse que, desde principios de la década de 1980 estos esfuerzos han sido prácticamente inexistentes, mientras que aproximadamente la mitad de los beneficios potenciales del ahorro de combustible corresponden a Europa. Los compradores y los usuarios de vehículos han demostrado una clara preferencia por un mejor rendimiento y un mayor tamaño, causando que el mercado se centre en ofrecer estas prestaciones. Los fabricantes de automóviles compiten entre sí para ofrecer un rendimiento y un tamaño cada vez mayores. En Estados Unidos el énfasis en el alto rendimiento ha sido tal que, junto con aumentos en el tamaño de los coches, ha generado una pérdida en la reducción del consumo de combustible de cerca del 25%. En Europa la demanda de alto rendimiento de los coches no ha sido tan fuerte, y por eso se ha llegado al 50% de la reducción considerada plausible en el consumo de combustible.

Ya hemos dicho que el peso y el tamaño del vehículo pueden también contribuir de forma significativa a reducir el consumo de petróleo y la emisión de gases de efecto invernadero. Se trata de una oportunidad importante y una ventaja a sumar a las que supondrá la optimización de los trenes de transmisión de los vehículos. La reducción directa del peso mediante la utilización de materiales más ligeros y cambios en el diseño básico de los vehículos (que, por ejemplo, maximicen el volumen interior para obtener una longitud y una anchura determinadas) hacen posible nuevas reducciones de peso si se limita el tamaño de los componentes de fabricación. Un cambio en el tamaño de los vehículos también reduciría el

peso medio y puede lograrse en principio cambiando los volúmenes de producción de los modelos existentes en el mercado. Nuestros cálculos indican que podría lograrse un reducción del 20% del peso medio de los vehículos a lo largo de 25 años y a un coste de 700 dólares. El potencial máximo para reducción de peso en Estados Unidos es de cerca del 35%, pero esta reducción adicional del 20% sería significativa. Estamos hablando de reducciones sustanciales en el peso de los vehículos que requieren replantearse el diseño automovilístico. Una reducción del 20-35% por ciento del peso de los vehículos supondría una reducción de 12-20% del consumo de combustibles (Bandivadekar et al. 2008).

Penetración en el mercado: una cuestión fundamental

Las mejoras en los sistemas de propulsión y en la tecnología de los vehículos sólo tienen verdadera repercusión cuando se aplican en grandes cantidades. Estas tecnologías perfeccionadas deben por tanto poseer un gran atractivo comercial, su volumen de producción debe ser alto y mantenerse así durante 5-10 años para que tengan un impacto duradero en el mercado automovilístico. Una vez se conocen los índices de ahorro de combustible y reducción de emisiones GEI que prometen estos nuevos vehículos, entonces puede estudiarse cómo evolucionan dichos índices una vez los nuevos modelos entran en el mercado y los viejos van desapareciendo. Lo que es importante, aunque difícil de calcular, es la tasa de penetración de mercado o la evolución en los volúmenes de producción de estas nuevas tecnologías.

¿Qué es lo que dicta la introducción en el mercado de tecnologías de motor mejoradas y de combustibles alternativos? Incluso si la demanda de nuevos sistemas de propulsión está creciendo, las existencias podrían ser limitadas. Ello podría deberse a limitaciones en recursos de ingeniería y de capital, así como en las cadenas de suministros. El automóvil es un producto altamente complejo y las expectativas del consumidor cada vez son mayores. El desarrollo

Período de implementación	Tecnología de vehículos				
	Gasolina Inyección directa con turbocargador	Diesel de alta velocidad con catalizador para reducción de material particulado y óxido de nitrógeno (NOx)	Híbrido gasolina/ batería eléctrica	Híbrido recargable gasolina/batería eléctrica	Híbrido de célula de combustible con almacenamiento de hidrógeno a bordo
Vehículo competitivo en el mercado	~ 2-3 años	~ 3 años	~ 3 años	~ 8-10 años	~ 12-15 años
Penetración en la producción de nuevos vehículos	~ 10 años	~ 15 años	~ 15 años	~ 15 años	~ 20-25 años
Penetración en el mercado en general	~ 10 años	~ 10-15 años	~ 10-15 años	~ 15 años	~ 20 años
Total de tiempo requerido	~ 20 años	~ 25 años	25-30 años	~ 30-35 años	~ 50 años

Cuadro 1. Plazos estimados para el impacto de las nuevas tecnologías (adaptado de Schafer et al. 2006).

