

Vehículos eléctricos e híbridos: estado de la tecnología

J. Alcibar, E. Ibarra, J. Andreu, A. Matallana, I. Kortabarria
Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Jokinaltzibar@gmail.com

Abstract—En la actualidad, la popularidad de los vehículos eléctricos e híbridos ha aumentado considerablemente, principalmente debido a razones medioambientales y de ahorro energético. En este artículo se presenta el estado de la tecnología de este tipo de vehículos. En primer lugar, se exponen las distintas topologías vehiculares para, posteriormente, explicar en detalle la tecnología, componentes y el funcionamiento del vehículo eléctrico conectado a baterías.

Index Terms—Topologías Vehiculares, HEV, BEV, Electrónica de Potencia.

I. INTRODUCCIÓN

El nivel de consumo energético permite medir el progreso y bienestar de una sociedad. De acuerdo con [1], el consumo mundial de energía crecerá un 56 % entre 2010 y 2040. Teniendo en cuenta que las fuentes de energía tradicionales son finitas, en un determinado momento esta demanda no podrá ser abastecida. Los vehículos eléctricos (EVs) representan una de las vías más prometedoras para lograr una mayor eficiencia energética y, al mismo tiempo, poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes [2]. En este sentido, la tabla I muestra el rendimiento del tren de potencia para distintos tipos de vehículo de tracción [3].

Uno de los primeros automóviles desarrollados fue el vehículo eléctrico (1832-1839). De hecho, existieron pequeños vehículos eléctricos anteriores al motor de cuatro tiempos sobre el que Diésel (motor Diésel, 1893) y Benz (motor ciclo Otto o gasolina, 1885) basaron el automóvil actual. Aunque los vehículos de Motor de Combustión Interna (MCI) han sido la tecnología predominante durante el siglo XX, la electrificación de los vehículos es, a día de hoy, una realidad. Por ejemplo, el stock total de EVs en todo el mundo a finales del 2012 era de más de 180.000 unidades (20 tipos de modelos) [2]. Se prevee llegar a los 5,9 millones en ventas y 20 millones en stock para el 2020 [2]. Dada la importancia de esta tecnología, este artículo va a exponer el estado tecnológico del vehículo eléctrico. Inicialmente, se analizarán las distintas topologías que existen a día de hoy. Posteriormente, se realizará un análisis más exhaustivo del vehículo eléctrico, explicando su funcionamiento y sus componentes principales.

II. TOPOLOGÍAS VEHICULARES

A. Vehículo convencional

Tal y como muestra la figura 1, existen dos variantes para los vehículos MCI [4]:

Tabla I
RENDIMIENTO DEL TREN DE POTENCIA PARA DISTINTOS TIPOS DE VEHÍCULO DE TRACCIÓN (%).

Etapa	Tipo de vehículo		
	Convencional	Híbrido	Eléctrico
Pozo a tanque	80	80	37
Tanque a rueda	16	24	80
Total	13	19	30

Pozo a tanque: analiza las pérdidas de energía desde la fuente energética hasta el depósito del vehículo.
Tanque a rueda: analiza las pérdidas de energía desde el depósito del vehículo hasta las ruedas.

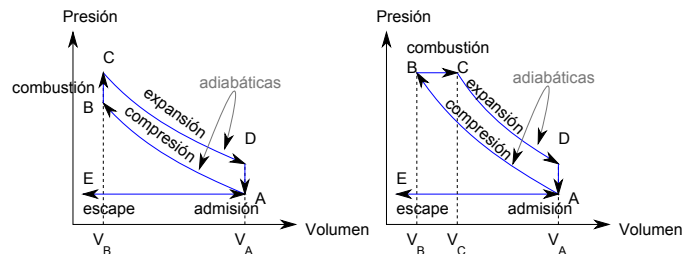


Figura 1. Ciclos termodinámico Otto (izquierda), Diésel (derecha).

- La ignición por chispa o ciclo Otto, el cual funciona con gasolina líquida derivada del petróleo.
- La ignición por compresión o ciclo Diésel, el cual funciona con gasoil líquido derivado del petróleo.

