

2. LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS

2.1. Introducción

En este apartado se intentará dar al lector una visión general sobre los vehículos híbridos, de forma que este proyecto sea lo más autocontenido posible. Se hablará de la necesidad existente de este tipo de vehículos, de su funcionamiento, y se hará un resumen de las partes que lo conforman y de cómo funciona. Así mismo se comentarán los tipos de vehículos híbridos que existen, y las ventajas e inconvenientes que tienen frente a los vehículos convencionales y a los vehículos puramente eléctricos (propulsados tan sólo por un motor eléctrico y unas baterías).

De este modo el lector estará en disposición de comprender mejor el trabajo que en este proyecto se desarrolla.

Para el desarrollo de este apartado se han utilizado [30], [31], [32] y [33], así como varias páginas web de contenido general sobre vehículos híbridos.

2.2. Problemática del parque automovilístico actual

Las emisiones de los motores de combustión interna de los automóviles son la principal fuente de contaminación atmosférica en las ciudades y contribuyen de forma importante al efecto invernadero. En la actualidad hay más de 750 millones de vehículos con motor de combustión interna en todo el mundo y su número no cesará de crecer en las próximas décadas con lo cual empeorará, aún más, la contaminación urbana. “Si tenemos en cuenta la población mundial actual (en torno a los 6.000 millones de personas) y la que habrá dentro de 25 años (unos 8.000 millones de seres humanos) podemos apreciar con mayor claridad la importancia que tienen las energías alternativas al petróleo, un bien escaso, caro y conflictivo. En la actualidad, un 12 por ciento de la población dispone de automóvil, pero para el año 2030 se estima que casi el 18 por ciento de la población mundial sea propietaria de un vehículo, ya que naciones como la India o China, con espectaculares cifras de población, están experimentando un gran desarrollo económico” [39].

Los vehículos que componen el parque automovilístico actual tienen el problema de presentar unos rendimientos energéticos bajos. Esto puede mejorarse

con los vehículos híbridos, ya sea mediante el uso de un motor de combustión de menor tamaño y que trabaje sólo en su rango de funcionamiento óptimo, apoyado por un conjunto de baterías; o bien mediante el uso de otra fuente de energía como es la pila de combustible (que utiliza hidrógeno para obtener potencia eléctrica), apoyada también por un conjunto de baterías.

Como decía, el principal problema de la baja eficiencia energética de los vehículos convencionales se debe al uso de los motores de combustión en un rango de funcionamiento no óptimo. Este problema se agrava aún más en la conducción urbana, donde los arranques y paradas son constantes, consumiendo consecuentemente una gran cantidad de combustible. Además, no se obtiene ninguna rentabilidad de las frenadas, disipándose toda la energía en forma de calor los frenos.

En resumen, el parque automovilístico actual presenta un problema de insostenibilidad, tanto ecológica, de debido a los altos niveles de contaminación que provocan los coches, como económica, ya que el agotamiento del petróleo es una realidad que ya se está experimentando.

2.3. El vehículo eléctrico híbrido

Los motores eléctricos han demostrado capacidades más que suficientes para impulsar un coche eléctrico (trenes, robots de gran potencia en fábricas, etc.). Sin embargo, la capacidad de almacenamiento de energía eléctrica (por ejemplo en baterías) es muy baja en comparación con la capacidad de acumulación de energía en forma de combustible. Por lo tanto, debido a las necesidades de almacenamiento energético en un vehículo móvil, los diseñadores se ven obligados a usar una complicada cadena energética multidisciplinar e híbrida para sustituir a una sencilla y barata cadena energética clásica depósito-motor-ruedas.

El vehículo eléctrico híbrido es aquel que usa una fuente de energía puramente eléctrica, como son las baterías, que proporcionan potencia a un motor eléctrico, y otra fuente de la que se obtiene energía a partir de un combustible, como puede ser un motor de combustión interna, que le sirva de apoyo al motor eléctrico, bien para mover el coche cuando el eléctrico no puede, o bien para alimentar al eléctrico mediante un generador; o también puede constar de una pila de combustible en lugar del motor de combustión, que utiliza hidrógeno como combustible para producir energía eléctrica. Ésta es la principal ventaja de un vehículo híbrido, que a diferencia de uno eléctrico puro, ofrece una mayor autonomía al no depender exclusivamente de las baterías, y una mayor comodidad

a la hora de la recarga, ya que sólo basta con llenar el depósito de combustible, a diferencia del largo período que supone recargar las baterías.

