



La electrificación del vehículo como medida de eficiencia energética en el transporte por carretera



José María López Martínez

Doctor Ingeniero Industrial, Subdirector del INSIA (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil), Director de la Unidad de Impacto Medioambiental del INSIA y Profesor Titular de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Palabras clave: Transporte, vehículos eléctricos, vehículos híbridos, electromovilidad.

Resumen:

Los retos tecnológicos del transporte eléctrico y concretamente de los sistemas de propulsión eléctricos son muy complejos. Los vehículos híbridos y eléctricos se presentan en sus diferentes configuraciones y se expone el funcionamiento de los mismos, sus rendimientos globales, ventajas e inconvenientes y el estado actual de la tecnología y la situación nacional.

Key words: Transportation, electric vehicle, hybrid vehicle, electromobility.

Abstract:

The technological challenges of electric transportation and specifically electric powertrain are very complex. Hybrid and electric vehicles are presented in different configurations and explains the operation, the overall performances, efficiency advantages and disadvantages and the current state of technology and the national situation.

Introducción

La tendencia global del incremento de la movilidad va en contradicción con los criterios de control del efecto invernadero, la contaminación local y la explotación de los recursos de combustible. La sostenibilidad del sector transporte dependerá fuertemente de la introducción de tecnologías que reduzcan las emisiones contaminantes y el consumo de petróleo.

Después de más de cien años de investigación, las perspectivas de un mayor grado de optimización de los motores de combustión interna alternativos (MCIA) son limitadas a pesar de los enormes y continuos esfuerzos de la industria automovilística. La pila de combustible ofrece un nuevo punto de partida, con un elevado rendimiento energético y bajas emisiones (emisiones cero en el punto de uso), la posibilidad de utilizar varias fuentes de energía y el potencial de alcanzar niveles de coste de mercado.

En la actualidad ya existen automóviles que funcionan con mezclas de biocombustibles y otros, que se están desarrollando, que incorporan novedosos conceptos y complejos sistemas de propulsión como los vehículos híbridos, los vehículos puramente eléctricos y los de pila de combustible. Todavía existe campo de investigación necesario para explorar la mejor combinación tipo de combustible y concepto de vehículo para una aplicación y ciclo de conducción dados.

Es necesario realizar una valoración global de los factores que afectan a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), a los contaminantes locales y a la seguridad de suministro energético, realizando estudios del pozo al tanque y de ciclo de vida de la producción de materias primas y su reutilización. En la mayoría de los casos los vehículos puramente eléctricos alimentados con electricidad proveniente de fuentes renovables y freno regenerativo son, obviamente, la mejor opción.

El núcleo de la electrificación del transporte por carretera es el vehículo eléctrico (VE) basado en la tracción eléctrica y los módulos y componentes que forman parte de ésta.

Conceptos diferentes de turismos, camiones y autobuses son el principal objeto de las actuales actividades de investigación, como los sistemas plugin-hybrid, que son vehículos eléctricos con un pequeño motor térmico especial para una mayor autonomía. Los vehículos puramente eléctricos, debido a su condición de emisiones cero, en su punto de uso, y menor potencial de emisiones de GEI (si se utilizan fuentes renovables) se consideran la opción más limpia y marcarán los hitos del transporte sostenible. Los micro, mild y full hybrid son un punto de entrada favorable en este proceso.

Vehículos híbridos

Los vehículos híbridos (VEH) constan de una combinación entre un motor térmico (MCI) y un motor eléctrico (ME). Su principal ventaja es una mejor eficiencia energética de la planta de potencia, con la correspondiente reducción en el consumo de combustible y de emisiones contaminantes, garantizando, al mismo tiempo, una autonomía y comportamiento adecuados. Los VEH se pueden clasificar bien atendiendo al tipo de configuración o bien al grado de electrificación.

En función al tipo de configuración los VEH se pueden clasificar en:

