
DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA AL VEHÍCULO ELÉCTRICO

CUATRO ALTERNATIVAS TÉCNICAS (*)

**RICARDO ALÁEZ
MAITE BARNETO
CARLOS GIL
JUAN CARLOS LONGÁS
JAVIER LUCEA
MIREN ULLÍBARRI**

Universidad Pública de Navarra

**JAVIER BILBAO
VICENTE CAMINO
GURUTZE INTXAURBURU**

Universidad del País Vasco

El motor de combustión interna como sistema de propulsión básico está perdiendo popularidad. Ya no parecen albergarse dudas acerca de la relación entre las emisiones de CO₂ y el calentamiento global, ni mucho menos acerca de las nefastas consecuencias de este proceso. La mayor preferencia de los ciudadanos por un medio ambiente menos contaminado

por emisiones de gases y ruidos resulta difícilmente calificable como una moda, presentándose a modo de tendencia imparable. Es más, ya se encuentran circulando unos vehículos «híbridos» que han permitido constatar que existen otras opciones diferentes al motor de combustión interna. Esta vez parece que va en serio y el motor de combustión interna muy probablemente será sustituido por otro sistema de propulsión.

En el presente artículo se ofrece un análisis de la actividad de los principales ensambladores del sector de automoción al inicio de este proceso de sustitución del vehículo de combustión interna. En la fase actual, ni tan siquiera resulta evidente qué opciones podrían ser las dominantes y, mucho menos aún, cuál será el ritmo de sustitución del vehículo de combustión interna por la opción ganadora. En este sentido, la primera parte del presente tra-

bajo ofrece, agrupadas en cuatro apartados, las opciones que podrían terminar por imponerse: los vehículos híbridos, el vehículo eléctrico movido por baterías, el vehículo eléctrico movido por una pila de hidrógeno y el vehículo de combustión interna alimentado por hidrógeno. El criterio para seleccionarlas no ha sido otro que el de resumir en qué opciones están trabajando los ensambladores. La primera descripción de sus características está más próxima a la literatura de ingeniería que a la organización de la producción, puesto que una comprensión mínima de las cuestiones técnicas básicas constituye condición necesaria para abordar el análisis posterior.

La segunda parte del artículo, basándose en esa descripción inicial, aborda la cuestión de cuál será el ritmo de adopción de estas nuevas soluciones técnicas, así como de las previsiones en términos de

organización productiva en esta primera fase. Las informaciones suministradas por los ensambladores en sus publicaciones corporativas (informes anuales, documentos publicados en sus páginas web, notas de prensa, etc) han constituido la fuente básica de información del artículo, en lo que se refiere a las actividades de los ensambladores. Toda esta información, recopilada para los ensambladores que poseen al menos una planta en España, ha sido analizada para procurar responder a dos cuestiones básicas: qué cabe esperar en términos de colaboración entre agentes (ensambladores, proveedores, universidades, centros tecnológicos, etc) y cuáles son las consecuencias en términos de localización de la producción.

Evidentemente, las incertidumbres en la actualidad son al menos tan relevantes como el interés analítico del momento. No obstante, como se resume en las siguientes páginas, sobre el ritmo de sustitución y la relevancia de las diferentes soluciones técnicas parece haber un cierto consenso (lo cual no impediría la aparición de sorpresas debidas a la introducción de mejoras técnicas sustanciales), pero la forma en que los ensambladores abordarán las exigencias de este cambio de paradigma sigue, si bien se han detectado tendencias comunes, sin mostrar un perfil evidente.

LAS OPCIONES QUE PODRÍAN SUSTITUIR AL VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN INTERNA †

En los siguientes párrafos se ofrece una descripción comparativa del vehículo de combustión interna estándar con las diferentes opciones que podrían sustituirlo y que se resumen en cuatro grupos: vehículos híbridos; vehículos eléctricos basados en paquetes de baterías; vehículos eléctricos basados en pila de combustible de hidrógeno y, vehículos de combustión cuyo combustible es hidrógeno

Esta selección de opciones se ha planteado en función de las soluciones a las que los ensambladores están dedicando esfuerzos en términos de I+D. Además, esta clasificación encuentra su coherencia interna en las similitudes técnicas de los vehículos que engloba cada una de las cuatro categorías. Cabe señalar que todas las soluciones excepto la primera serían ZE (zero emissions), al menos en el apartado de aplicación.

Los vehículos híbridos †

Hablar de vehículos híbridos implica considerar vehículos propulsados por dos fuentes de energía diferentes, una de ellas convencional (gasolina o diesel)

y otra de carácter «limpio». En estos momentos, la opción presente en el mercado es la compuesta por un motor de gasolina combinado con un motor eléctrico además de un sistema de baterías.

A su vez, podría considerarse que existen (si bien hasta la fecha sólo se han comercializado vehículos híbridos no enchufables) tres tipos de vehículos híbridos: híbrido no enchufable; híbrido enchufable (*plug-in hybrid*), y *Range Extender*

El enchufable (PHEV *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) obtiene electricidad (recarga las baterías) enchufándolo directamente de la red, además del posible exceso del motor eléctrico y del frenado regenerativo. El no enchufable (HEV *Hybrid Electric Vehicle*), como su propio nombre indica, no se enchufa a la red para recargar las baterías, puesto que éstas únicamente obtienen energía del frenado regenerativo y del exceso de producción del motor.

La principal implicación de la diferencia entre ambos modelos es la autonomía en «modo eléctrico» de cada uno. Mientras que el enchufable se supone que dispondrá (en el momento de redactar este artículo, primer trimestre de 2010, no existe ningún modelo de estas características que sea producido para su comercialización) de una considerable autonomía en modo eléctrico (30km, 40km, etc. en función del tamaño del paquete de baterías), el modelo no enchufable (el modelo más vendido hasta la fecha es el *Toyota Prius*) tiene limitada su autonomía eléctrica a unos pocos kilómetros (menos de 5), con lo que la utilización del modo eléctrico se reduce al encendido-parada y primeros metros de recorrido, que sirve para reducir considerablemente el consumo y las emisiones de CO₂. El *Range Extender* (RE), cuyo primer modelo comercializado podría ser el *Volt*, de GM (ha anunciado su puesta en el mercado para finales de 2010), utiliza un motor eléctrico como único sistema de propulsión, pero también dispone de un motor de combustión que produce electricidad y, en consecuencia, amplía la autonomía del vehículo. Esta opción tiene sentido mientras no se haya desarrollado suficientemente una infraestructura de carga de baterías.

En otras palabras, el no enchufable sirve para reducir consumo y emisiones, mientras que el enchufable proporciona unos kilómetros como vehículo cero emisiones mientras dura la autonomía eléctrica y no se recargue (enchufe) el vehículo. Por tanto, con un enchufable se podría circular en ciudad sin emitir ni un solo gramo de CO₂, mientras que con el no enchufable no se dispondría de esa posibilidad.

Desde el punto de vista constructivo, el modo enchufable no presenta grandes diferencias con el no enchufable, en lo que a componentes se refiere,

CUADRO 1
LAS BATERÍAS DE ION-LITIO Y LA INTRODUCCIÓN DE HEV, PHEV Y EV

Características	HEV	PHEV y RE	EV
Seguridad	Aceptable LFP	Aceptable LFP	Aceptable LFP
Duración (ciclos carga/descarga y años de vida)	Prestaciones superiores a las necesidades	Prestaciones superiores a las necesidades	Necesidad de mejora
Comportamiento (diferentes ambientes y temperaturas)	En desarrollo	En desarrollo	En desarrollo
Energía específica	Suficiente	Con los actuales 100Wh/Kg, son necesarios unos 220 Kg de sobrepeso	100Wh/Kg suponen 250-300Kg para 130 Km de autonomía
Potencia específica	Adecuado	Adecuado	Necesidad de incrementar la energía específica para un nivel dado de potencia
Tiempo de carga	No enchufable	Adecuado	En desarrollo
Sobrecoste por vehículo	2100\$-4000\$	15 kWh, 16000\$	20000\$ (batería de ion-litio 20kWh, 1000\$/kWh, autonomía 130 km)

FUENTE: Boston Consulting Group (2010).