Si bien actualmente el vehículo híbrido con motor de combustión es el comercializado, ya que es compatible con la infraestructura actual y consigue unas emisiones más bajas, el vehículo híbrido con pila de combustible elimina la dependencia del petróleo y consigue una eficiencia energética superior.

Por último, comentar que para llegar a un mundo en el que sea viable el uso masivo de vehículos híbridos con pila de combustible, sería necesario considerar la inversión económica necesaria para ofrecer las suficientes estaciones de repostaje de hidrógeno: “Actualmente existen 135.000 estaciones de servicio convencionales en la Unión Europea. Haría falta invertir unos 12.000 millones de euros para convertir el 10 por ciento de ellas en proveedoras de H₂” [39]. Precisamente ésta razón es la que está condicionando el lanzamiento de los vehículos híbridos con pila de combustible, como el FCX Clarity de Honda, como puede verse en el apartado 2.8.6.

2.4. Elementos característicos de un vehículo híbrido

A continuación se realiza una breve descripción de los principales elementos de un vehículo eléctrico híbrido en general. Algunos de estos elementos no tienen por qué aparecer en el vehículo híbrido, ya que dependerá de la configuración que se haya escogido para el coche. De todas formas, en el apartado 4 de este proyecto se describe concretamente cada uno de los elementos que conforman el vehículo en estudio en este proyecto.

- **Generador**

El generador es similar a un motor eléctrico, solo que éste sólo trabaja para producir energía eléctrica. Este dispositivo sólo se utiliza en los vehículos híbridos de configuración serie, para cargar las baterías a partir de un motor de combustión.

- **Motor eléctrico:**

El motor eléctrico de un vehículo híbrido ha de ser compacto, poco pesado y eficiente. Una electrónica avanzada permite que éste funcione como motor o como generador (para recargar las baterías en la frenada regenerativa).

- **Sistema de frenado regenerativo**

Al frenar el motor eléctrico actúa como generador recuperando energía de la frenada en forma de energía eléctrica que se almacenará en las baterías. Se requieren también frenos de fricción tradicionales, por motivos de seguridad, así como un sistema de control electrónico que permita maximizar la recuperación de energía y pueda operar el sistema dual de frenos. Sistemas comerciales actuales permiten recuperar alrededor de un 30% de la energía disipada en el frenado convencional. Esta energía recuperada puede reducir el consumo energético hasta en un 15% en conducción en ciudad.

- **Inversor**

El inversor convierte la corriente continua que proporcionan las baterías en la corriente alterna necesaria para mover al motor eléctrico. También varía la frecuencia de esta corriente alterna dependiendo de las revoluciones a las que está girando el motor, para maximizar la eficiencia.

- **Divisor de potencia**

Este dispositivo sólo se utiliza en vehículos híbridos de configuración paralelo que usan un motor de combustión. Se utiliza un engrane planetario que distribuye el giro del motor de combustión entre la tracción y el generador. Controlando las revoluciones del generador, el divisor funciona también como una transmisión continua y variable.

- **Baterías**

Se utilizan las baterías diseñadas para vehículos eléctricos, requiriendo una alta densidad de energía, peso liviano y una larga vida útil.

- **Ultracapacitores o supercapacitores**

Se ha desarrollado también la tecnología de ultracapacitores para el almacenamiento de la energía. Al no depender de reacciones químicas (como las baterías) pueden ser cargados y descargados rápidamente. El ultracapacitor entrega la energía almacenada en él, como un pulso eléctrico poderoso. Se encuentran en etapa de desarrollo comercial.

- **Transmisión**

El sistema de transmisión de un vehículo híbrido cumple la misma función básica que en un vehículo convencional. La transmisión se encarga de transmitir la potencia generada por el motor eléctrico a las ruedas, para propulsar el vehículo, y a la inversa durante la frenada regenerativa.