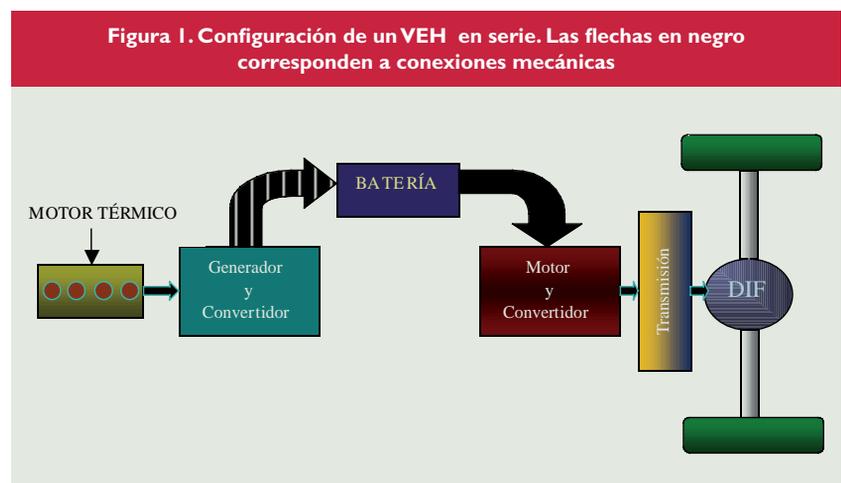
- **Configuración en serie:** Aquella en la que solamente un convertidor de energía puede proporcionar potencia propulsiva; no existe conexión mecánica entre el motor de combustión y las ruedas. En esta configuración, el MCI es el aportador principal que acciona un generador eléctrico que

suministra energía a la batería que enlaza con el motor de propulsión. Una disposición de una configuración en serie se muestra en la Figura 1.

La configuración en serie es la más simple, donde solamente el motor eléctrico proporciona potencia propulsiva. El rango de operación del MCI se puede limitar de manera que evite variaciones bruscas de la carga con la consiguiente disminución de las emisiones contaminantes. Seleccionando el rango operativo apropiado para el MCI, coincidente con su rango de mayor rendimiento, se puede conseguir un ahorro energético muy importante. La potencia requerida para mover el VEH la proporciona solamente el motor eléctrico. Aparte del MCI y del generador, el sistema de propulsión es similar al de un VE, siendo los requerimientos del motor eléctrico los mismos que para un VE.

Otra ventaja de esta tipología es que el motor térmico y el eléctrico se pueden montar separadamente. Esto permite la posibilidad de distribuir el peso del sistema propulsor del VEH y en autobuses una oportunidad de utilizar piso bajo. Es el caso, por ejemplo, del Castorsua Tempus. Algunas de las marcas que se encuentran en el mercado con configuración híbrida en serie son las siguientes: Opel Ampera, Audi A1 e-tron, Chevrolet Volt, etc.

• **Configuración en paralelo:** Aquella en la que más de una fuente de energía puede proporcionar potencia propulsiva. El MCI y el motor eléctrico se configuran en paralelo, con un acoplamiento mecánico que combina

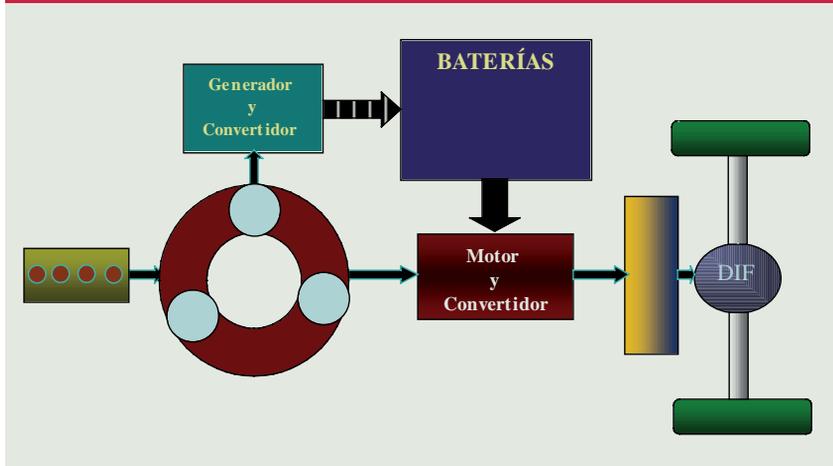


los pares de ambas fuentes de energía. Una disposición de una configuración en paralelo se muestra en la Figura 2.

En la configuración en paralelo, el MCI y el motor eléctrico se conectan al eje de transmisión mediante embragues separados. Los requerimientos de potencia para el motor eléctrico son menores que en la configuración en serie o que en un VE, ya que el MCI complementa la potencia total requerida por el VEH. La potencia propulsiva se puede suministrar bien por el MCI, bien por el motor eléctrico o bien por combinación de ambos sistemas, por lo que sus tamaños son más pequeños. Un inconveniente es que el MCI no puede ir situado en cualquier parte del VEH, pues debe conectarse al eje, y que en modo eléctrico las baterías no se pueden cargar, ya que no hay generador. Otro inconveniente es la complejidad en el control y del acoplamiento mecánico.