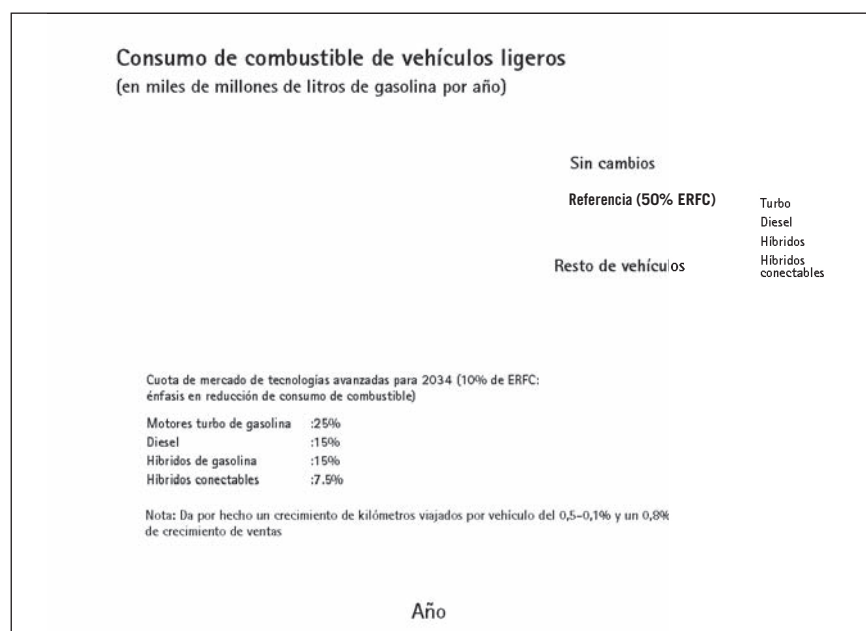


Figura 7. Panorama hipotético que examina el impacto en el consumo de combustible de la flota de vehículos de Estados Unidos de la presencia creciente de vehículos de tecnología avanzada hasta 2035. La mitad de los avances en cuanto a eficiencia (50% ERFC) están encaminados a reducir el consumo de combustible de los vehículos; la otra mitad, a contrarrestar el aumento en tamaño y en rendimiento. La reducción del peso de los vehículos es el 10%. El impacto en el tamaño de la flota y el kilometraje por vehículo no está reflejado (Bandivadekar et al. 2008).

y diseño de nuevos trenes de transmisión y otros subsistemas, incluida una nueva arquitectura del automóvil, es una tarea laboriosa y puede que transcurran 15 años antes de que esté al alcance de todos los segmentos del mercado.

La fabricación de automóviles es un negocio que requiere grandes cantidades de capital y mano de obra, y quienes lo emprenden a menudo asumen importantes riesgos. Por lo general, un fabricante de automóviles tarda de dos o tres años en montar una nueva planta industrial. Por tanto, reconvertir el 10% de la capacidad de producción doméstica de Estados Unidos (1,5 millones de vehículos al año) de vehículos híbridos supondría una inversión de aproximadamente 220.000 millones de dólares, el equivalente al 10% del gasto anual del sector de fabricación de automóviles del país.

Tal como sugieren estas limitaciones en cuanto a fabricación y suministros, los plazos requeridos para que las nuevas tecnologías tengan verdadero impacto en el ahorro de combustible son largos. Schafer et al. (2006) los han dividido en tres etapas, que se muestran en el cuadro 1.