- **Motor de combustión**

Similar al que lleva un vehículo convencional, solo que más pequeño y diseñado para ser operado en un rango eficiente de funcionamiento.

- **Pila de combustible**

Cumple la misma función que el motor de combustión, solo que utiliza el hidrógeno como combustible para el vehículo, y además tiene una mayor eficiencia energética. Por supuesto, hace al coche menos contaminante.

2.5. Transmisión de potencia en un vehículo híbrido

Como decíamos, un vehículo híbrido tiene dos fuentes de energía para su movimiento. Asociadas a estas dos fuentes de energía, hay dos flujos de potencia que conectan cada fuente de energía con el motor eléctrico. El flujo de energía asociado a las baterías es bidireccional, ya que éstas pueden descargarse para dar potencia al motor, o recargarse durante la frenada regenerativa o bien a partir de la otra fuente de energía. La segunda fuente de energía, que puede ser un motor de combustión o una pila de combustible, lleva asociada un flujo unidireccional. Estos conceptos se describen gráficamente en el siguiente dibujo.

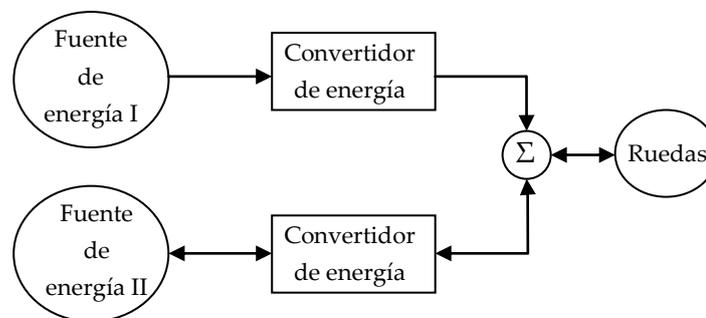


Figura 2.1: Flujos de potencia en el vehículo

El controlador supervisor del vehículo es el encargado de decidir cuanta potencia se demanda a la fuente de energía I (la pila de combustible en el caso de este proyecto) y cuanta se le demanda o se envía a la fuente de energía II (las baterías en el caso de este proyecto). Este reparto se hace de acuerdo a unas restricciones y a unos objetivos de control. Por ejemplo, considerando que la potencia demandada al vehículo puede dividirse entre una parte estática (potencia media) y una parte dinámica (aceleraciones y frenadas), el controlador podría decidir demandar a la fuente de energía I la parte estática, haciendo operar a este

dispositivo con el mejor rendimiento posible, y la parte dinámica a las baterías. Véase la siguiente figura.