La elección de un VEH en serie o en paralelo dependerá del tipo de aplicación del VEH y del diseño óptimo para dicha aplicación. Si la aplicación del VEH va a ser básicamente un VE con una asistencia del MCI para un rango aceptable, entonces la elección debería ser una configuración en serie, con un diseño de MCI que asegure la carga de las baterías todo el tiempo. Por otro lado, si el VEH va ser básicamente un vehículo con casi todas sus características de comportamiento y confort como un VMCI pero con menores emisiones y consumo, entonces la configuración seleccionada debería ser en paralelo. Algunas de las marcas

Figura 3. Configuración de un VEH compleja. Las flechas en negro corresponden a conexiones mecánicas.



que se encuentran en el mercado con configuración híbrida paralelo son las siguientes: Honda Insight, Peugeot 3008 Hybrid4, Ford Fusion, Mercedes Benz S400 Blue Hybrid, BMW Active Hybrid 7, etc.

- **Configuración compleja:** También denominada por otros autores *power split*, utiliza una combinación serie-paralelo pero introduciendo un engranaje planetario que conecta el motor térmico, el motor eléctrico y el generador.

Es posible desconectar el motor térmico y hacer funcionar el VEH eléctricamente, pero en la mayoría de los puntos operativos coexisten ambos flujos de energía como en la configuración en paralelo (desde el motor térmico vía caja de cambios a las ruedas) y como una configuración en serie (desde el generador y motor eléctrico a las ruedas). El reparto de

flujos energéticos depende del régimen de giro. Algunas veces puede actuar como puramente paralelo pero la mayoría de las veces funciona como parcialmente en serie y parcialmente en paralelo. Con esta disposición, como en el caso anterior, es posible combinar las ventajas de ambas configuraciones en serie y paralelo pero es mucho más cara y compleja. Algunas de las marcas que se encuentran en el mercado son las siguientes: Toyota Prius, Lexus ES300h.

En función del grado de hibridación eléctrica (GHE: relación entre la potencia eléctrica y la potencia total de tracción) de los VEH se puede ver cómo se clasifican en la Figura 4:

- **Vehículos con GHE Baja:** (micro hybrid) Son el primer paso hacia la electrificación del sector transporte. Estos vehículos disponen de sistemas de propulsión convencionales pero incorporan un sistema adicional de arranque-parada (start/stop). Los microhíbridos paran automáticamente el motor de combustión interna (MCI) cuando el vehículo se detiene y lo arrancan cuando se pisa el pedal del acelerador. Con este sistema se pueden alcanzar ahorros de combustible de hasta un 7%. No ofrecen la opción de conducción en modo eléctrico ni de aceleración eléctrica. Este concepto de hibridación se puede adaptar fácilmente al sistema de potencia convencional por lo que se espera una importante penetración en el mercado en corto plazo.

Figura 2. Configuración de un VEH en paralelo. Las flechas en negro corresponden a conexiones mecánicas

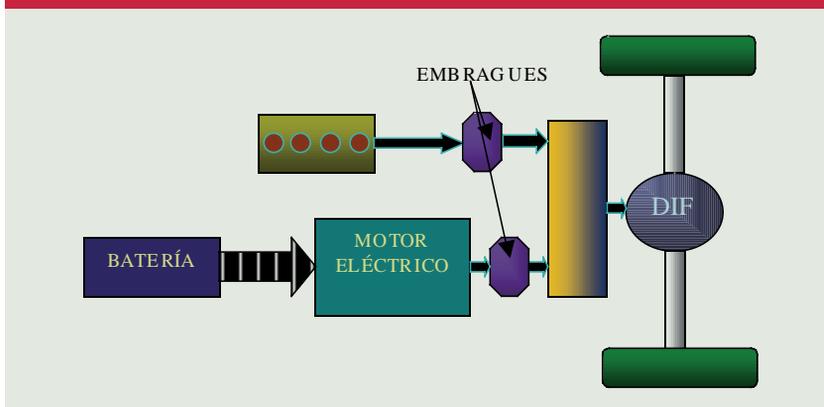
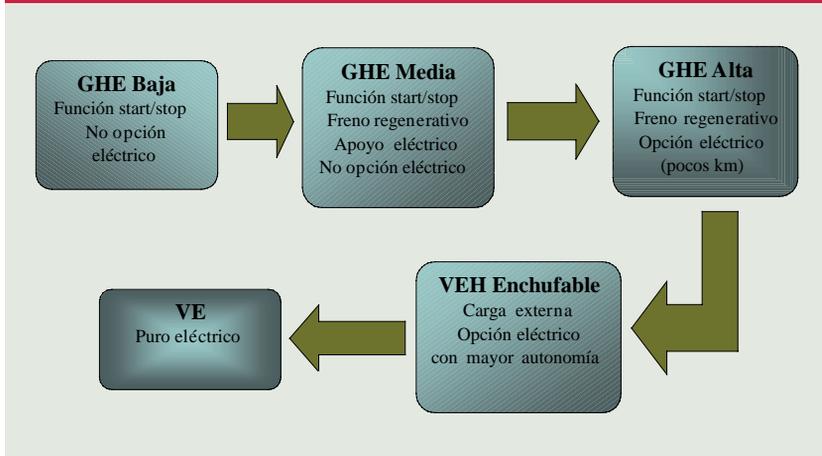