únicamente la presencia de un cargador de baterías con su correspondiente toma para enchufarlo a la red. Este componente también supondrá una pequeña variación en la unidad electrónica de control, ya que tendrá que dar la posibilidad de decidir si funcionar en modo eléctrico o no. Con la configuración de vehículo híbrido, el esquema y los componentes del vehículo actual apenas se ven modificados, únicamente se altera la distribución y, en cualquier caso, el tamaño. La principal implicación que lleva este modelo es la carga electrónica extra que supone el control simultáneo de cuatro nuevos elementos como son las baterías, el motor eléctrico, el generador y el inversor, así como la complicación del sistema de entrega de potencia (tren de engranajes).

Vehículos eléctricos basados en paquetes de baterías

A la luz de los trabajos de la inmensa mayoría de los fabricantes y de los casi diarios avances en lo que a tecnología se refiere, este modelo parece ser el más indicado para consagrarse como alternativa al modelo de vehículo actual. Los componentes principales de un coche eléctrico de batería son: baterías, motor eléctrico, sistema de conexión mecánica entre el motor eléctrico y la transmisión, controlador del motor eléctrico, potenciómetro, interruptor principal, interruptor de seguridad, fusible principal, dispositivo de conexión del cableado, interruptor de carga y transformador o convertidor de voltaje de corriente continua a corriente continua (DC/DC).

Las baterías, componente básico del vehículo eléctrico (EV, *Electric Vehicle*), constituyen en la actualidad

el principal límite a la implantación masiva de este tipo de solución técnica. Entre las características deseables de las baterías cabría citar: seguridad, duración (ciclos de carga/descarga y duración de la batería), comportamiento (en diferentes ambientes), alta potencia específica, alta energía específica, tiempo de carga y, evidentemente, coste. Existe unanimidad en el terreno de la ingeniería del automóvil en que las baterías de ion-litio representan la opción tecnológica que se convertirá en la solución que aplicará el vehículo eléctrico del futuro (Kromer, M.A. y Heywood, J.B., 2007). En el estado actual de la técnica puede afirmarse que para unos determinados peso y dimensión, las baterías de ion-litio proporcionan de 1,4 a 2,0 veces el poder y la energía que la mejor de las alternativas, a la par que ofrecen un significativo potencial para la reducción de costes en el futuro (Albrecht et al., 2009; Kromer, M.A. y Heywood, J.B., 2007; Boston Consulting Group, 2010; Deutsche Bank Securities, 2010).

En la actualidad (cuadro 1), al margen de que ciertas prestaciones son susceptibles de notable mejora (comportamiento, energía específica y tiempo de carga, por ejemplo), el inconveniente principal que frena la introducción masiva del EV es el coste muy elevado de las baterías de ion-litio (International Energy Agency, 2009). Todavía se está trabajando con cinco opciones de baterías de ion-litio, si bien la conocida como LFP (litio-hierro-fosfato) parece estar recibiendo mayor atención por parte de la industria (medida por el número de patentes registradas -Boston Consulting Group, 2010-). La optimización de los procesos de producción, las economías de escala asociadas a esos procesos y la transición hacia materiales más baratos debe mejorar consi-

derablemente el coste de las baterías. La explotación de estas potencialidades se estaría materializando gracias a la consolidación de la demanda de estas baterías para montarse en vehículos híbridos, puesto que así lo demuestran los planes de producción de los fabricantes. Esta última circunstancia está contribuyendo a focalizar la investigación en el terreno de las baterías de ion-litio, favoreciendo su evolución técnica y, por tanto, su dominio sobre el resto de las alternativas potenciales.

Entre 1991 y 2005, el precio de las baterías de ion-litio por unidad de energía almacenada descendió dividiéndose por un factor de 10. Una caída de precios que se produjo al margen del sector de automoción y para aplicaciones en otros sectores (Nagelhaut, D y Ros, J.P., 2009). A pesar de ello, el actual nivel de costes limita la capacidad del vehículo eléctrico para competir con el modelo de combustión interna. Si se toman como referencia los datos del cuadro 1, el coste de las baterías, vendido al ensamblador en forma de paquete de baterías, estaría en unos 770 euros/kWh. Un vehículo eléctrico con una autonomía de poco más de 100 kms requiere llevar incorporada una batería de más de 20 kWh de capacidad, por lo que el sobreprecio actual a pagar por este concepto sobre el modelo convencional estaría claramente por encima de los 15.000 euros.

En el medio plazo, el coste de las baterías, si se confirman los logros tecnológicos previstos, podría bajar un 60% (Boston Consulting Group, 2010), pero ello supondría aún un sobrecoste de más de 6000 euros. Por su parte, los vehículos híbridos soportarían un sobreprecio de 1800 a 12000 euros sobre los modelos equivalentes de combustión interna. En este momento, no parece muy arriesgado afirmar, por tanto, que la introducción en masa del vehículo eléctrico como solución de transporte depende del grado de progreso que se logre en el desarrollo de las baterías.

Tampoco deberían olvidarse otros elementos, vinculados al desarrollo tecnológico de las baterías y que afectan de forma negativa a las prestaciones del vehículo eléctrico, con respecto a los modelos convencionales, como la autonomía (limitada a 140 km), el tiempo de carga y el sobrepeso (con la energía específica actual, las baterías, para acumular energía que mueva al vehículo eléctrico unos 100 kilómetros reclama baterías con un peso de 250-300 kilogramos). Mientras un vehículo de combustión interna puede recargarse de combustible en pocos minutos, la recarga de una batería va a suponer varias horas (en las estaciones con alto poder de recarga podría hacerse en menos de 30 minutos).

Los vehículos eléctricos basados en la pila de combustible de hidrógeno †

La electricidad que se necesita para impulsar el motor eléctrico se obtiene a través de una reacción química que tiene lugar en la conocida como pila de combustible y para ello es necesario introducir hidrógeno y oxígeno en cantidades adecuadas en dicha pila. En este tipo de vehículo se suprime en su totalidad la dependencia del motor de explosión y, por tanto, se hace necesaria su sustitución por un modelo eléctrico.

Además del citado motor eléctrico, esta configuración requiere la adición de otros componentes vitales como son las baterías, la celda de combustible (pila de combustible), la unidad de control y un depósito de hidrógeno. El gran problema del almacenamiento del hidrógeno es el volumen, ya que el hidrógeno en sí mismo es un elemento muy ligero, pero ocupa un excesivo volumen en estado gaseoso. Se debe tener en cuenta que la toma de recarga para el hidrógeno deberá ser rediseñada, ya que nada tendrá que ver con la actual debido a las condiciones de estanqueidad necesarias cuando se manejan gases.

Otro elemento a incluir en el vehículo será la celda de combustible o pila de combustible. Esta pila está formada por una membrana, un ánodo y un cátodo. Con la introducción de hidrógeno y oxígeno se crea una reacción química que desprende electrones, es decir, electricidad. Normalmente estas pilas de combustible operan dentro de unos límites de temperatura que deben ser mantenidos. Otro elemento que se incorporará al vehículo será un conjunto de baterías. Estas baterías sirven como reserva de energía, ya que la pila de combustible trabaja de forma continua y en condiciones predeterminadas. Por ello, la labor a desempeñar por las baterías será la de acumular energía cuando la energía generada por la pila sea superior a la necesaria, además de suministrar energía al motor eléctrico en ocasiones puntuales, como pueden ser picos de potencia demandada o en condiciones de arranque.