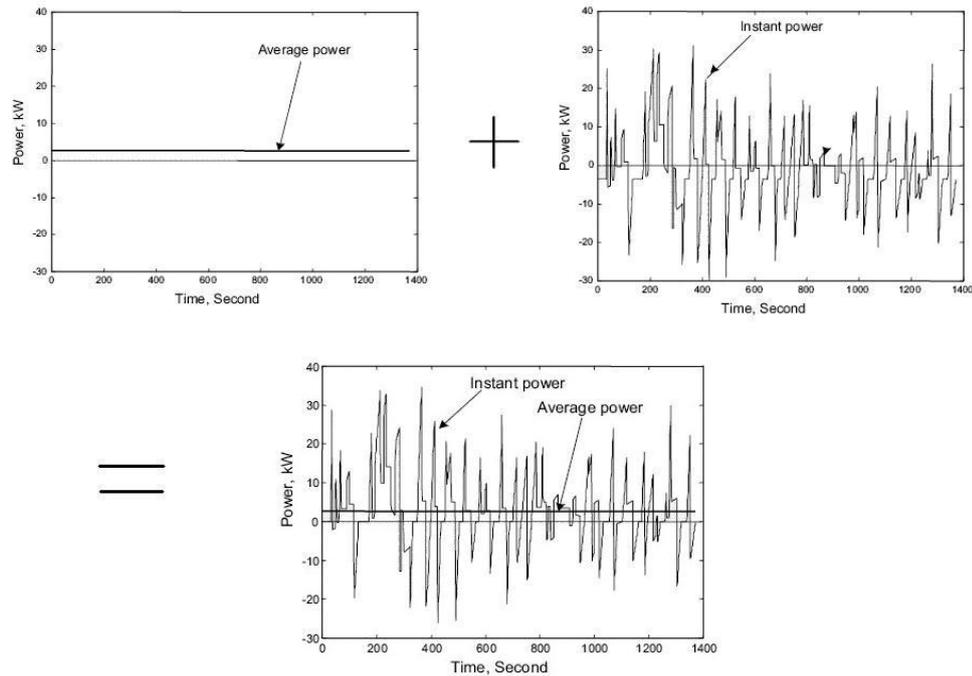


Figura 2.2: Reparto potencia: parte estática y parte dinámica

2.6. Tipos de vehículos híbridos

De forma natural, tras la breve explicación anterior sobre cómo se reparte la potencia en un vehículo híbrido, es necesario hablar sobre las dos configuraciones principales de sistemas híbridos: serie y paralelo. A continuación se presentan las dos con sus propiedades más características, ilustrando un ejemplo de vehículo híbrido con motor de combustión. Adicionalmente se comentan algunas características sobre una novedosa configuración llamada “power-split”.

2.6.1. Configuración serie

Esta configuración emplea tan sólo el motor eléctrico para propulsar el coche, es decir, el motor de combustión con un generador de energía eléctrica acoplado, o la pila de combustible, no se encarga de mover el coche directamente, sino que se encargan de proveer de energía eléctrica a las baterías para cargarlas o de proveer al motor eléctrico de potencia eléctrica. A continuación se muestra un esquema de un vehículo híbrido serie con motor de combustión.