En la primera etapa ha de desarrollarse una tecnología que sea competitiva dentro del mercado. Para ello debe estar accesible dentro de distintas categorías de vehículos y a un coste lo suficientemente bajo para que pueda implantarse a gran escala. El cuadro 1 calcula cuánto tiempo tardarían estos nuevos sistemas de propulsión de vehículos en convertirse en alternativas mayoritarias dentro del mercado. De éstas, sólo la gasolina con turbocargador, el híbrido de batería y gasolina y el diesel con catalizador están ya listas para empezar a producirse.

Aunque para los vehículos híbridos recargables no se ha anunciado todavía ningún plan relativo a su comercialización, varios fabricantes de automóviles han expresado interés en desarrollarlo dentro de la próxima década. La situación para vehículos de célula de combustible es más incierta. Un sondeo realizado entre los grandes fabricantes de automóviles sugiere que se trata de un proyecto que tardará al menos diez años en desarrollarse.

En la segunda etapa de implementación de la tecnología que muestra el cuadro, la de penetración en la producción actual de vehículos, se calcula el plazo que tardará esta tecnología en alcanzar una cuota de mercado que suponga un tercio de las cifras de venta de vehículos globales. En términos generales, estos plazos reflejan expectativas acerca de la viabilidad a gran escala de estos sistemas de propulsión basadas en las limitaciones existentes de ingeniería y de costes.

La tercera etapa de la implementación es el aumento significativo del uso real de dichos vehículos. Una reducción significativa de consumo de combustible sólo se produce cuando un gran número de vehículos de consumo eficiente se encuentran en circulación. Ello sucederá en un plazo de tiempo comparable a la vida media de un vehículo, que gira en torno a los 15 años.

En conjunto vemos que los plazos de tiempo globales antes de que el impacto de las nuevas tecnologías sea significativo son largos.

Impactos en el mundo real

La figura 7 muestra un ejemplo del hipotético impacto de una presencia creciente de vehículos eficientes en Estados Unidos. Este panorama ilustrativo asume que los volúmenes de producción de vehículos con motor de gasolina con turbocargador, de diesel con catalizador, de híbridos y de híbridos recargables aumentarán de forma continuada hasta alcanzar las cuotas de mercado reflejadas en la figura bajo el epígrafe de 2035. También se dan por hecho muchas otras cosas, claro está (Bandivadekar et al. 2008). La línea de «Ausencia de cambios tecnológicos» muestra que el consumo de gasolina crece de forma continuada debido al aumento de tamaño y kilometraje de los vehículos. Con el «énfasis en la reducción del consumo de combustible» (reflejado como ERCC en la figura) en un 50%, la mitad de las mejoras en cuanto a eficiencia son en términos de reducción de consumo real de combustible. La pequeña pero creciente porción dedicada a cada una de las nuevas y más eficientes tecnologías de sistemas de motor y propulsión está clara. En líneas generales este panorama reduce el consumo de combustible de 765.000 millones a 594.000 millones de litros por año, lo que supone un 22%. Las dos aportaciones más importantes que harían posible este panorama son el énfasis en la reducción del consumo de combustible y el porcentaje que ocuparía la tecnología más eficiente de todas — los coches híbridos— en el estimado de ventas para 2035.

Con un énfasis del 100% en la reducción del consumo de combustible en lugar del 50%, el consumo se reduce en un 15% adicional, a 505.000 millones de litros por año. Si el volumen de ventas de vehículos híbridos se duplica —es decir, si un 50% de los nuevos vehículos de 2035 son híbridos—, sería posible una reducción adicional en el consumo de combustible del 10%, es decir, estaríamos en 543.000 millones de litros al año. Combinadas, estas dos cifras darían una reducción adicional del 30%, como resultado de su implementación en el mercado estimada para 2035 en la figura 7. Nótese que el efecto de estos vehículos de tecnología eficiente crece lentamente al principio, pero a partir de 2030 desempeña un papel cada vez más importante a la hora de reducir el consumo de combustible y las emisiones de GEI, conforme las tecnologías avanzan y su penetración en el mercado crece.