El vehículo con motor de combustión de hidrógeno †

De todas las posibles configuraciones que podrían sustituir al vehículo con motor de combustión interna esta es la que más se asemeja a la actual, ya que no se harían necesarios muchos elementos nuevos. Cabe esperar que se produzcan pequeños cambios en diversos componentes, no en diseño, mientras que las principales transformaciones se producirán en materiales. BMW, por ejemplo, se plantea en sus prototipos de esta versión utilizar el motor con-

vencional (4 tiempos) con ciertas modificaciones en componentes de inyección de gasolina, cámara de combustión, colectores, etc. No obstante, hay que tener en cuenta las propiedades combustibles del hidrógeno, ya que la temperatura que se alcanza en la combustión es mayor que la que se produce con gasolina o diesel. Por tanto, se deberán analizar todos los componentes del motor que, por su posición o función, sean susceptibles de verse afectados, como pueden ser pistones, cilindros, bielas, inyectores, colectores, etc.

El principal cambio y problema insalvable ha venido siendo el almacenamiento del hidrógeno. Este combustible puede ser almacenado en dos estados, líquido o gaseoso, siendo ésta última opción aquella por la que se decantan la mayoría de las marcas, ya que es la más sencilla de obtener, además de poderse almacenar a temperatura ambiente. La opción líquida requiere una temperatura de -250°C, con el coste económico que ello supone, además de la dificultad añadida que se genera cuando, una vez licuado el hidrógeno, se desea almacenarlo durante cierto tiempo. Por tanto, el depósito de combustible conocido hasta ahora deberá ser sustituido por uno que se ajuste a las características de almacenamiento del hidrógeno, en temperatura adecuada, presión y, especialmente, seguridad.

RITMO DE SUSTITUCIÓN DEL VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN INTERNA

De acuerdo con el desarrollo de las cuatro soluciones técnicas presentadas, cabe afirmar que el mercado, en un futuro inmediato, seguirá dominado por el motor de combustión interna, evolucionando en una dirección más respetuosa con el medio ambiente, compartiendo presencia con los modelos híbridos, que irán ganando cuota de mercado. En el terreno de los vehículos exclusivamente eléctricos habría que decir que, si bien todos los fabricantes reconocen que "el futuro será eléctrico", también señalan que se trata de una opción cuyo protagonismo en el mercado, medido por una cuota significativa de las nuevas matriculaciones, será relevante sólo a largo plazo (Struben y Sterman, 2008).

El consumidor no va renunciar a las prestaciones que actualmente le ofrece el vehículo de combustión interna y exigirá que la opción que lo sustituya no altere demasiado e incluso supere lo que se demanda del producto automóvil. Frente a las opciones que se han propuesto, el vehículo de combustión interna ofrece claras ventajas en términos de seguridad (al menos percepción de seguridad), confort, prestaciones mecánicas, capacidad

de transporte (autonomía, capacidad de carga, espacio interno), fiabilidad, coste de reparaciones y, especialmente, coste.

Atendiendo a la consideración de las prestaciones, parece lógico suponer que, en el corto plazo, los vehículos híbridos constituyen la opción más viable, puesto que, a las prestaciones del vehículo de combustión interna, suman otras (consumo, emisiones de CO₂, menor nivel de ruidos) que se obtienen a un sobrecoste asumible por el consumidor final. Sin embargo, el vehículo 100% eléctrico, para el que la solución que utiliza baterías de ion-litio se perfila como la más eficiente, se presenta como opción sólo a medio plazo, muy dependiente de la capacidad de reducción del coste de las baterías que, en la actualidad y como se ha expuesto, resta a esta opción cualquier posibilidad de alcanzar una cuota de mercado significativa. Por último, en materia de pronósticos a largo plazo, la cuestión es más vidriosa y los ensambladores no parecen atreverse a descartar la opción del hidrógeno (sobre las posibilidades que ofrece el hidrógeno como combustible del motor eléctrico ver Fundación Cidaut, 2009). Chanaron y Teske (2007) resumen la opinión de la literatura económica cuando afirman que la pila de hidrógeno no será comercializable en volumen significativo al menos hasta 2025.

Obsérvese que en el estado actual de desarrollo de la tecnología del vehículo eléctrico, marcado por una fuerte incertidumbre técnica y de mercado, las previsiones que los ensambladores han hecho públicas resultan muy dispersas. Así, mientras Volkswagen estima que la cuota global de mercado de los coches eléctricos (EV) en el año 2020 será sólo de entre el 1% y el 1,5%, Renault anticipa que en el año 2020 el 10% del mercado mundial de coches «será eléctrico». Volkswagen añade que el motor de combustión todavía dominará el mercado en las dos próximas generaciones de automóviles (15-20 años).

Por otra parte, los ensambladores siguen dedicando notables esfuerzos a mejorar los modelos convencionales, de forma que PSA señala, con claridad, que sigue apostando por Motores Diesel HDi y Motores de gasolina de nueva generación e incluso por el biocombustible de forma paralela a sus trabajos en el terreno del vehículo eléctrico. En la misma línea, la estrategia de Toyota se dirige a buscar la mejora de los motores convencionales, reduciendo tamaño y peso e incrementando la eficiencia de motor y transmisión, y apostar por los híbridos.

La enorme incertidumbre asociada al desarrollo tecnológico de los EV, fundamentalmente lo que hace referencia al coste de las baterías de ion-litio, genera unas previsiones de los principales organismos que

señalan distintos comportamientos esperados en función de distintos escenarios (Hacker et al, 2009; Boston Consulting Group, 2009; Kalhammer, et al, 2007; Kromer y Heywood, 2007; Chanaron y Teske, 2007).

En estos trabajos se reconocen explícitamente aquellos factores que acelerarían la introducción de los modelos híbridos y del EV: un desarrollo más rápido de las baterías, mayores incentivos públicos, un mayor precio del petróleo y un desarrollo de los métodos de venta de este tipo de vehículos (separando, por ejemplo, la adquisición del vehículo de la compra de la batería). El análisis de las decisiones de los ensambladores con plantas en España con respecto a las cuatro opciones planteadas, permite describir una secuencia temporal que se ajusta a lo anticipado.

Vehículos híbridos †

Todos los ensambladores tienen en el mercado o han previsto lanzar en el corto plazo modelos de vehículos híbridos (cuadro 2). El periodo 2010-2012 va a constituir el referente temporal en el que se consolidarán de forma definitiva las versiones híbridas en el mercado de automoción. Con mayor o menor énfasis, ningún ensamblador se va a quedar al margen del desarrollo de este tipo de modelos, una trayectoria inevitable para todos ellos en el corto plazo. Daimler puso a la venta durante 2009 un híbrido no enchufable equipado con baterías de ion-litio, el Mercedes S 400 HYBRID Berlina. También se ha puesto a la venta en EEUU el ML450 Hybrid SUV y tiene previsto presentar en 2010 un modelo experimental de híbrido enchufable, el Mercedes S500 Plug-in Hybrid Concept, con baterías de ion-litio recargables. Volkswagen, consciente de que la tecnología híbrida debe jugar un papel central en su estrategia, ha comenzado la producción del VW Touareg Hybrid en 2010 y también se pondrá en el mercado el Porsche Cayenne Hybrid. De forma similar, se prevé producir en 2011 el Audi Q5 Hybrid. Otros prototipos presentados, en la categoría de Full HEV, han sido el Up! Lite y el VW New Compact Coupe.

En lo que se refiere a la tecnología TwinDRIVE, (vehículo eléctrico enchufable con baterías de ion-litio) se han presentado dos prototipos: el Golf TwinDRIVE, y el Seat León TwinDRIVE, que VW planea producir en 2014. Como es lógico, también los fabricantes franceses tienen previstos lanzamientos de modelos híbridos: Peugeot lanzará en 2011 su Premium 3008 y Citroen el DS5, mientras que para 2012 estaría prevista la producción del Peugeot 3008 en versión Diesel híbrida.