Figura 4. Clasificación de los VEH en función del grado de hibridación eléctrica (GHE)



- **Vehículos con GHE Media:** (mild hybrid) Estos vehículos integran un motor eléctrico que proporciona par de asistencia en la aceleración, con lo que el motor de combustión interna puede ser más pequeño y eficiente. Además, el motor eléctrico puede actuar en modo inverso como un generador cuando el vehículo está frenando, recuperando la energía cinética y cargando las baterías. Con este sistema se alcanzan ahorros del 15% al 20% de combustible. No ofrecen la opción de conducción en modo eléctrico.

- **Vehículos con GHE Alta:** (full hybrid) Estos vehículos híbridos proporcionan propulsión eléctrica a baja velocidad ya que tanto el motor térmico como el eléctrico están atacando el eje de tracción. Debido a esta posibilidad de conducción en modo eléctrico a bajas velocidades, el principal beneficio de este tipo de vehículos se centra en el entorno urbano. En tales casos, el consumo de combustibles y, por tanto, las emisiones contaminantes, se pueden reducir hasta un 25%.

- **Vehículos híbridos enchufables “VEHE”:** (plug-in hybrid) Este tipo de vehículos están preparados para recargar las baterías enchufándolos a la red eléctrica por lo que proporcionan una mayor autonomía en modo eléctrico. Algunas de las marcas que se encuentran en el mercado con vehículos enchufables son las siguientes: Opel Ampera, Ford C-Max, Volvo V60, BYD F3DM, Toyota Prius plug-in, etc.

Vehículos eléctricos

Un vehículo eléctrico (VE) es aquél que utiliza un motor eléctrico en lugar de un motor convencional de combustión interna, y un conjunto de baterías en lugar de un depósito de combustible. La energía química almacenada en la batería se transforma en energía eléctrica y posteriormente se convertirá mediante el motor eléctrico en energía mecánica. Así, dos aspectos caracterizan a un VE: (1) disponen de una fuente de energía (química o electromecánica) portátil y (2) el esfuerzo de tracción lo suministra un motor eléctrico.

Los VE tienen muchas ventajas sobre los convencionales con motor de combustión interna alternativo (MCIA) como, ausencia de ruidos, ausencia de emisiones, alto rendimiento e independencia del petróleo. Los principios de funcionamiento de un VE son similares a los de un vehículo con MCIA. Hay, no obstante, algunas diferencias importantes como el tanque de combustible por las baterías, el MCIA por el ME y algunos aspectos de la transmisión.

Los sistemas recientes de VE tienen una configuración como la de la Figura 5.

El sistema de tracción consta de 3 subsistemas: el motor eléctrico de propulsión, las baterías y los auxiliares. El subsistema de propulsión eléctrica consta, a su vez, del controlador del vehículo, del convertidor electrónico de potencia, del motor eléctrico

y de la transmisión. El subsistema de almacenamiento de energía consta de la fuente de energía, de la unidad de gestión de la energía y de la unidad de carga. El subsistema de auxiliares consta de la unidad de dirección, de la unidad de climatización y de la unidad de suministro de auxiliares.

Basado en el control de entradas del pedal acelerador y del pedal del freno, el controlador del vehículo proporciona las señales de control adecuadas para el controlador de potencia, cuya función es regular el flujo de energía entre las baterías y el ME. El flujo inverso de energía se debe al proceso de frenada regenerativa. El módulo de gestión de la energía coopera con el controlador del vehículo para controlar la frenada regenerativa y su recuperación de energía. También trabaja con la unidad de carga de energía durante el proceso de recarga. La unidad de suministro de energía de auxiliares proporciona la potencia necesaria con diferentes niveles de tensión para todos los auxiliares, el sistema de dirección y el de climatización.