Este panorama pone de manifiesto que los efectos inexorables del crecimiento del tráfico pueden ser contrarrestados, y que el consumo de combustible de emisiones de GEI puede congelarse y después reducirse. Pero lograr esto llevará aún un par de décadas. Acciones que afecten directamente a la flota de vehículos actualmente en uso, como reducir la circulación subiendo los precios del combustible, centrarse en la reducción de *consumo de combustible en la carretera* y controlar el aumento en el rendimiento y el tamaño de los vehículos son de suma importancia.

A modo de ilustración de los pasos necesarios para emprender esta senda, hemos analizado lo que costaría reducir a la mitad el consumo actual de combustible o, lo que es lo mismo, duplicar el ahorro de combustible de la nueva flota de vehículos que estará en el mercado en 2035 (Cheah et al. 2008). Sería necesario que dos terceras partes de las vehículos fabricados fueran híbridos, que el 75% de las mejoras en energía eficiente se centraran en la reducción real de consumo de combustible y no en aumentar el rendimiento y el tamaño de los vehículos (en Estados Unidos este tanto por ciento ha sido 0; en Europa ha sido de alrededor del 50%) y también una reducción de 20% en el peso de los vehículos. Aunque plausible, se trata de una tarea compleja, laboriosa y exigente.

Podríamos pensar que los objetivos fijados para 2020 referentes a una reducción de un tercio (por ejemplo, las regulaciones relativas a ahorro de combustible establecidas por el US CAFE, Corporate Average Fuel Economy, Promedio empresarial de ahorro de combustible) son más factibles, pero la realidad es bien distinta. A sólo 10 años del objetivo, las mejoras en consumo de combustible relacionadas con las nuevas tecnologías disponibles son menores, como menor es también el tiempo de que disponemos para aumentar su producción de manera significativa. Por tanto, los objetivos fijados para 2020 resultan ser tan poco factibles como los fijados para 2035.

Si miramos más hacia el futuro todavía, a 2050, vemos que aún nos encontramos lejos de lograr nuestro propósito: las emisiones de GEI serán únicamente entre

un 20-30% menores que hoy. Es aquí donde las tecnologías híbridas o de célula de combustible tendrán que hacer su entrada en el mercado a gran escala con sus distintas fuentes de energía, electricidad e hidrógeno. Si estos «portadores de energía» logran producirse con niveles realmente bajos de emisión de gases de efecto invernadero, entonces serán efectivos. Pero los plazos de tiempo para que cambios tecnológicos y de portadores de energía tan radicales tengan un impacto significativo son muy largos, de décadas, tal como sugiere el cuadro 1. Y el éxito del desarrollo de tecnología de batería y células de combustible, y de infraestructuras de baja producción y emisión de GEI es todavía incierto. En la actualidad se llevan a cabo intensas investigaciones centradas en estas opciones, y así debe ser.

Otras opciones

Hay otras opciones. Durante décadas se han estudiado mejoras en los sistemas de transporte y algunas de ellas han terminado por implementarse. Otras muchas no se han hecho por la dificultad que entraña coordinar empresas, gobiernos locales, regionales y nacionales, así como adaptar las nuevas tecnologías a las infraestructuras existentes.

En el transporte de pasajeros las oportunidades podrían ser significativas, porque el patrón actual de un pasajero por vehículo es ineficaz en términos de ahorro energético y económico. Muchos estudios demuestran el potencial para reducir el consumo de energía y las emisiones que tendría el llamado Sistema de Transporte Inteligente (o ITS por sus siglas en inglés), que pone en contacto electrónico a los usuarios de vehículos y reduce la circulación reorganizando patrones de desplazamiento, reforzando el transporte colectivo, sustituyendo los desplazamientos por tecnologías de información y comunicación y fomentando el uso de medios de transporte sin motor. Las opciones son muchas y atractivas, y ofrecen beneficios adicionales, tales como menor retraso ocasionado por los desplazamientos, menor inversión en infraestructura viaria y menor contaminación. Los beneficios energéticos y climáticos resultarían aún más evidentes a largo plazo.