La apuesta de Ford por los vehículos híbridos ha sido siempre muy clara. Ya desde 2004 comercializa este

CUADRO 2 CORTO PLAZO. VEHÍCULOS CON SISTEMA DE PROPULSIÓN HÍBRIDO

Ensamblador	Modelos
BMW	<ul style="list-style-type: none"> BMW serie 7 Active Hybrid (2009) BMW X6
Daimler	<ul style="list-style-type: none"> Mercedes S 400 HYBRID Berlina (2009) ML450 Hybrid SUV (2009) Mercedes S500 (2010)
Volkswagen	<ul style="list-style-type: none"> VW Touareg Hybrid (2010) Porsche Cayenne Hybrid (2010) Audi Q5 Hybrid (2011) Golf Twin Drive (2009). Producción para 2014. Seat Leon Twin Drive (2009). Producción para 2014
PSA	<ul style="list-style-type: none"> Peugeot Premium 3008 (2011) Citroen DS5 (2011) Peugeot Premium 3008 – Diesel (2012)
Ford	<ul style="list-style-type: none"> Últimos lanzamientos: Ford Fusion Hybrid (2009) Mercury Milan (2009)
General Motors	<ul style="list-style-type: none"> Comercializa 8 modelos. Novedad 2010: Chevrolet Volt (en Europa, Opel Ampera)
Renault-Nissan	<ul style="list-style-type: none"> Nissan-Modelo G de Infiniti (2008) Nissan-Altima (2009)
Toyota	<ul style="list-style-type: none"> Prius PHV (tercera generación) (2009, en pruebas) FT-CH (lanzamiento previsto en 2012)

FUENTE: Páginas web corporativas de los ensambladores.

tipo de vehículos: Ford Escape Hybrid (2004), Mercury Mariner (2005) Mazda Tribute (2007), Ford Fusion Hybrid y Mercury Milan (2009). Está trabajando sobre una "nueva" generación de híbridos para el 2012, con baterías de litio de los que ha fabricado dos series de 10 prototipos que circulan con un motor eléctrico y otro de combustión, utilizando una configuración «paralela», es decir, que pueden ser impulsados sólo por el motor eléctrico, sólo por el de gasolina, o ambos trabajando a la vez.

Abundando en esta trayectoria tecnológica tiene previsto desarrollar «microhíbridos», fundamentalmente para el mercado europeo, basados en motores Diesel. Estos coches combinarían un sistema de parada/arranque (*stop/start system*) con un sistema de frenado regenerativo. Estos coches, de los que ha fabricado algunos prototipos, no utilizarían el motor eléctrico para impulsar el coche. Simplemente apagarían el motor convencional en las paradas y utilizarían la energía cinética para recargar la batería convencional, en vez del motor de combustión.

General Motors presenta una amplia trayectoria en materia de vehículos híbridos. Actualmente comer-

CUADRO 3
MEDIO Y LARGO PLAZO. VEHÍCULO ELÉCTRICO Y PROPULSIÓN DE HIDRÓGENO

Ensamblador	Baterías de ion-litio	Pila de hidrógeno	Motor de combustión de hidrógeno
BMW	<ul style="list-style-type: none"> • MINI E (2009) • BMW Concept Active E (2009) 		BMW Hydrogen 7 (2007)
Daimler	<ul style="list-style-type: none"> • Smart fortwo electric drives (prevista producción en masa en 2012) 	B-Clas F-CELL (2010)	
Volkswagen	<ul style="list-style-type: none"> • Audi e-tron (2009) • E-Up! (2009). Producción prevista en plataforma New Small Family de VW para 2013 	Amplio trabajo. Sus últimos prototipos: <ul style="list-style-type: none"> – Space Up! Blue (2007) – Tiguan Hy Motion (2008) 	
Renault-Nissan	<ul style="list-style-type: none"> • Nissan LEAF (2010). Comercialización masiva en 2012 • Tizzy Z.E. (2011) • Kangoo Z.E. (2011) • Concept, ZOE ZE (2012) • Fluence Z.E. (2012) 		
PSA	<ul style="list-style-type: none"> • Peugeot Ion (2010) • Citroen C-Zero (2010) 	Trabaja en el sistema	
Ford	<ul style="list-style-type: none"> • Ford Transit Connect (2010) • Ford Focus (2011) 	Trabaja en el sistema	
General Motors		Trabaja en el sistema	
Toyota		Previsto para 2015	

FUENTE: Páginas web corporativas de las empresas.

cializan ocho modelos híbridos: tres modelos SUV de gran tamaño (muy similares pero comercializados bajo distintas marcas), dos pick-up iguales vendidos como Chevrolet y GMC, dos sedanes iguales vendidos como Chevrolet y Saturn, y un SUV compacto. Se trata de modelos que utilizan baterías de NiMH. En línea con esta experiencia plantea lanzar, en noviembre de 2010, su gran novedad y que será, también, una novedad significativa en el terreno de la tecnología híbrida, el Chevrolet Voltage o *volt*, un *Range Extender*. Se trata de un vehículo con baterías de ion-litio que se recargarían habitualmente enchufando el vehículo a la red eléctrica. La autonomía, circulando con las baterías, es de unas 40 millas (algo más de 60 km). Según GM, esta autonomía sería suficiente para circular en modo eléctrico puro en el 75% de los desplazamientos diarios al trabajo en Estados Unidos. En el caso de superar esta distancia, un motor de explosión que puede funcionar con gasolina recargaría las baterías.

El motor de explosión no se utiliza en ningún caso para propulsar el automóvil, a diferencia, por ejemplo, del híbrido enchufable previsto por Ford, o los actuales híbridos. Por esta razón, GM evita dar la denominación de «híbrido» al *volt*. De hecho, en la web de la versión europea (Opel Ampera cuya comercialización está prevista para 2011), recalcan que no es un híbrido, sino un *Range Extender*. El tiempo de carga con una toma de 120v es de unas 8 horas y se reduce a 3 con una toma de 240v.

VEHÍCULO ELÉCTRICO CON BATERÍAS DE ION-LITIO

Los ensambladores estarían dando pasos muy prudentes en este terreno, buscando una presencia que garantice un futuro en el mercado, pero sin comprometerse en exceso en estas producciones que todavía presentan muchas incógnitas de rentabilidad en el corto plazo. Así, BMW no establece compromisos muy precisos en cuanto al lanzamiento de estos vehículos y se remite a la «primera mitad de la próxima década» para la comercialización de un modelo que utilizará baterías de ion-litio (de hecho ya ensambló, en 2009, 600 unidades del MINI E que le deben servir como prueba para lanzamientos futuros). En una línea muy similar, Daimler ha lanzado 1.000 unidades experimentales del *smart fortwo electric drive* que circularán en ocho países (Alemania, Italia, España, Reino Unido, Francia, Suiza, EEUU y Canadá). Este es un paso previo, según la empresa, para la producción en masa de la versión eléctrica del *smart*, cuyo comienzo está previsto en 2012. Esta generación del *smart* eléctrico funcionará con baterías de ion-litio (frente a las baterías de gel de plomo que equipaba la primera generación).

El Grupo Volkswagen ha experimentado con prototipos de motor eléctrico alimentado por baterías desde los años 80: Golf I Electric, Golf I CitySTROMer, Jetta CitySTROMer, Golf III CitySTROMer, Golf Electric y Bora Electric. En el pasado 2009 se presentó otro prototipo eléctrico, el Audi e-tron sin que, de todas

maneras, haya publicado planes explícitos para la producción en serie de este modelo. Una de las más recientes presentaciones, también en 2009, corresponde al prototipo E-Up!, un ultracompacto urbano que funciona con baterías de ion-litio. Su producción, sobre la plataforma modular de la *New Small Family* de VW, está prevista para 2013.