En la última década, el uso del ciclo Diésel ha crecido tanto en Europa como en otros continentes. Esto es debido al aumento de los precios de los combustibles y, por tanto, a la necesidad de una mayor eficiencia en los motores [5]. Aunque ambos ciclos han ido mejorando en paralelo, el ciclo Diésel siempre ha tenido una mayor eficiencia. Esta diferencia estriba en el propio ciclo termodinámico (figura 1). En el ciclo Diésel, la combustión tiene lugar a presión constante, en lugar de producirse a volumen constante, como ocurre en el ciclo Otto [6]. La eficiencia de dichos ciclos tiene un límite teórico (límite de Carnot). La máxima eficiencia alcanzable en el caso del ciclo Otto es del 56,5 %, mientras que en el Diésel es del 63,2 % [5]. Además, la eficiencia o rendimiento de los motores de combustión modernos se ve limitada por otra serie de factores, tales como la pérdida de llenado en el proceso de renovación de la carga (etapas de admisión y escape), la pérdida de energía por la fricción, la refrigeración, etc. Por ello, no es posible llegar al límite máximo teórico

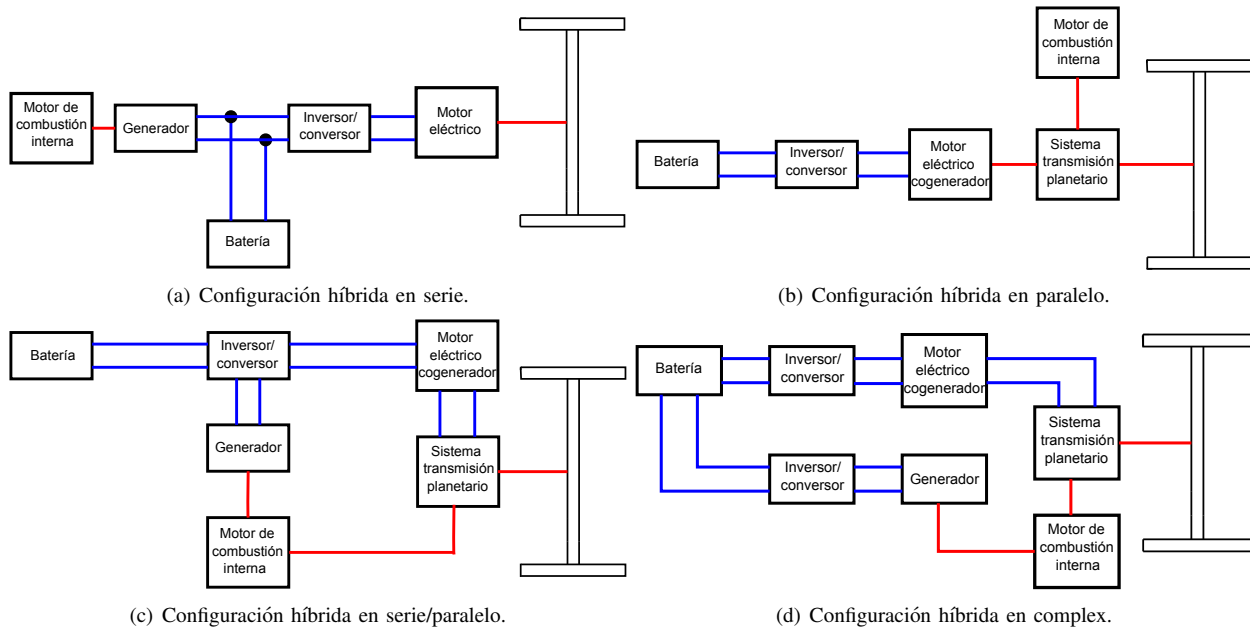


Figura 2. Distintas configuraciones de vehículos híbridos.

en aplicaciones reales. La eficiencia media de los motores de combustión es de un 25 % para un ciclo Otto y de un 30 % para un ciclo Diésel, entendiéndose estas eficiencias como las del punto óptimo de trabajo. Éstas se verán reducidas, más aún, debido a que el punto de trabajo en un vehículo no es siempre el óptimo [5].

B. Vehículo híbrido conectado a baterías

La tracción híbrida es el resultado de intentar aprovechar las cualidades de los motores térmicos (autonomía y densidad de potencia) y las ventajas de la tracción eléctrica (eficiencia y par a bajas revoluciones del motor), formando, de este modo, un conjunto con mayor eficiencia que el motor térmico por sí solo. El objetivo principal de una hibridación con motor de combustión es hacer trabajar al motor térmico lo más próximo a la zona de máxima eficiencia durante el mayor tiempo posible [7]. En el caso de los híbridos enchufables, el objetivo es alargar la autonomía del vehículo [7].

Hasta hace poco, existían dos configuraciones básicas para vehículos híbridos (HEV), la configuración serie y la configuración paralela. Actualmente, con el objetivo de mejorar el rendimiento de la energía y la economía del combustible, se han desarrollado configuraciones como la serie-paralelo o la complex [8]. La figura 2 muestra dichas configuraciones.