El Sistema de Transporte Inteligente se basa en tecnologías que detectan los vehículos individuales y sus características, tales como velocidad o ubicación dentro de la red de transportes. Las tecnologías disponibles son varias: aparatos que detectan vehículos empleando una infraestructura especializada en carretera, el Global Positioning System o GPS o la red de teléfonos móviles. Para que esta información resulte de valor a un número mayor de usuarios, debe ser comunicada desde el vehículo a la infraestructura o a otros vehículos, para permitir así recabar datos sobre el estado general de la red. Recopilar esta cantidad ingente de datos y reducirlos a un formato que sirva para dar información a conductores individuales o para gestionar la red de transportes requiere detección, comunicación, computación, análisis y retroalimentación.

El Sistema de Transporte Inteligente trata de buscar soluciones a los problemas que en el futuro afectarán al rendimiento de nuestro actual sistema de transportes de superficie. La congestión, que es reflejo directo de la capacidad insuficiente de nuestras autopistas, constituye un problema clave que afecta a la circulación de personas y mercancías. Los costes —tanto financieros como ambientales— de solucionar estos problemas de capacidad construyendo infraestructuras nuevas o expandiendo las existentes pueden ser elevadísimos, en especial en áreas urbanas donde están vigentes las leyes que limitan el suelo urbanizable. Conceptos inspirados en el ITS pueden ayudar a combatir la congestión circulatoria de dos maneras: a través del uso de información sobre el tráfico, y a través de la aplicación de impuestos viarios. La seguridad en las autopistas es un motivo de preocupación añadido.

Este estudio se centra principalmente en el impacto ambiental y energético de los transportes. Reduciendo el flujo de la circulación, se reducen también el consumo de combustible y la tasa de emisión de GEI por vehículo. Sin embargo, si aumenta el uso de las infraestructuras debido a una mayor capacidad de éstas, el consumo de combustible y las emisiones también crecerán. Es por tanto importante explorar distintas aplicaciones del ITS para mejorar el sistema de transportes de modo que actúe en sinergia con el resto de las cuestiones enumeradas (Sussman 2005).

Lograr una reducción significativa en el uso de vehículos y en la emisión de GEI requiere una combinación de estrategias. Los cambios antes explicados referentes a la eficiencia del vehículo, y los aplicables al sistema de transportes para evitar la congestión circulatoria a menudo dan por sentado que los patrones residenciales y de desplaza-

miento continuarán como en la actualidad. Si los patrones de urbanización cambian y conducen a una mayor densidad demográfica en áreas metropolitanas en detrimento de la población suburbana y rural, entonces se reduciría la circulación por carretera. Si las personas están dispuestas a vivir en corredores urbanos más poblados, podrían beneficiarse más del transporte público. Y entonces los «minicoches» urbanos cobrarían protagonismo. Sin embargo, los patrones de urbanización se han desplazado durante más de seis décadas precisamente en dirección contraria: hacia las áreas suburbanas.

Para que puedan desarrollarse sistemas de transporte más diversificados sería necesario implantar dos tipos de políticas: controlar el negocio urbanístico y subir los impuestos por el uso de carreteras. Son opciones que deberían estudiarse seriamente. Las ventajas de un esfuerzo concentrado por mitigar la congestión circulatoria y su impacto ambiental, por limitar la circulación de vehículos con un solo pasajero y fomentar el uso de automóviles ecológicos y de pequeño tamaño dentro de la ciudad serían muchas y significativas.

¿Qué cabe esperar del futuro?