La alianza Renault-Nissan parece optar con mayor decisión por impulsar la producción en serie del vehículo eléctrico en su versión con baterías de litio. Así, comenzará la producción del Nissan LEAF en EE UU a finales de 2012 en la planta de Nissan en Smyrna, Tennessee. Renault tiene previsto, en un futuro inmediato, comenzar la producción de sus modelos totalmente eléctricos basados en paquetes de baterías de ion-litio: Twizy Z.E. Kangoo Z.E.; Concept, ZOE Z.E. y Fluence Z.E. La producción de los dos primeros modelos estaría prevista para 2011 y la de los dos segundos en 2012. Serge Yoccoz, director del proyecto estratégico Vehículo Eléctrico de Renault, defiende que el vehículo totalmente eléctrico resulta una solución superior a los híbridos porque no necesita dos motores. El híbrido es una tecnología de arquitectura complicada cuyo coste es elevado. También el grupo PSA estará presente en el mercado de modelos eléctricos con baterías de ion-litio, puesto que tiene previsto lanzar, en el último trimestre de 2010, los modelos Peugeot Ion y Citroën C-Zéro para Peugeot y Citroën.

Ford, en lo que hace referencia a los vehículos totalmente eléctricos, tiene previsto, a lo largo de 2010, la puesta en circulación de una flota de 15 Ford Focus eléctricos en el Reino Unido cuya comercialización está anunciada para el año 2011 en USA. Esperan vender entre 5.000 y 10.000 unidades el primer año. Los prototipos tienen una autonomía de unos 115 km/h, y una velocidad máxima de unos 130km/h. Para la segunda mitad de 2010 ya está previsto el lanzamiento de una furgoneta Ford Transit Connect, equipada con baterías de ion-litio, destinada a flotas.

Vehículo eléctrico basado en pila de combustible de hidrógeno ↴

Se trata de una opción que ha sido bastante explorada, si bien va perdiendo fuerza como alternativa real de mercado. Quizás haya sido Volkswagen quien ha jugado un papel más activo en el estudio de las posibilidades de la pila de combustible de hidrógeno. Entre los avances que ha logrado en esta materia podemos señalar que ha desarrollado con éxito un tipo único de pila de alta temperatura (HTFC) que elimina muchos de los inconvenientes de las actuales a baja temperatura (LTFC), que son las usadas en todo

el mundo en vehículos con este sistema. Ha prestado una atención especial al desarrollo de membranas y electrodos, consiguiendo con la HTFC que el sistema completo sea más eficiente, más compacto, más resistente y más barato, factores clave para una posible producción en serie.

El Consorcio VW, no obstante, considera que se deben encontrar respuesta a todavía muchos problemas para poder producir en serie este tipo de vehículos por lo que entiende que se necesitarán más de 20 años para hallar respuesta a los problemas y convierten esta solución en una opción para el largo plazo. VW presentó en 1996 el primer vehículo con esta tecnología, el Golf Variant, al que le siguieron el Bora Variant en 1997 y el Bora HyPower en 2001. A partir de 2004 experimenta con prototipos de la serie HyMotion, caracterizada por utilizar motor de pila de hidrógeno combinado con baterías, de níquel en el Touran HyMotion y de ion-litio en el Tiguan HyMotion (2008). Hay que señalar que, a pesar de los problemas de viabilidad, Volkswagen sigue acumulando potencial en esta trayectoria.

También Daimler está trabajando en esta solución. En 2010 tiene prevista la producción de 200 unidades del B-Class F-CELL, un vehículo de tracción eléctrica que funciona con hidrógeno, todo ello a pesar de que Daimler reconoce que los principales inconvenientes de estos vehículos F-CELL son su elevado precio y el desarrollo de una red de suministro de hidrógeno, por lo que su viabilidad en el corto plazo está comprometida.

El énfasis de otros constructores en esta opción ha sido menor: el grupo PSA, por ejemplo, ha trabajado el sistema de la pila de combustible pero entiende que las perspectivas de industrialización y comercialización masiva podrían plantearse a partir de 2020-2025. Ford trabaja, desde un punto de vista estratégico, en el terreno del motor con pila de hidrógeno y de combustión de hidrógeno. Lo hace con la convicción de que se trata de un desarrollo de «muy largo plazo». Ciertamente tiene una pequeña flota de vehículos de combustión de hidrógeno y con pila de hidrógeno a prueba, pero se señala que existen todavía grandes problemas que resolver para hacer viable estas tecnologías.

Será necesario investigar sobre nuevos materiales, el almacenamiento (la capacidad y la seguridad de los depósitos) y la distribución del hidrógeno, los costes y duración de la pila de hidrógeno. Ford acepta, en definitiva, que se está muy lejos de una tecnología lo suficientemente económica y fiable como para que constituya una alternativa. También General Motors se encuentra trabajando, con un planteamiento de largo plazo, en el motor de pila de

combustible. Entiende que puede representar el futuro del automóvil pero que, en cualquier caso, lo sería a muy largo plazo. En el marco del *Project driveway* un grupo de voluntarios habría probado una flota de Chevrolet Equinox con pila de hidrógeno.

El vehículo con motor de combustión alimentado de hidrógeno †

Constituye la opción a la que se concede una menor atención tecnológica. La generalidad de los constructores entiende que se trata de una solución que no va a tener ningún protagonismo en el corto o medio plazo. Quizás sea BMW el fabricante mejor ubicado en esta trayectoria, ya que desde 2007 mantiene en circulación 100 unidades del BMW Hydrogen 7 (diseñado con un sistema dual de combustible que permite el uso de hidrógeno o gasolinas para mover el motor de combustión). No obstante, la propia empresa BMW plantea esta opción del motor de combustión de hidrógeno a «largo plazo».

La localización prevista de la producción †

En materia de localización habría que decir, con carácter general, que los ensambladores proponen unas ubicaciones previstas para sus producciones de vehículos eléctricos fuertemente asociadas a sus países de origen. Con las reservas a las que obliga el estado actual de la producción, todavía de series cortas experimentales, puede observarse que tanto las producciones efectivas como las previsiones de producción tienden a localizarse en las plantas situadas en sus países de referencia. Algo que cabía esperar no sólo por razones que tienen que ver con el interés económico del país de origen, sino con el hecho de que la mayor incertidumbre asociada al desarrollo de estos modelos lleva aparejado un mayor grado de integración productiva en los primeros momentos, lo que supone ciertas restricciones de proximidad con respecto de los centros de experimentación de la compañía que, de manera generalizada, se encuentran en sus países de origen.

En lo que se refiere al ensamblaje en serie, cabe anticipar que los modelos híbridos serán producidos en las plantas donde se ensamblen sus versiones convencionales. El híbrido no hace sino añadir conjuntos y componentes a una plataforma común en la que se montan el resto de versiones del modelo. En definitiva, la decisión de ensamblar la versión híbrida en otra planta diferente carecería de sentido económico, dada la complejidad logística y los costes añadidos de ensamblar dicho híbrido en una ubicación diferente a la de sus versiones de motor de combustión interna.

Sin embargo, en el caso de los vehículos eléctricos movidos por paquetes de baterías, las previsiones de localización son más complejas. La mayor parte de los conjuntos y componentes son específicos de este tipo de vehículos y, por tanto, poseen, a priori, cierta libertad en su ubicación. En una primera etapa se producirán series demasiado cortas como para justificar una planta específica (podría hablarse de 8.000-10.000 unidades/año, cuando el tamaño eficiente de una planta parece situarse en los 200.000-300.000 vehículos/año), por lo que compartirán planta con un modelo convencional. Esa línea, dentro de la planta, dedicada a ensamblar el vehículo eléctrico, poseerá un cierto carácter experimental en el sentido de contribuir al aprendizaje de un proceso que, en parte, será diferente del tradicional. El hecho de que se esté trabajando con un proceso completamente nuevo, que exigirá notables ajustes en sus comienzos, favorecería la proximidad cultural y geográfica del ensamblaje a los centros de desarrollo del ensamblador que, como ya se ha señalado, están muy concentrados en el país de origen de la empresa.