1) *Configuración serie*: La configuración serie (figura 2(a)) utiliza un motor de combustión interno para recargar las baterías que alimentan al motor eléctrico. En este sistema, el motor eléctrico es el responsable de propulsar el vehículo. Con esta configuración, se consigue una mayor simplicidad en la mecánica del automóvil (no requiere de una caja de cambios ni demás componentes mecánicos asociados a la conducción en modo motor MCI/Gasolina). Aunque se trata de una configuración muy eficiente (el vehículo circula

siempre en modo eléctrico), la necesidad de una batería de suficiente capacidad dificulta utilizar este sistema. [3]. Hoy en día se pueden encontrar varios vehículos con esta configuración, también llamada *Extender Range Electric Vehicle (EREV)*. Por ejemplo, el Opel Ampera y el Chevrolet Volt (ambos de 150 CV) tienen una autonomía combinada de 500 km y una autonomía en modo eléctrico de 60 y 70 km, respectivamente.

2) *Configuración paralela*: Esta configuración fue la primera en aparecer en el mercado. Fundamentalmente, utiliza la tracción eléctrica para mejorar la eficiencia energética del motor de gasolina. Esto se consigue utilizando el MCI en los regímenes de giro en los que tiene un mayor rendimiento. La tracción eléctrica se utiliza, generalmente, al cambiar las condiciones de conducción; es decir, para iniciar el movimiento y almacenar energía al frenar [3]. Esta gestión inteligente de la energía se puede realizar gracias a los variadores electrónicos, los cuales permiten funcionar al motor eléctrico en cualquier régimen [3]. Un claro ejemplo de este tipo de híbrido es el Toyota Prius, con su motor de gasolina de 98 CV que, combinando con el eléctrico, llega a los 136 CV con una autonomía de 1.150 km. A su vez, el Honda Insight, el cual lleva montado un motor de gasolina de 88 CV, llega a los 98 CV con la combinación de ambos, con una autonomía de 900 km. Ambos motores (eléctrico y MCI/Gasolina) se encuentran acoplados al diferencial (figura 2(b)), por lo que pueden propulsar el vehículo de forma independiente.

3) *Configuración serie-paralelo*: Esta configuración se obtiene de la combinación de la configuración serie y paralelo (figura 2(c)) y cuenta con un vínculo mecánico adicional en comparación con la serie híbrida, además de un generador adicional en comparación con el híbrido paralelo. Aunque combina las características ventajosas de las configuraciones serie y paralelo, se trata de una arquitectura relativamente complicada y costosa. Sin embargo, gracias a los avances

en el control y tecnologías de fabricación, algunos HEV modernos prefieren adoptar este sistema [8]. Un ejemplo de esta tecnología es el BYD F3DM, el cual dispone de un MCI de 68 CV y llega a los 170 CV combinando ambos motores. Estas características le permiten una autonomía de 100 km en modo eléctrico y una autonomía total de 430 km.

4) *Configuración complex*: Como refleja su nombre, este sistema implica una configuración compleja (figura 2(d)), la cual no se puede clasificar entre los tres tipos anteriores. El complejo híbrido parece similar al híbrido en serie-paralelo, ya que la maquinaria eléctrica actúa como generador y motor eléctrico. Sin embargo, la principal diferencia radica en que el flujo de energía del motor eléctrico es bidireccional en la configuración compleja y el flujo del generador es unidireccional en la configuración serie-paralelo. Este flujo de energía bidireccional puede permitir modos de funcionamiento versátiles, especialmente los tres modos de propulsión (debido a la MCI y dos motores eléctricos), que no puede ser obtenido en la arquitectura serie-paralelo [8].

En función del método de recarga de energía, los HEVs se pueden clasificar en las siguientes categorías [3]:

1) *Vehículo eléctrico híbrido no enchufable (HEV, Hybrid Electric Vehicle)*: Son vehículos provistos de un motor de combustión interno y de un motor eléctrico alimentado por un dispositivo de energía (como, por ejemplo, una batería) recargable, entre otros medios, mediante el motor de combustión interna. Las primeras unidades de HEV que se comercializaron fueron de este tipo, tales como el primer híbrido de Mercedes-Benz, el modelo S 400 BlueHYBRID, o como el Toyota Prius Plus, el cual combina el motor de combustión interno con el eléctrico, pudiendo dar una potencia de hasta 136 CV.