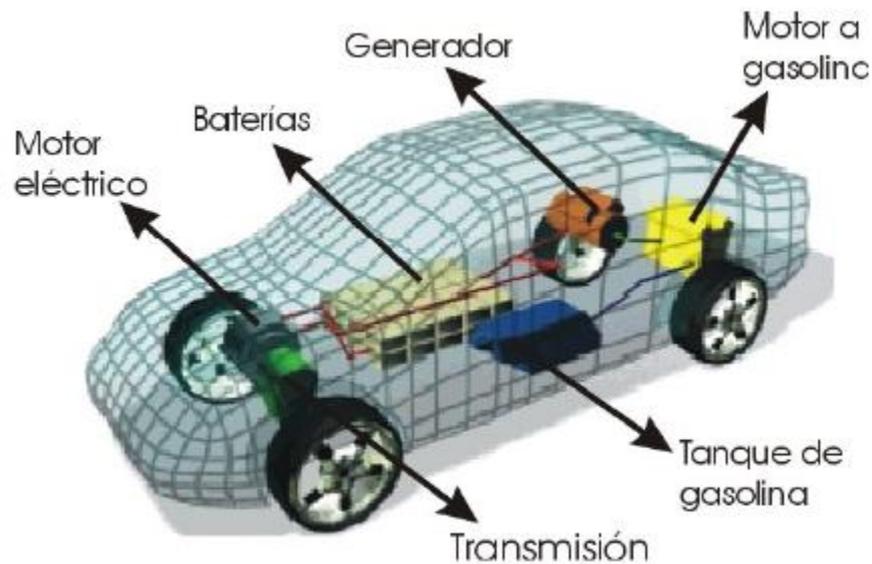


Figura 2.3: Vehículo híbrido con configuración serie

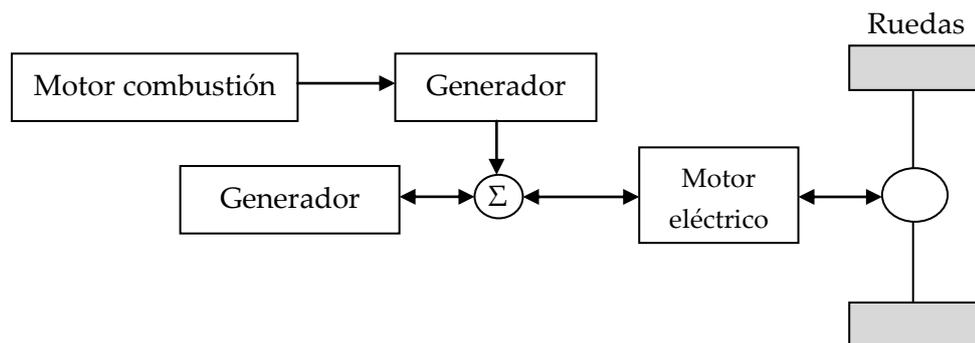


Figura 2.4: Esquema de la configuración serie

2.6.2. Configuración paralelo

En esta configuración tanto el motor eléctrico como el motor de combustión pueden mover la transmisión al mismo tiempo, ya que están conectados a ella independientemente. Ambos pueden estar suministrando potencia simultáneamente o por separado. Normalmente, el motor térmico puede estar apagado en vacío y el motor eléctrico puede ser usado como apoyo en aceleraciones y, en general, en demandas de potencia alta. Ambos motores pueden ser diseñados, por esto, para tan solo una fracción de la máxima potencia que en realidad vamos a obtener. A continuación se muestra un esquema de un vehículo híbrido paralelo con motor de combustión.

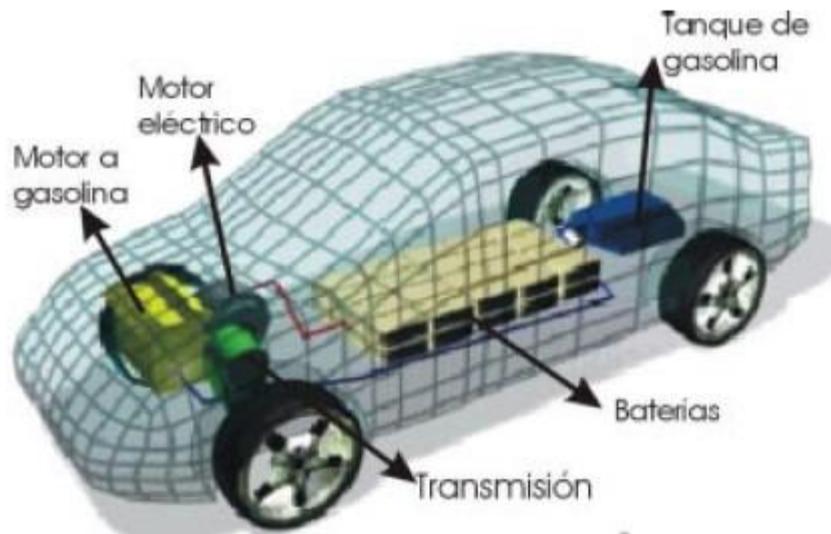


Figura 2.5: Vehículo híbrido con configuración paralelo

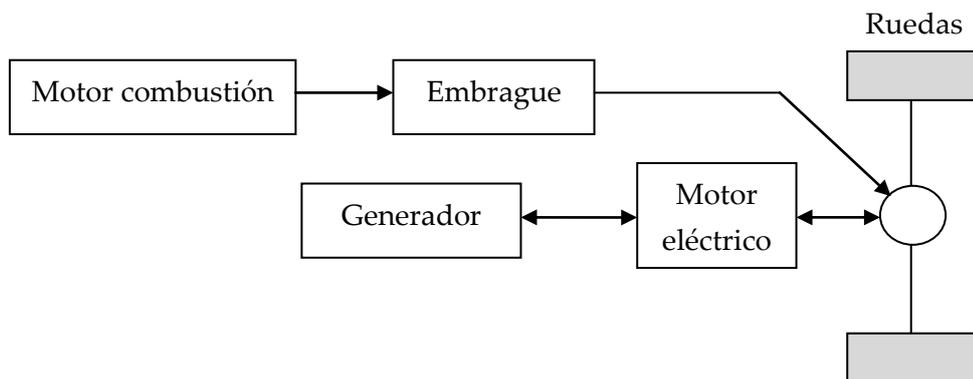


Figura 2.6: Esquema de la configuración paralelo

2.6.3. Configuración Power-Split

Ésta es una configuración novedosa que se está empezando a utilizar en estos últimos años para vehículos híbridos con motor de combustión. Esta configuración combina las ventajas de las configuraciones serie y paralelo.