VW ensamblará en Bratislava el VW Touareg Hybrid desde 2010, junto a sus versiones convencionales. En el caso de Renault se confirma cierto protagonismo de las plantas francesas en la producción de los modelos eléctricos. Si bien los modelos Twizy Z.E y Fluence Z.E. (versión sedán del Mégane III) tienen prevista su producción en Valladolid (España) y Bursa (Turquía), está previsto que la planta de Flins (Francia) sea la llamada a jugar el papel central en la producción de vehículos eléctricos, puesto que además de concentrar dos tercios de la producción de estos vehículos protagonizará la fabricación de las baterías (ion-litio). Nissan, el otro protagonista de la Alianza Renault-Nissan, tiene unas previsiones de fabricación centradas en EE.UU., con el inicio del ensamblaje del modelo VE LEAF en 2012 en Smyrna, Tennessee. En Europa no tendría prevista la fabricación de vehículos eléctricos, si bien localizaría su producción de baterías de ion-litio en su planta de Sunderland (Reino Unido).

En el caso de BMW habría que decir que las 600 unidades experimentales de MINI E fueron ensambladas en la planta de Oxford (donde se ensambla el modelo convencional del MINI), si bien los motores eléctricos, los módulos de las baterías, de la electrónica funcional y de la transmisión se realizaron en su planta de Munich. Daimler, por su parte, ensambla el Mercedes S 400 HYBRID Berlina, híbrido no enchufable equipado con baterías de ion-litio, en Sindelfingen (Alemania), donde se ubica el ensamblaje del resto de versiones de la clase S. Para el caso del Smart fortwo electric drives, la producción de una serie inicial de unas 1000 unidades estaría prevista en la planta del smart en Hambach (Francia). Sería

un paso previo, según la empresa, para la producción en masa de la versión eléctrica del smart cuyo comienzo está previsto en 2012.

Tampoco GM ofrece ninguna duda sobre el sesgo geográfico de la localización de la fabricación de sus modelos eléctricos: todas sus producciones previstas tanto de motores eléctricos como de baterías estarán ubicadas en Estados Unidos. Ha invertido 246 millones de dólares en Baltimore (Baltimore Transmission) para comenzar a producir motores y otros componentes eléctricos en 2013. La fabricación de baterías de ion-litio se llevará a cabo en la planta Subsystems Manufacturing LLC. que GM posee en Brownstown (Michigan). Para el ensamblaje de los vehículos híbridos ha realizado las adaptaciones pertinentes en ocho plantas de Michigan, aquellas en las que se fabrican los mismos modelos de combustión interna, y dedicará la planta Detroit-Hamtramck a la fabricación del *Volt*. El motor-generador eléctrico de 1.4l del Volt se fabricará también en Michigan. En el caso de Ford, la fabricación de los modelos híbridos se reparte entre Kansas City, Missouri (Ford Escape) y su planta de Hermosillo en Sonora (México) donde fabrica el Ford Fusion. En cuanto al modelo de furgoneta Ford Transit Connect, totalmente eléctrico, está previsto realizar el cuerpo en Turquía, pero una parte del proceso lo realizaría Azure Dynamics en alguna de sus cuatro plantas en USA, probablemente en Holland, Michigan.

Alianzas para el desarrollo del vehículo eléctrico

En materia de alianzas, los ensambladores van a desarrollar unas estrategias que responden a las exigencias de la dinámica tecnológica impuesta por la evolución de las nuevas trayectorias vinculadas al desarrollo del producto-proceso vehículo eléctrico. El recurso a las alianzas es un mecanismo que permite enriquecer el potencial tecnológico en la aplicación y mejora que marca el campo de producto, en este caso, del vehículo eléctrico. El nuevo diseño de vehículo eléctrico incorpora y sustituye mecanismos en el diseño lo que, desde un punto de vista cognoscitivo, supone una alteración de la base de conocimiento que sirve de soporte a los diseños. Este hecho, a su vez, modifica la composición del potencial tecnológico significativo para participar en esta nueva dinámica tecnológica.

Las trayectorias tecnológicas que han modificado de forma más significativa la base de conocimientos y, por tanto, aquellas en las que cabe esperar que se formalicen alianzas son las siguientes:

a) Las vinculadas al desarrollo y aplicación de los mecanismos impulsores que utilizan las distintas opciones (fundamentalmente baterías de ion-litio).

b) Las que tienen que ver con el problema de la fabricación del vehículo eléctrico.

c) Las asociadas a las infraestructuras y la logística que se deberá atender para la implantación del vehículo eléctrico.

Alianzas para el desarrollo tecnológico de los mecanismos de impulso (énfasis en baterías de ion-litio). Las baterías constituyen nuevos sistemas que se apoyan en nuevos conocimientos y que los ensambladores van a tener que incorporar a su potencial. Estos conocimientos, por otra parte, no están suficientemente maduros y ofrecen un margen de mejora relevante. En este sentido, podría afirmarse que todavía no se ha explorado suficientemente las posibilidades de aplicación práctica que ofrecen los principios científicos sobre los que se apoyan (debe tenerse en cuenta que si ya se aceptara que, por ejemplo, las baterías de ion-litio no ofrecen margen de mejora, se habrían desechado como opción para el vehículo eléctrico, puesto que en la situación actual están muy lejos de competir con las prestaciones que ofrece el vehículo que utiliza el motor de combustión interna –Boston Consulting Group, 2009 y 2010-). En la medida en que el desarrollo y mejora de las baterías de ion-litio se encuentra en sus primeros estadios de evolución para su aplicación en la producción en masa, los ensambladores van a recurrir a las instituciones que disponen del conocimiento básico relevante.

Resulta preciso impulsar una mejora significativa (puede haber margen) y ello deberá hacerse a partir de la intensificación en la explotación de los principios científicos que sirven de soporte para los fenómenos en que se fundamentan las baterías de ion-litio. De ahí que se estén produciendo alianzas para la investigación con instituciones que trabajan la ciencia básica/centros de investigación básica (universidades y centros tecnológicos) o bien con empresas del área de la Química, con amplia tradición de investigación en el campo de las baterías y similares.

Así, BMW ha desarrollado las baterías conjuntamente con SB LiMotive (una *Joint Venture* de Bosch y Samsung SDI) y son específicas para su uso en vehículos. Daimler ha llegado a un acuerdo de colaboración con la empresa química Evonik (grupo químico alemán) a través de la *Joint Venture* Deutsche Accumotive GmbH, para el desarrollo y producción de las baterías de ion-litio. Esta nueva empresa ha hecho públicos los planes para construir una planta en Kamenz (Alemania) que comenzaría la producción en masa de baterías de ion-litio en 2011.

Por otra parte, Volkswagen, en colaboración con la empresa química Degussa and Chemetall y la Uni-

versidad de Münster (Alemania), ha creado una cátedra de Ciencia Aplicada de los Materiales para la Conversión y Almacenaje de Energía, con el objetivo de desarrollar materiales innovadores que incrementen la eficiencia y reduzcan los costes de las baterías de iones de litio. También trabaja, para el desarrollo de baterías de ion-litio, con la empresa china BYD y las japonesas Toshiba y Sanyo Electric.

En lo que se refiere a su actividad en España, el grupo VW, a través de su filial SEAT, lidera el proyecto «Cenit VERDE», con el objetivo de desarrollar las tecnologías y los componentes clave para los automóviles eléctricos e híbridos, desde baterías y motores eléctricos hasta sistemas de recarga. El proyecto lo apoya el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación y en él participan 16 empresas (entre ellas Endesa, Iberdrola, REE, Cegasa, Siemens, Ficosa y Circutor, además de SEAT) y 16 Universidades y Centros Tecnológicos, coordinados por el Centro Tecnológico del grupo VW en Manresa (Barcelona).

PSA desarrolla sus modelos de baterías a través de Mitsubishi Motors utilizando como referencia la sociedad «Lithium Energy Japan» que asocia a Mitsubishi con GS Yuasa y que, en una primera etapa, suministrará baterías de ion de litio de gran capacidad y alta eficacia para el vehículo i MiEV.