2) *Vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle)*: Un PHEV es, esencialmente, un vehículo híbrido con un dispositivo que permite su conexión a la red eléctrica para cargar su batería. El motor de tracción es el motor eléctrico, contrariamente a lo que sucede en el HEV. Este vehículo dispone de baterías con una capacidad superior, siendo su autonomía de aproximadamente 50 km en modo eléctrico. El motor de combustión es más pequeño y sirve para producir electricidad. Este tipo de vehículo reúne las ventajas de los coches de combustión y de los vehículos eléctricos. En el mercado actual existen varios modelos como el Toyota Prius Plug-In que, combinando el motor de combustión con el eléctrico, proporciona 136 CV y una autonomía de 25 km en modo eléctrico, o el Volkswagen Golf GTE, el cual dispone de un motor de 204 CV que permiten circular 50 km en modo eléctrico.

C. Vehículo eléctrico conectado a baterías (BEV)

Los BEV son vehículos de tracción eléctrica alimentados por una batería recargable. Estos vehículos están propulsados

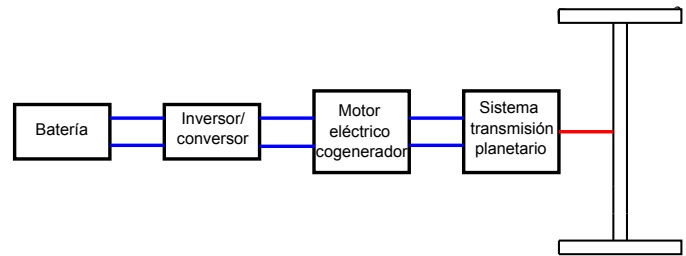


Figura 3. Configuración genérica del vehículo eléctrico conectado a baterías.

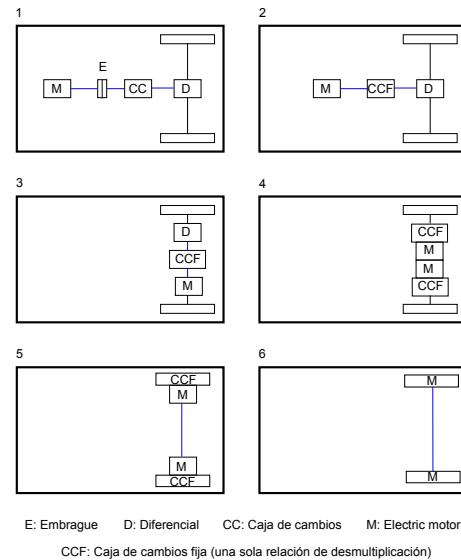


Figura 4. Configuraciones del vehículo eléctrico conectado a baterías.

únicamente por un motor eléctrico (figura 3). La fuente de energía proviene de la electricidad almacenada en la batería, que se debe cargar a través de la red [3]. En la actualidad, existen múltiples configuraciones para los BEVs, debido a las variantes existentes en las formas de propulsión y de energía eléctrica [7]. La figura 4 muestra las variantes más comunes.

1) *Configuración número 1*: Se compone de un motor eléctrico, un embrague, una caja de cambios y un diferencial. El embrague se utiliza para conectar o desconectar la alimentación del motor eléctrico de las ruedas motrices. La caja de cambios nos permite la selección de una serie de relaciones par-velocidad.

2) *Configuración número 2*: Nace con la idea de simplificar el conjunto anterior, ya que el motor eléctrico da una potencia constante en un amplio rango de velocidades, por lo que es

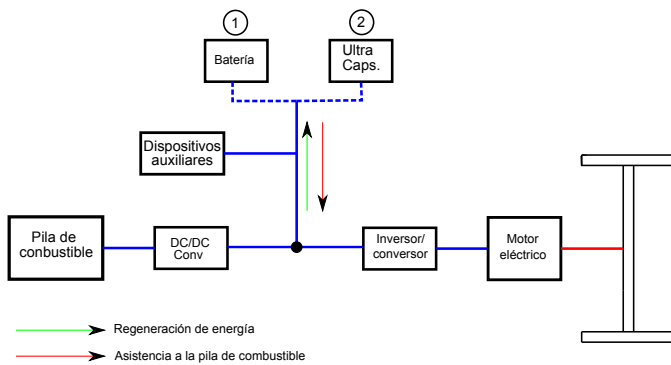


Figura 5. Configuraciones posibles del vehículo eléctrico conectado a pila de combustible.

posible sustituir la caja de cambios por un engranaje fijo y eliminar, así, la necesidad de colocar un embrague. Con esta configuración se reduce el tamaño y el peso del sistema.

3) *Configuración número 3:* Es posible simplificar el tren de potencia al colocar el motor eléctrico, el engranaje fijo y el diferencial directamente sobre el eje que va unido a los palieres.