Consiste en que la potencia que el sistema de potencia proporciona al vehículo, puede ser entregada por ambos flujos de potencia: el mecánico y el eléctrico. Para ilustrar estos conceptos se presenta la figura 2.7 a continuación. Como puede verse en la figura, un cambio planetario acopla las velocidades de giro del motor de combustión y del motor/generador, y un acoplador de par interrelaciona las potencias del motor de combustión y del motor/generador, para finalmente entregarla a la transmisión que mueve el vehículo [41].

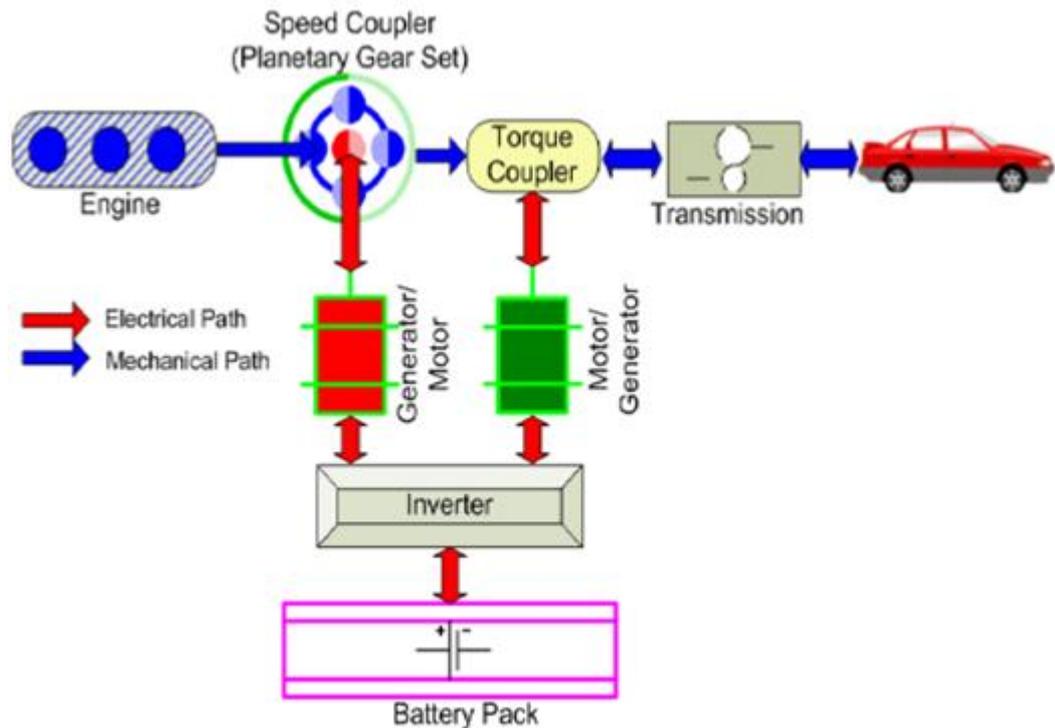


Figura 2.7: Esquema de la configuración "power-split"

2.6.4. Comparación entre las distintas configuraciones

El híbrido serie se puede ver como un vehículo eléctrico equipado, además, de un generador adicional. El paralelo sin embargo se puede considerar como un vehículo convencional apoyado por un motor eléctrico. Es por esto que el híbrido paralelo es considerado como un eslabón en la transición hacia el híbrido serie. El menor coste y la posibilidad de utilizar las tecnologías de fabricación existentes hacen al paralelo la elección más fácil, aunque necesita de sistemas de control complejos para alcanzar las condiciones óptimas de operación.

A continuación se enumeran algunas de las ventajas e inconvenientes de cada configuración.

Configuración Serie:

- El motor térmico no trabaja nunca en vacío, reduciendo así las emisiones contaminantes.
- El grupo motor-generador trabaja en el punto de funcionamiento para el que ha sido diseñado, lográndose un alto rendimiento.
- Se permite mayor variedad de emplazamientos del grupo motor-generador, y del motor eléctrico, ya que no es necesaria una transmisión mecánica del motor térmico a las ruedas.