Algunas de las marcas que se encuentran en el mercado con vehículos eléctricos son las siguientes: Mitsubishi iMiEV, Renault Fluence, Peugeot Ion, Nissan Leaf, Citroën C-Zero, Ford Focus EV, etc.

Estado actual de la tecnología

El gran potencial de los VE deriva de su posibilidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y de aumentar de forma significativa el rendimiento del sistema propulsor (el motor eléctrico tiene un rendimiento mayor que el motor de combustión interna). Dado el estado actual de la tecnología, sin embargo, estas ventajas tienen también ciertos inconvenientes, tales como una pobre autonomía, coste inicial elevado y aspectos de seguridad en las baterías.

Restricciones impuestas por los requerimientos del concepto de vehículo eléctrico, especialmente con relación al sistema de almacenamiento de energía, evitan una introducción mayor de esta tecnología en el mercado. El resultado de los desarrollos pasados de los VE condujo a aplicaciones

especiales no adecuadas para un mercado masivo. Actualmente, el rango de aplicaciones va desde ciclomotores a pequeños vehículos. Todos estos vehículos son adecuados para aplicaciones más o menos restringidas a aplicaciones especiales, por lo que no pueden competir en el segmento del automóvil de las grandes ventas. La tendencia, sin embargo, muestra el interés de los fabricantes de introducir vehículos en el gran mercado. Aunque los fabricantes son bastante cautos con los estudios prospectivos en este momento, los consumidores esperan disponer de vehículos eléctricos o parcialmente eléctricos en los próximos años.

El principal reto tecnológico en el desarrollo de los VE está en maximizar la autonomía, el comportamiento y la seguridad, minimizando a su vez el peso y el coste. Para conseguir esto, es necesario, por un lado, considerar la tracción eléctrica, incluyendo el motor eléctrico, el convertidor, el controlador y la batería como un sistema completo, y desarrollar componentes individuales optimizados de acuerdo a este sistema. De lo contrario, el resultado podría ser obtener componentes individuales sobredimensionados, de mayor peso y coste en el conjunto del sistema de tracción. Y, por el otro lado, optimizar la gestión de la energía y el sistema de control.

El componente central de un VE es el sistema de almacenamiento de energía, ya que es el que define la autonomía y el comportamiento del vehículo, pero al mismo tiempo el que plantea grandes retos de mayores mejoras en el conjunto del vehículo. En los últimos años, las baterías de Ni-MH y de Li-ión han conseguido buenas prestaciones en lo relativo a la densidad de energía y su tecnología está preparada para aplicaciones en serie. No obstante, las baterías de Li-ión deben mejorar en cuanto al coste y seguridad si se pretenden que se las considere como una tecnología alternativa para los VEH y los VE.

Con el éxito de los vehículos híbridos japoneses, la tecnología híbrida se ha establecido en el mercado automovilístico para las próximas décadas. Esto tendrá una implicación no solo en la reducción del consumo de combustible, sino también en la reducción de emisiones contaminantes y de ruido, especialmente si se utilizan en el ámbito urbano. La mayoría de los fabricantes de automóviles ofrecen vehículos híbridos y están investigando en una mayor electrificación del sistema propulsor. Los vehículos híbridos con conexión a red (plug-in hybrid electric vehicles) simbolizan un gran paso hacia los vehículos puramente eléctricos.

Resumiendo, se puede decir que la tecnología híbrida está disponible

en el mercado actual del automóvil. En términos generales, la tecnología para los vehículos eléctricos cubre las necesidades del transporte diario en torno a los 100 km de autonomía, pero todavía no está en el mercado actual del automóvil, de forma extendida. Además de los requerimientos relacionados con la densidad de potencia y energía, el coste de los sistemas de almacenamiento de energía así como sus aspectos de seguridad parece ser la principal barrera a superar por el vehículo puramente eléctrico para su penetración en el mercado.

Situación en España

En lo que respecta a España en 2012 se puede señalar que con respecto a las tecnologías de los vehículos híbridos y eléctricos, el desarrollo es bastante incipiente:

- En España no se fabrican baterías de Li-ion para vehículos, solo Cegasa ha estado investigando en este campo y no han sacado ningún producto comercial durante 2012.
- Los vehículos eléctricos diseñados en España son, hasta la fecha, el Seat IBE (prototipo), Hiriko (prototipo) y otros más ligeros como el Comarth, Little y otros prototipos. Se ensamblan en España, aunque no se desarrollan, el Twizy de Renault, al igual que el modelo NV200 de Nissan. ■

Figura 5. Esquema conceptual de la configuración de un vehículo eléctrico