General Motors ha trabajado con Compact Power, filial de LG Chemical y de Continental Automotive Systems, vinculada a A123Systems para el desarrollo de las baterías de ion-litio. Ford ya declara en su «Sustainability Report 2008/2009» que para el desarrollo del coche eléctrico planea aliarse con suministradores claves de los componentes eléctricos que puedan proporcionarle la experiencia y la tecnología de la que ellos carecen. De hecho, Ford ya cuenta con alianzas en éste ámbito. Así, las baterías para sus prototipos las produce Johnson Controls-Saft, con quien está desarrollando una nueva batería basada en el litio para su futuro modelo comercializable. Por otra parte, en el terreno de la investigación más básica, está desarrollando proyectos de investigación con la Universidad de Michigan y con el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) para el desarrollo de baterías de litio, así como con el Electric Power Research Institute.

Alianzas que tienen que ver con el problema de la fabricación del vehículo eléctrico. Cabe esperar que las alianzas que se vayan a plantear en este ámbito se definan en el marco de los propios ensambladores. Son conocimientos que hacen referencia al ensamblaje y que difícilmente, salvo en el estudio de cuestiones puntuales, son manejados por agentes al margen de los propios ensambladores. Así, Volkswagen ha fir-

mado en 2009 alianzas estratégicas con otros ensambladores (la empresa china BYD y la japonesa Suzuki) para su futura producción en serie de vehículos híbridos.

Un planteamiento similar es el de General Motors que colabora con la china SAIC y la japonesa Suzuki para producir vehículos híbridos (Chanaron y Teske, 2007). PSA colabora con Mitsubishi Motors Corporation (MMC), Ford, a su vez, para el desarrollo de los modelos eléctricos, colabora con empresas con experiencia en el montaje de este tipo de vehículos como Magna International y Azure Dynamics (montaje de la Ford Transit eléctrica).

Alianzas asociadas a las infraestructuras y la logística que se deberá atender para la implantación del vehículo eléctrico. El desarrollo del vehículo eléctrico está fuertemente relacionado con la disponibilidad de infraestructuras que garanticen una recarga frecuente de baterías. Se trata de una problemática nueva y específica asociada a la implantación del vehículo eléctrico y cabe esperar que los ensambladores la resuelvan estableciendo alianzas con aquellos agentes que ofrecen los conocimientos significativos en esta materia.

En este sentido, cabe señalar las alianzas entre los ensambladores y las compañías eléctricas para trabajar tanto en el desarrollo del producto (la logística de recarga es un condicionante del desarrollo de producto puesto que plantea sus propias restricciones) como en el diseño de las infraestructuras soporte. Una tarea que, en la práctica, se está llevando a cabo en coordinación con los Gobiernos, sean locales, regionales o nacionales.

Un repaso de los comportamientos de los fabricantes en esta materia, elaborado a partir de la lectura de sus páginas web, descubre la existencia de múltiples iniciativas en este terreno. Así, Volkswagen trabaja con la eléctrica alemana Eon. También lo hace en el marco del proyecto «Cenit verde» con las eléctricas españolas Endesa e Iberdrola para el estudio de sistemas de recarga. La alianza Nissan-Renault colabora con grandes empresas eléctricas: EDF francesa, las suizas ALPIG y EW2, la irlandesa ESB o las estadounidenses San Diego Gas & Electric (California) y Progress Energy of Raleigh (Carolina del Norte). Nissan-Renault colaborará en Estados Unidos con eTec (Electric Transp. Engineering Corp.) con objeto de organizar y materializar las estaciones de recarga; con ECOTality Inc. para los problemas relacionados con el transporte de energía eléctrica y las tecnologías de almacenamiento; con la francesa EDF y la española Iberdrola para solventar problemas de recarga y logística de suministro. Ford está desarrollando, en este ámbito, una extensa actividad de colaboración con distintas com-

pañías eléctricas: Amercian Electric Power, ConEdison, DTE Energy, National Grid. New York Poer Authority, Progress Energy and Southern Company-Alabama Power.

Van a existir, también, múltiples acuerdos a tres bandas entre fabricantes-compañías eléctricas-gobiernos. El papel del gobierno es relevante a la hora de organizar y regular la logística de distribución y la materialización de las infraestructuras. Una mención especial merece, por lo avanzado en esta materia, así como de referencia en cuanto modelo organizativo para el desarrollo de infraestructura, el proyecto *Better Place* en el que cooperan la Alianza Renault-Nissan y los Gobiernos de Dinamarca, Israel y Portugal con las compañías eléctricas nacionales implicadas. Se pretende conseguir el desarrollo de una infraestructura de recarga que cubra todo el país. Según las previsiones estarían disponibles en 2010/2011 y servirían para proporcionar un impulso definitivo para la generalización del uso del vehículo eléctrico (<http://www.betterplace.com>) (Beaume y Midler, 2009). Planes similares se estarían preparando en otros contextos como California y Hawai en Estados Unidos o el estado de Ontario en Canadá.

CONCLUSIONES

En las páginas anteriores se han analizado cuatro opciones de sustitución del vehículo de combustión interna (vehículos híbridos, vehículos eléctricos basados en paquetes de baterías, vehículos eléctricos basados en pila de combustible de hidrógeno y motor de combustión de hidrógeno), tanto en lo que se refiere a los aspectos técnicos básicos de cada opción, como a las cuestiones relativas al ritmo en que cada solución técnica podría sustituir al vehículo de combustión interna.

La opción de motor híbrido, que supone una trayectoria tecnológica con un grado de ruptura menor al que registran el resto de las opciones, se consolida como la alternativa al motor de combustión interna en el corto plazo. Se trata de una tecnología contrastada por su éxito en el mercado (ver el modelo Prius de Toyota), pero que además está desarrollando una dinámica de mejoras que incrementa su poder competitivo, por ejemplo, el modelo *volt* de GM. Ciertamente plantea, en términos competitivos, un problema de precios, pero también es cierto que se trata de una diferencia que puede compensarse con el ahorro de combustible, lo que sumado a una acción de promoción pública, respaldando las opciones más limpias en términos ambientales, podría consolidar su penetración en el mercado.

En cuanto a los modelos totalmente eléctricos, habría que decir que su competencia con el modelo con-

vencional de combustión interna plantea, en estos momentos, considerables problemas de viabilidad comercial, de ahí que todos los fabricantes sean enormemente prudentes y las estimaciones al evaluar el futuro inmediato de estos modelos sean muy dispersas. Las previsiones más solventes en estos momentos los calificarían de opciones comerciales de largo plazo. En este tipo de modelos puede observarse una presencia generalizada de todos los ensambladores, si bien todavía se trata de un mercado emergente en su apartado económico y que, en materia de modelos, se corresponde con prototipos y vehículos experimentales.

La alianza Renault-Nissan es la que ha mostrado una mayor implicación en el lanzamiento comercial a corto plazo de este tipo de vehículos, pero cabría afirmar una estrategia de rasgos similares en el conjunto de ensambladores, puesto que todos ellos han decidido apostar por el desarrollo de estos modelos. Ciertos problemas de prestaciones y, especialmente, el elevado coste de las baterías constituye el principal elemento que está retrasando la generalización del vehículo totalmente eléctrico. En cualquier caso, habría que añadir, por una parte, que la opción de baterías de ion-litio constituye la apuesta generalizada en el sector y, por otra, que a lo largo de esta década y, a pesar de las dificultades, podrá comprobarse cómo la generalidad de los ensambladores, que ya han lanzado prototipos, entrarán en el mercado de vehículos eléctricos sobre la base de este tipo de baterías.

Por último, las opciones de pila de combustible de hidrógeno y del motor de explosión movido por hidrógeno se plantean como alternativas de muy largo plazo. Pero, a pesar de que el estado actual de la técnica impide su viabilidad en el medio plazo, existe cierta unanimidad entre los ensambladores al reconocer que el hidrógeno «puede ser» el futuro. Un hecho que apoya indudablemente la potencialidad de estas opciones es que ningún ensamblador la haya descartado y que todos ellos trabajan acumulando potencial tecnológico en estas trayectorias (Aggeri, Elmquist y Pohl, 2009).