4) *Configuración número 4:* En esta configuración se prescinde del diferencial mecánico, disponiendo de dos motores, uno para cada rueda.

5) *Configuración número 5:* Se puede optar por colocar los motores en las ruedas. Entre el motor y la rueda se dispone de un engranaje cuya función es reducir la velocidad y aumentar el par.

6) *Configuración número 6:* Es posible conectar directamente la salida del rotor de un motor eléctrico de baja velocidad a la rueda motriz. Para esta opción se requiere un motor eléctrico de gran par motor, el cual permita iniciar la marcha y acelerar el vehículo.

D. Vehículos de pila de combustible

Existen dos modos principales para utilizar la pila de combustible en los vehículos, una utilizando solo la pila de combustible y otra como híbrido [5], [9]:

1) *Puramente eléctrico:* Cuando únicamente se utiliza la pila de combustible como fuente de energía. En todo caso, cuentan con un conjunto de ultracondensadores para hacer una regulación eficiente de la energía mediante almacenamiento intermedio (figura 5, ②). Esto se justifica por el hecho de que la pila es capaz de proporcionar adecuadamente gran cantidad de energía en régimen constante, pero se adapta mal a demandas de picos instantáneos de potencia. Honda FCX o Daimler Chrysler utilizan este método, lo cual indica que dichos fabricantes preveen que la pila de combustible llegue a ser económicamente factible.

2) *Arquitectura híbrida:* En este caso, la pila actúa como cargador de batería, mientras que las baterías soportan los picos de potencia y permiten a la pila un funcionamiento más adecuado (figura 5, ①). Los prototipos de Toyota y el Honda FCX Clarity funcionan de esta forma. Esta solución tiene la

ventaja de que la mayor parte de los usuarios recorren menos de 30 km diarios, lo que equivale a la autonomía de la batería. Este tipo de vehículo podría ser utilizado como transporte de uso diario, recargándolo con hidrógeno solo para viajes más largos.

III. TECNOLOGÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO CONECTADO A BATERÍAS

A continuación se expone, de una forma más detallada, la tecnología del vehículo eléctrico puro y su funcionamiento.

A. Componentes del vehículo eléctrico

El tren de propulsión de todo vehículo eléctrico se compone de tres subsistemas (figura 6): el sistema eléctrico de propulsión, la fuente de energía y los sistemas auxiliares. El primero de ellos está compuesto por el controlador del vehículo, el convertidor electrónico de potencia, el motor eléctrico, la transmisión mecánica y las ruedas de conducción. El subsistema de la fuente de energía se compone de la fuente de energía (tradicionalmente baterías), la unidad de gestión de la energía y la unidad de reabastecimiento de la energía. El subsistema auxiliar lo componen la unidad de manejo de la energía, la unidad de control de climatización y la unidad de alimentación auxiliar.

El acelerador y el freno son las entradas al sistema (figura 6). Mediante los pedales, el conductor envía señales a un dispositivo de control, el cual comanda al convertidor electrónico de potencia, cuya función es regular la alimentación del motor eléctrico desde las baterías. La fuente de alimentación auxiliar proporciona la energía necesaria, con diferentes niveles de tensión, para abastecer los sistemas auxiliares, entre ellos, el control de la unidad de la dirección asistida [7].

La tracción eléctrica consta básicamente de los siguientes elementos:

1) *Batería de alto voltaje:* En los vehículos eléctricos se emplean baterías en las que las reacciones químicas que participan en la conversión de energía pueden ser revertidas, de forma que éstas pueden ser recargadas. Dichos sistemas poseen múltiples ciclos de carga y descarga [10].

La evolución de la tecnología de las baterías es determinante para poder valorar el éxito o fracaso del vehículo eléctrico. Actualmente, existen muchos tipos de baterías, tales como las de Plomo-Ácido, Níquel-Metal Hidruro, Níquel-Cadmio, Ion-Litio, etc. Aunque la tecnología de las baterías evoluciona continuamente, el tipo de batería más utilizado por los fabricantes de vehículos eléctricos es la de Ion-Litio, ya que su elevada densidad energética, bajo peso y bajo efecto memoria se superponen a sus inconvenientes (alto precio y posibilidad de sobrecalentamiento hasta el punto de explosión) [11].