La figura 8 muestra los objetivos en cuanto a tasa de emisión de gases de efecto invernadero de vehículos ligeros en Europa y Estados Unidos. Se trata de objetivos muy agresivos considerando lo breve de los plazos establecidos, y por tanto requieren un ritmo de progreso más rápido que el factor de reducción 2 fijado para dentro de 25 años. En Europa conseguir estos objetivos a corto plazo será especialmente difícil porque el margen de actuación es menor con la flota de vehículos en uso: la mitad de la misma ya es diesel, y el tamaño y el peso de los vehículos es aproximadamente un tercio del de los estadounidenses. Asimismo, el aumento del rendimiento de los coches en Europa y Japón, que ya se ha producido, ha sido significativamente más bajo que en Estados Unidos. Las oportunidades para futuras mejoras son, por tanto, menores.

La figura 9 ilustra nuestro desafío. Muestra las proyecciones globales y de Estados Unidos para el año 2050 en cuanto a emisión de GEI en vehículos ligeros. Hoy la flota estadounidense es responsable de cerca de la mitad de las emisiones globales de estos gases dentro del sector de movilidad. Europa y Japón aportan una fracción significativa de la mitad restante. Incluso con una implementación agresiva de tecnología más eficiente, la reducción de la tasa de emisiones es muy modesta.

En resumen vemos que el potencial de una reducción en el consumo de combustible de vehículos ligeros —coches, todoterrenos y camiones ligeros— durante los próximos 10 a 25 años está entre en 30 y el 50%. Vendrá de las mejoras en los motores, del desarrollo de trenes de transmisión más eficientes y de la reducción del peso y el tamaño de los vehículos. Que alcancemos o no este objetivo estará en función de cómo controlemos nuestras expectativas res-

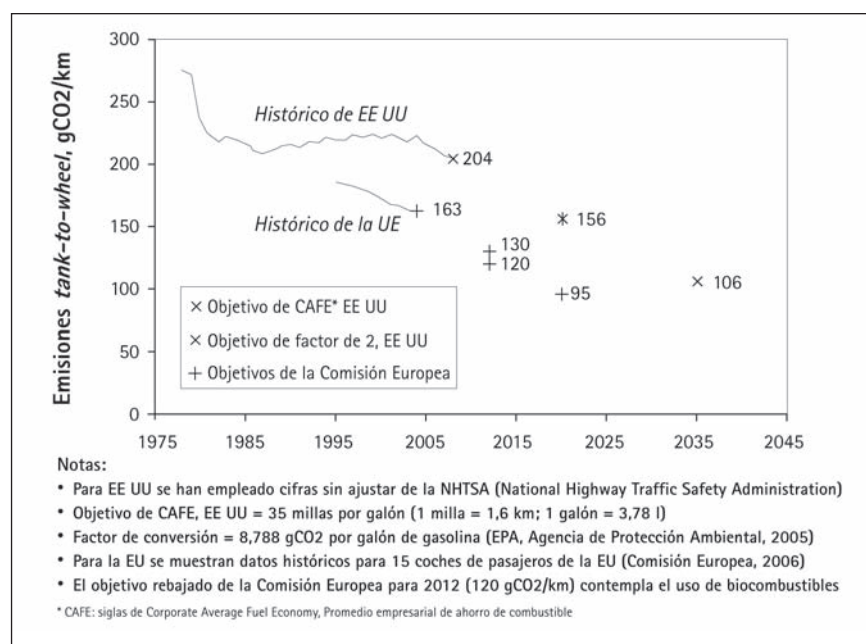


Figura 8. Objetivos y regulaciones referentes a tasa de emisión de gases de efecto invernadero en Estados Unidos y Europa.