Por lo que se refiere a la localización de sus actividades, los ensambladores, con carácter general, van a localizar el ensamblaje de los modelos de vehículo eléctrico en las plantas situadas en sus países de origen. Un fenómeno que podría justificarse por un doble motivo: en primer lugar, para atender al interés económico del país de origen, donde están comprometidos la mayor parte de sus recursos y donde las exigencias económicas van a ser más intensas para el ensamblador (recuérdese la participación pública significativa en el capital social de algunos grandes ensambladores europeos) y, en segundo lugar, porque las mayores incertidumbres tanto de creación, de pro-

ducción y de mercado, asociadas al desarrollo de estos modelos, exige un mayor grado de integración productiva en los primeros momentos, marcando restricciones de proximidad con respecto a los centros de investigación de la compañía (que de manera generalizada se encuentran en sus países de origen). La localización del ensamblaje de estos modelos siguiendo ese patrón geográfico, por otra parte, resulta de fácil satisfacción, dada la disponibilidad de plantas de ensamblaje en el país de origen de los ensambladores.

No obstante, la racionalidad que justifica la localización de la producción en los modelos eléctricos, especialmente en lo relativo a las exigencias de proximidad, no opera con tanta intensidad cuando se trata de los modelos híbridos. El grado de incertidumbre, tanto de creación como de producción y mercado, de los modelos híbridos es menor que en el caso de los modelos eléctricos, lo que relaja las exigencias de proximidad con respecto a sus centros de creación técnica. En la medida en que ésta última exigencia se relaja, el protagonismo de las condiciones de coste se impone al decidir emplazamientos productivos. En este sentido, las posibilidades de desplazar la producción de los modelos híbridos a plantas situadas en el exterior aumenta, especialmente por los ahorros de costes de transporte, logísticos, etc. que derivan de la decisión de ensamblar los modelos híbridos en las mismas plantas que están ensamblando el modelo convencional.

El análisis de las alianzas que pudieran materializar los ensambladores para desarrollar el vehículo eléctrico se ha estructurado de acuerdo con un triple perfil, atendiendo a las nuevas exigencias cognitivas que se derivan del desarrollo de estos modelos. La primera trayectoria de evolución técnica, fundamental en la medida en que es el condicionante de la competitividad del diseño y aquella en la que los frutos de investigación deben ofrecer los mejores resultados, tendría que ver con las necesarias para el desarrollo tecnológico de los mecanismos de impulso (énfasis en baterías de ion-litio).

Esta trayectoria se construye sobre un campo de conocimiento que se fundamenta en la explotación cognitiva de saberes básicos, puesto que los principios científicos que sirven de soporte al diseño son susceptibles de proporcionar mejoras relevantes. De ahí la necesidad de cooperar con aquellas instancias depositarias de esos saberes, esto es, con instituciones que trabajan la ciencia básica (centros de investigación básica y universidades) o bien con empresas químicas con cierta tradición de investigación en el campo de las baterías y similares.

En segundo lugar, la problemática relacionada con el ensamblaje del automóvil eléctrico presenta una

mayor proximidad con el potencial tecnológico que los ensambladores manejan habitualmente, puesto que recoge unos saberes fuertemente específicos del sector de automoción y, en consecuencia, cabe señalar que las alianzas en este terreno se establecerán con otros ensambladores o bien con fabricantes específicos de vehículos eléctricos.

Por último, para el tratamiento de la problemática relacionada con las infraestructuras y la logística, un aspecto muy relevante en el desarrollo del vehículo eléctrico, el análisis empírico no deja dudas sobre la generalización de acciones de cooperación con las grandes compañías eléctricas, en la medida en que éstas empresas puedan ser capaces de aportar el conocimiento relevante y de resolver los problemas que se puedan plantear en el ámbito del suministro y la infraestructura eléctricas.

Sobre los efectos sobre el grado de integración de las tareas productivas, cabe adelantar que el aumento en las incertidumbres de creación técnica y de producción, empujará a los fabricantes en una dirección de mayor integración de las tareas productivas lo que, lógicamente, tendrá efectos negativos en las actividades de los proveedores. El ensamblador debe combatir el aumento de las incertidumbres que plantea la introducción de los modelos eléctricos, hasta conseguir estabilizar suficientemente los sistemas y los procesos, haciéndose cargo del ensamblaje de sistemas en la cadena de montaje, de forma que su demanda dirigida a proveedores no será tanto de sistemas completos como de subsistemas. Si la integración va afectar de manera obvia a las baterías, la incertidumbre asociada a los cambios previstos en su diseño alcanzará, también y en mayor o menor grado, al resto de los sistemas. Hay que tener en cuenta que la externalización de los sistemas reclama estabilidad entre los interfaces que los relaciona. Una situación de inestabilidad en el conocimiento tecnológico que sirve de soporte al diseño origina cambios en los interfaces que obligan al fabricante a integrar las tareas de producción. Este fenómeno de integración productiva, inevitable en el corto plazo, que afectará a los proveedores de sistemas en forma de recorte de su actividad productiva, será susceptible de reversión en una etapa más avanzada de producción del vehículo eléctrico, con el aumento de la estabilidad en la base cognoscitiva y material de los diseños.

(*) Este trabajo forma parte de un proyecto más amplio que se ha beneficiado de la financiación recibida en virtud del Convenio de Colaboración entre el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio del Gobierno de España y la Universidad Pública de Navarra para la realización de actividades de análisis y evaluación de factores de interacción en un modelo cluster entre agentes industriales y tecnológicos implicados en el sector de automoción de la Comunidad Foral de Navarra.

BIBLIOGRAFÍA

AGGERI, F., ELMQUIST, M. y POHL, H. (2009): «Managing learning in the automotive industry-the innovation race for electric vehicles». *International Journal of Automotive Technology and Management* 9 (2) 123-147.

ALBRECHT, A.R., HOLYOAK, N.M., RAICU, R., PUDNEY, P.J., TAYLOR, M.A.P., ZITO, R. y GROVES, J. (2009): «Technologies for sustainable vehicles». University of South Australia and South Australian Department of Trade and Economic Development

BEAUME, R y MIDLER, CH. (2009): «From technology competition to reinventing individual ecomobility: new design strategies for electric». *International Journal of Automotive Technology and Management* 9 (2) 174-190

BOSTON CONSULTING GROUP (2009): «The comeback of the electric car? How real, How Soon, and What Must Happen Next».

BOSTON CONSULTING GROUP (2010): «Batteries for Electric Cars. Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020».

CHANARON, J y TESKE, J. (2007): «Hybrid vehicles: a temporary step». *International Journal of Automotive Technology and Management* 7 (4) 268-288.

DEUTSCHE BANK SECURITIES INC. (2010): «Vehicle Electrification. More rapid growth; steeper price declines for batteries».

FUNDACION CIDAUT (2009): «Aplicaciones del hidrógeno al transporte». Ponencia presentada en el Salón vehículo y combustibles alternativos. Valladolid, 5-7 de Noviembre

HACKER, F; HARTHAN, R; MATTHES, F y ZIMMER, W (2009): «Environmental impacts and impact on electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe. Critical review of literature». European Topic Centre on air and climate change. European Environment Agency. Technical paper 2009/4.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2009): «Technology Roadmap. Electric and plug-in hybrid electric vehicles».

KALHAMMER, F.R., KOPF, B.M., SWAN, D.H., ROAN, V.P. Y WALSH, M.P. (2007): «Status and prospects for zero emissions vehicle technology». Report of the Air Resources Board independent expert panel 2007. California Air Resources Board. Sacramento.

KROMER, M.A. Y HEYWOOD, J.B. (2007): «Electric Powertrains-Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet». Massachusetts Institute of Technology. Laboratory for energy and the environment. Cambridge.

NAGELHAUT, D. y ROS, J.P. (2009): «Electric driving -Evaluating transitions based on system options». Netherland Environmental Assessment Agency.

STRUBEN, J y STERMAN, J.D. (2008): «Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems». *Environment and Planning B: Planning and Design* 35 1070-1097.