2) *Convertidor de potencia:* La presencia de un sistema electrónico de potencia en los vehículos eléctricos responde a la necesidad de modificar la forma y características de las tensiones y corrientes existentes en la batería de alto voltaje y en el motor eléctrico. Generalmente, se utilizan motores síncronos de imanes permanentes alimentados por corriente alterna trifásica, siendo el inversor el convertidor encargado

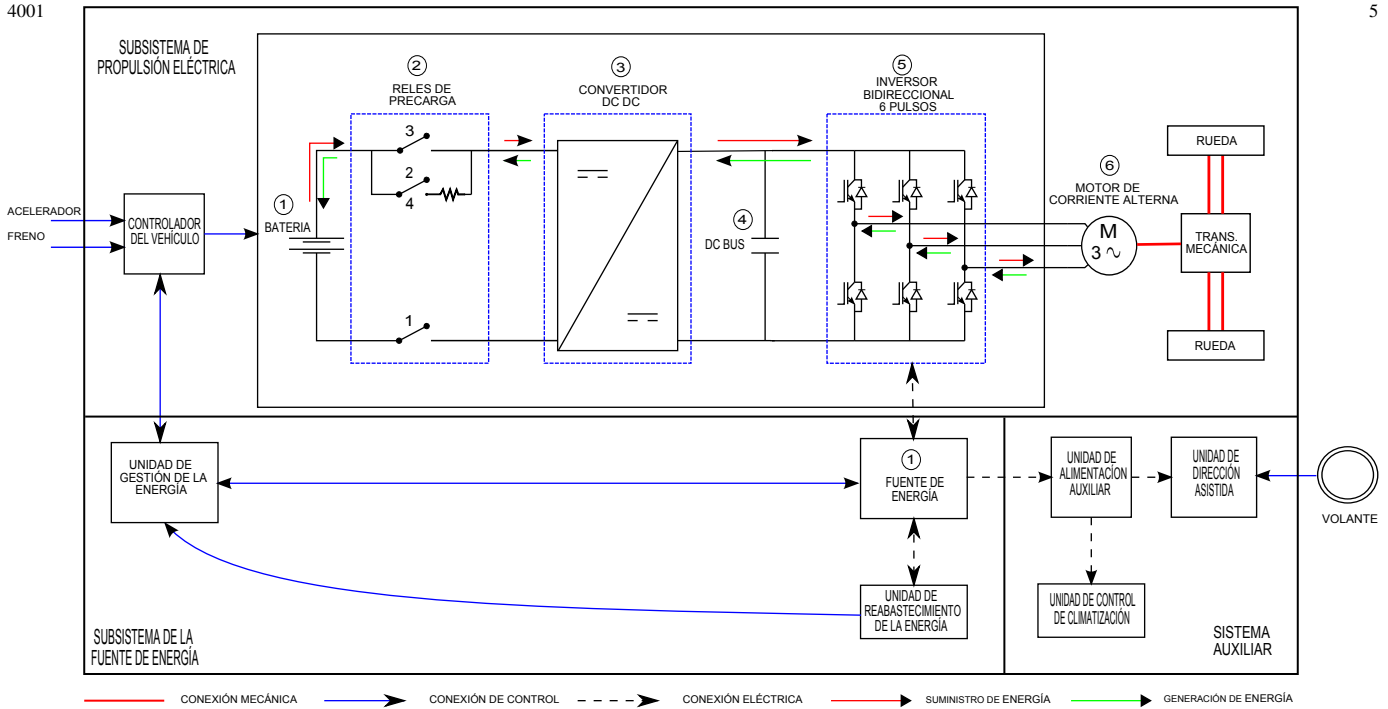


Figura 6. Sistema de propulsión del vehículo eléctrico (la batería pertenece al subsistema de la fuente de energía).

de convertir la corriente continua en corriente trifásica alterna del voltaje requerido por el motor en cada momento [9].

3) *Motor eléctrico*: Los motores eléctricos son los dispositivos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Principalmente, existen dos tipos de motores, según la forma en que la energía eléctrica les es suministrada: motores de corriente continua (DC) y motores de corriente alterna (AC) [12].

4) *Sistema de control*: El sistema de control de un vehículo eléctrico se compone de varias unidades de control (ECU, *Electronic Control Unit*). Al motor le llega una serie de referencias, tales como el par y la velocidad demandada. Éstas provienen de los mandos del vehículo: el acelerador, el freno y la palanca de cambios. Con el freno se controla tanto los frenos mecánicos, como el eléctrico regenerativo, siendo el control el que decide qué tipo de freno aplicar en cada circunstancia. Con el acelerador se controla la velocidad deseada y, por lo tanto, el par necesario para pasar de la velocidad actual a la deseada.