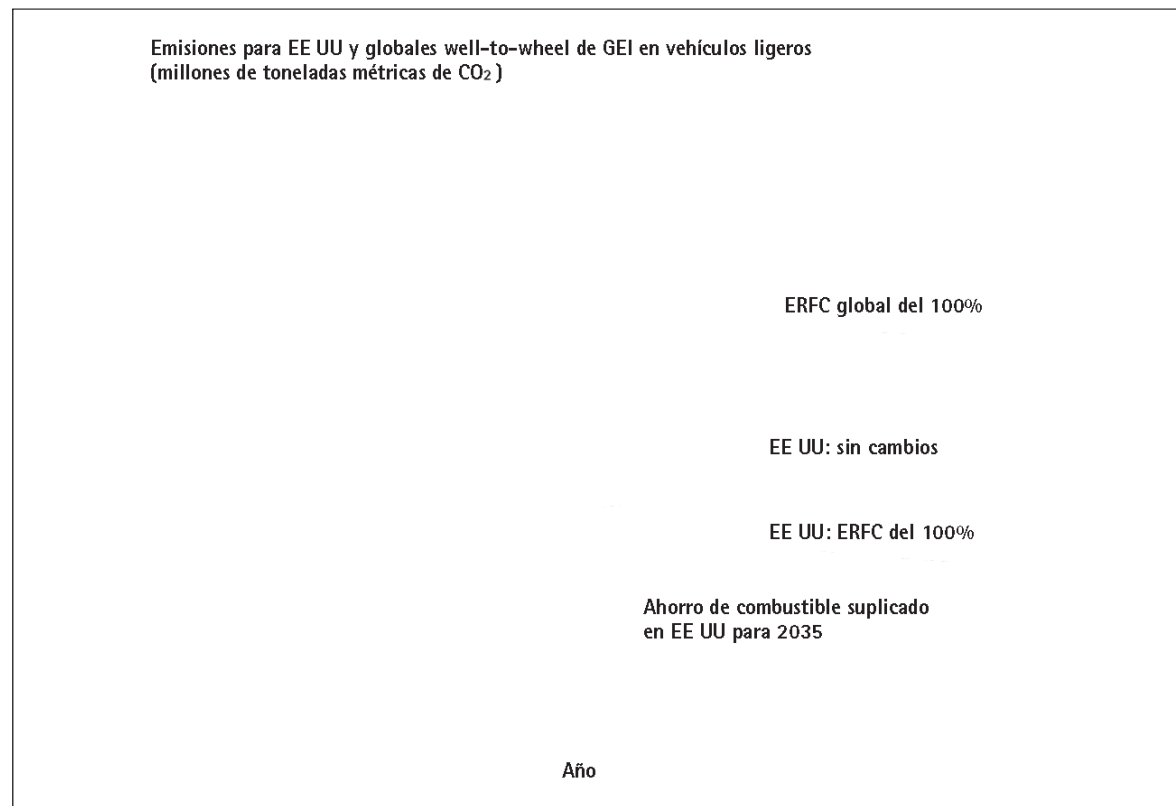


Figura 9. Panorama global y de Estados Unidos para 2050 en el que se muestran los efectos de reducir a la mitad el consumo de combustible en vehículos nuevos para 2035 y las emisiones de GEI *well-to-wheel* en vehículos en uso. El rendimiento y el tamaño medio de los vehículos son constantes (énfasis del 100% en reducir el consumo de combustible) (Bandivadekar et al. 2008).

pecto al rendimiento de nuestros vehículos y sobre todo de cuán urgentemente acometamos las reformas tecnológicas necesarias. Esto último dependerá de que el contexto sea propicio: el precio del petróleo, nuestra percepción acerca de su disponibilidad, el grado de concienciación respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, la exhaustividad y eficiencia de las medidas y regulaciones impuestas y nuestra disposición a moderar nuestro grado de movilidad. A corto plazo, en los 10 o 20 años siguientes, la prioridad deberá ser reducir el consumo de petróleo destinado al transporte. A medio plazo, puesto que deberíamos concentrar cada vez más esfuerzos en reducir la emisión de GEI, el camino resulta menos claro en tanto que la necesidad de seguir reduciendo la producción de petróleo y las emisiones se vuelve más perentoria. Entonces habremos de resolver las cuestiones de cuánta contribución podremos obtener de los biocombustibles, el grado hasta el cual podremos confiar en la electricidad como principal fuente de energía para nuestros vehículos y si el hidrógeno y la célula de combustible deberían ser nuestro objetivo último. A día de hoy no tenemos capacidad de resolver dichas cuestiones, pero necesitamos desarrollar los conocimientos básicos de modo que, con el tiempo, podamos dar respuestas mejores y más precisas.

La demanda mundial de transporte crece de forma inexorable y no existe un avance que por sí solo pueda resolver los crecientes problemas de consumo de com-

bustible y emisión de GEI. Este ensayo ha explicado que el progreso debe provenir de un esfuerzo exhaustivo por desarrollar y comercializar vehículos más eficientes y combustibles más benignos con el medioambiente, y a animarnos a todos a usar nuestros vehículos y otros medios de transporte de modo que ahorremos energía. Todos estos cambios habrán de ser implementados a gran escala para que sus efectos en cuanto a consumo de petróleo destinado al transporte, uso energético y emisiones de GEI sean significativos. Es probable que dicha implementación aumente el precio que los usuarios han de pagar por los transportes, y que requiera medidas gubernamentales que fomenten e incluso obliguen a encaminarse hacia estos objetivos, compartiendo el peso que ello supone de forma equitativa y minimizando los costes sociales.

La transición de nuestra situación actual a una en la que el consumo de petróleo y la emisión de gases sean menores, incluso en el mundo desarrollado, llevará varias décadas, más de las que imaginamos. No debemos olvidar que lo fundamental es llevar a cabo cambios que contribuyan de manera significativa a conseguir los objetivos. Necesitaremos mejores tecnologías, vehículos más apropiados, fuentes de combustible más «verdes» y, también, tomar conciencia de la necesidad de «conservar», de emprender la senda de la sostenibilidad. Y todo ello deberemos hacerlo con urgencia y determinación.

Bibliografía

- Bandivadekar, A., K. Bodek, L. Cheah, C. Evans, T. Groode, J. Heywood, E. Kasseris, M. Kromer y M. Weiss. «On the Road in 2035: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions». MIT Laboratory for Energy and the Environment, Massachusetts Institute of Technology, julio de 2008. <http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/otr2035/>.
- Cheah, L., A. Bandivadekar, K. Bodek, E. Kasseris y J. Heywood. «The Trade-off between Automobile Acceleration Performance, Weight, and Fuel Consumption». *Society of Automotive Engineers*, artículo 1 (2008): 1.524, SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shangai, China, 23-25 de junio de 2008.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policy Makers*, Reino Unido: Cambridge University Press, 2007.
- Kasseris, E. y J. B. Heywood. «Comparative Analysis of Automotive Powertrain Choices for the Next 25 Years». *Society of Automotive Engineers*, SAE paper 1 (2007): 1.607.
- National Research Council. «Toward a Sustainable Future: Addressing the Long-Term Effects of Motor Vehicle Transportation on Climate and Ecology». Transportation Research Board, Washington D.C.: National Academy Press, 1997.
- Schafer, A., J. Heywood y M. Weiss. «Future Fuel Cell and Internal Combustion Engine automobile Technologies: A 25-Year Life Cycle and Fleet Impact Assessment». *Energy*, vol. 31, Nº. 12 (2006): 2.064-2.087.
- Sussman, J. *Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. Nueva York: Springer, 2005.
- World Business Council for Sustainable Development. «Mobility 2001: World Mobility at the End of the Twentieth Century and its Sustainability». Informe preparado para el Sustainable Mobility Working Group (Grupo de trabajo sobre movilidad sostenible, WBCSD), elaborado por Massachusetts Institute of Technology y Charles River Associates. Disponible en Internet en: <http://www.wbcdsmobility.org>, agosto de 2001.
- , «Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability». World Business Council on Sustainable Development. Informe sobre el proyecto de movilidad sostenible, 180 páginas. Disponible en Internet en: <http://www.wbcd.org/DocRoot/fl311MAvneJpUcnLgSeN/mobility-full/pdf>, 2004.