B. Características y prestaciones del vehículo eléctrico

Respecto a características y prestaciones, los vehículos eléctricos puros tienen una autonomía de entre 100 y 300 km, donde la potencia puede llegar hasta los 220 kW (caso del Tesla Model S, el cual es capaz de alcanzar los 190 km/h). Respecto a las prestaciones de la batería, la mayoría de BEVs cuentan con tecnología de Ion-Litio. Sin embargo, es posible encontrar algunas excepciones como el Níquel-Metal Hidruro (Toyota Yaris). Estas baterías son de alto voltaje, ya que sus tensiones varían entre 300 y 400 V y son capaces de dar hasta 60 kW de potencia. Aunque esta tecnología evoluciona a gran velocidad, a día de hoy los vehículos eléctricos se enfrentan a importantes desafíos, tales como la autonomía o el coste, que puede llegar a ser de hasta 118.000 € (Tesla Roadster).

C. Funcionamiento del vehículo eléctrico conectado a baterías

El primer paso a realizar por un vehículo eléctrico es la carga de sus baterías. El tiempo de carga completa a partir de una fuente de energía externa de las características de una red doméstica tiene una duración media de entre 4 y 8 horas, en función de la capacidad de la batería. Sin embargo, dada la forma de la corriente eléctrica proporcionada por la red (alterna monofásica), esta energía no puede almacenarse directamente en la batería y necesita ser procesada previamente. En este paso es donde aparece el primer elemento del sistema de electrónica de potencia: el rectificador AC/DC. Este dispositivo convierte la alterna en continua, de modo que la batería de alto voltaje es capaz de almacenarla y recargarse.

Una vez la batería alcanza el nivel de energía necesario, se desconecta la fuente de alimentación externa y se procede a poner en marcha el motor. Para ello, se utilizan los relés de precarga, cuya función es habilitar la conexión entre la batería cargada y el sistema electrónico de potencia principal del vehículo (figura 6, ① y ⑤). Estos relés deben conmutar en un orden preestablecido (figura 6, ②), de forma que el bus de continua (figura 6, ④) se cargue suavemente a través de la resistencia de precarga (R_{pch}).

El motor se pone en marcha una vez conectada la batería con la electrónica de potencia. En esta ocasión, el flujo de energía se produce entre la batería y el motor eléctrico, el cual se encarga de la propulsión del vehículo. Dada la magnitud de la energía necesaria para la conducción del automóvil, la mayoría de los modelos incorporan un motor trifásico de corriente alterna (figura 6, ⑥). Para adaptarse a estos requisitos, la energía almacenada en la batería necesita ser nuevamente procesada mediante un convertidor de potencia. Existen varias arquitecturas para procesar la energía. La primera de ellas se realiza mediante un inversor que se encarga de convertir

la corriente continua en trifásica alterna (figura 6 (5)). Esta tecnología es la más utilizada en los vehículos eléctricos por su simplicidad y coste. Otra alternativa pasa por incorporar un convertidor DC/DC junto al inversor (figura 6, (3)). Dicho convertidor mejora la eficiencia del sistema durante el frenado, ya que la tensión del DC bus sufre una variación importante al frenar cuando el vehículo circula a una considerada potencia (p. ej. 50 kW). Dicha variación se controla mediante el convertidor DC/DC, consiguiendo, de ese modo, un mayor control sobre la tensión del DC bus. Utilizando ambas arquitecturas, el motor eléctrico recibe la energía necesaria y a través del diferencial la transmite a las ruedas en forma energía mecánica, las cuales se encargará del desplazamiento del vehículo [13], [14].

Por otra parte, el sistema de frenado regenerativo se encarga de transformar la energía cinética en eléctrica durante el frenado del vehículo. Mediante un par reductor, el dispositivo se encarga de ralentizar el vehículo, capturando la energía liberada por las fuerzas de inercia conforme el automóvil decelera y cargando la batería de alto voltaje. Este proceso es totalmente opuesto al sistema de frenado convencional, donde unas zapatas se encargan del frenado, generando pérdidas de fricción [15]. Sin embargo, no es posible recuperar el 100 % de la energía de las fuerzas inerciales de frenado, por lo que se hace necesaria la incorporación de un sistema convencional de frenado auxiliar mecánico. Además, el freno de fricción es necesario para detener el vehículo completamente o actuar en el caso de un fallo eventual en el sistema de frenado regenerativo.

Las estrategias de frenado regenerativo que forman parte del sistema de frenado del vehículo eléctrico se pueden agrupar en las siguientes categorías [15], [16]:

1) *Estrategias de frenado regenerativo en serie*: En este tipo de estrategias, el frenado regenerativo se activa nada más pisar el freno y éste se controla para imitar el comportamiento de un freno convencional. A partir de un nivel de compresión del pedal de freno, el freno convencional se combina con el freno regenerativo. En este tipo de estrategias, el sistema ABS debe tener control sobre el par de frenado regenerativo, por lo que se trata de un sistema complejo. Cuando el vehículo reduce su velocidad hasta el punto en el que el rendimiento del generador es insuficiente, el freno regenerativo deja de operar y únicamente actúa el freno mecánico.

2) *Estrategias de frenado regenerativo en paralelo*: En este tipo de estrategias, el freno de servicio convencional se activa en el momento en el que se pisa el freno. En paralelo, se aplica el frenado regenerativo, cuyo par se determina mediante un algoritmo de control. Para distribuir la fuerza de frenado entre el freno convencional y el freno regenerativo, el algoritmo de control debe tener en cuenta la velocidad del vehículo y el estado de carga (SOC, *State of Charge*) de las baterías, entre otros parámetros. Mediante esta estrategia no se consigue recuperar tanta energía como en la estrategia de frenado regenerativo en serie, porque existe en todo momento una fracción de energía que se disipa en el freno de servicio. Sin embargo, se trata de un sistema más fácil de implementar.

El diseño de estrategias de frenado regenerativo óptimas resulta de gran importancia en el desarrollo del vehículo

eléctrico del futuro. Esto último se debe a que una mínima mejora en la capacidad de recuperación de energía mediante el frenado regenerativo puede mejorar significativamente la autonomía del vehículo eléctrico y, por lo tanto, reducir el consumo energético y coste económico derivado del uso del vehículo.

IV. CONCLUSIONES

Tal y como se deriva del estudio del estado del arte, son múltiples las tecnologías empleadas por los fabricantes en los vehículos eléctricos e híbridos. Hoy en día, la tecnología híbrida es la predominante. Sin embargo, cara a futuro se prevee un crecimiento del mercado de vehículos eléctricos sin motor de combustión.

El papel de la electrónica de potencia es relevante en este tipo de tecnologías. La mejora de la eficiencia de los sistemas electrónicos de potencia y el diseño de estrategias de frenado regenerativo óptimas son dos de los retos tecnológicos más importantes a los que se enfrenta esta tecnología.

V. AGRADECIMIENTOS

El trabajo descrito en esta publicación ha sido generado en la Unidad de Formación e Investigación UF111/16 financiada por la UPV/EHU y patrocinado por el Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco en base a las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT394-10 y por la A.E.C.T. Euroregion Aquitania Euskadi Gobierno Vasco a través del proyecto de investigación OPTimización Energética en inversores Trifásicos Aplicados a Vehículos Eléctricos OPTITAVE.

REFERENCES

- [1] International Energy Agency, "International Energy Outlook 2013," Tech. Rep., Julio 2013.
- [2] —, "Global EV Outlook," Tech. Rep., Abril 2013.
- [3] A. Pozo, E. Molero, *El vehículo eléctrico y su infraestructura de carga*, Marcombo, Ed., Enero 2013.
- [4] W.B. Ribbens, *Electronica automotriz*, Noriega editores, Ed., 2007.
- [5] S. Soylu, *Electric Vehicles -The Benefits and Barriers*, InTech, Ed., August 2011.
- [6] F. Payri, J. M. Desantes, *Motores de combustión interna alternativos*, Reverte, Ed., 2011.
- [7] C.C. Chan, "The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, Febrero 2002.
- [8] —, "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, Abril 2007.
- [9] A. Emadi, *Handbook of automotive power electronics and motor drivers*, Taylor & Francis, Ed., 2005.
- [10] C. Arenas, J. Li, S. Biller, and G. Xiao, "Hybrid/Electric Vehicle Battery Manufacturing: The State-of-the-Art," in *Proc. of the IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Agosto 2010, pp. 281–286.
- [11] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, Julio 2010.
- [12] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & sons, Ltd, Ed., 2003.
- [13] H. Bai and C. Mi, *Transients of Modern Power Electronics*, Wiley, Ed., 2011.
- [14] A. Emadi, Y. Joo Lee, and K. Rajashekara, "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2237–2245, 2008.
- [15] G. Xu, W. Li, K. Xu, and Z. Song, "An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 4, no. 9, pp. 1461–1477, Septiembre 2011.
- [16] S. Oleksowicz, K. Burnhama, A. Southgate, C. McCoy, G. Waited, G. Hardwicke, C. Harrington, and R. McMurrang, "Regenerative braking strategies, vehicle safety and stability control systems: critical use-case proposals," *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 51, no. 5, pp. 684–699, 2013.