- En algunos casos podemos evitar el uso de la transmisión del motor eléctrico a las ruedas, eliminando así una de las causas de pérdida de eficiencia.

Configuración Paralelo:

- Más potencia, debido a que ambos motores pueden estar propulsando a las ruedas simultáneamente.
- No se necesita un generador, consiguiéndose un ahorro de coste y espacio en este sentido.
- La potencia del motor va directamente transmitida a las ruedas (menos pérdidas).

Configuración Power-Split:

- La principal ventaja que aporta esta configuración es el grado de libertad que se tiene a la hora de operar con la potencia de las baterías o con la velocidad y el par del motor de combustión.
- La principal desventaja es la mayor complejidad mecánica y de control que implica.
- Como comentario final, decir que esta configuración es, evidentemente, sólo utilizable para vehículos híbridos con motor de combustión, y no para híbridos con pila de combustible.

2.7. Ventajas e inconvenientes de los vehículos híbridos

La combinación de una fuente de energía principal basada en un combustible (ya sea en la gasolina para un motor de combustión, o en el hidrógeno para una pila de combustible) que opere siempre con un buen rendimiento, y la utilización de otra fuente de energía bidireccional, como las baterías, capaces de recuperar energía en el frenado (especialmente útil en ciudad), hace que éstos vehículos alcancen mejores rendimientos que los vehículos convencionales, así como una menor contaminación.

Además, al contrario que los vehículos puramente eléctricos, no existe el problema de la baja autonomía de éstos, debido a que la única fuente de energía sean las baterías.

A continuación se listan algunas de las principales ventajas y desventajas de los vehículos eléctricos híbridos.

Ventajas:

- El motor eléctrico provoca menos ruido que un térmico.
- El motor eléctrico ofrece más par y más elasticidad que un motor convencional.
- El motor eléctrico proporciona una respuesta más inmediata.
- Recuperación de energía en deceleraciones.
- Mayor autonomía que un eléctrico simple.
- Mayor suavidad y facilidad de uso.
- Recarga más rápida que un eléctrico (lo que se tarde en llenar el depósito).
- Mejor funcionamiento en recorridos cortos.
- Consumo muy inferior. Puede conseguirse ahorros de combustible de hasta un 13%.
- En recorridos cortos puede funcionar tan sólo utilizando las baterías, disminuyendo el desgaste de la otra fuente de energía.
- Puede utilizarse un motor térmico, en caso de híbrido con motor de combustión, de menor tamaño. No se necesita un motor más potente del necesario por si hace falta esa potencia en algunos momentos, porque el motor eléctrico suple la potencia extra requerida. Esto ayuda además a que el motor no sufra algunos problemas de infrautilización como el picado de bielas.
- Instalación eléctrica más potente y versátil. Es muy difícil que se quede sin batería, por dejarse algo encendido. La potencia eléctrica extra también sirve para usar algunos equipamientos, como el aire acondicionado, sin consumir combustible.

Desventajas:

- Mayor peso que un vehículo convencional (hay que sumar el motor eléctrico y las baterías).
- Mayor complejidad de diseño, y por tanto mayor probabilidad de avería.
- Por el momento mayor precio que un vehículo convencional de similares prestaciones.

2.8. Vehículos híbridos con pila de combustible

Un vehículo híbrido con pila de combustible funciona de manera análoga a un híbrido con motor de combustión interna, siendo la principal diferencia que el híbrido con pila de combustible utiliza como fuente principal de potencia el hidrógeno, que se convierte en electricidad a través de la pila de combustible para, junto con las baterías, alimentar un motor eléctrico. El subproducto principal del consumo de hidrógeno en estos vehículos es el agua.

Algunos ejemplos de éste tipo de vehículos en desarrollo, serían los siguientes:

2.8.1. Toyota FC Stack

El fabricante japonés de automóviles Toyota ha desarrollado un nuevo vehículo que monta una nueva generación de tecnología híbrida de pila de combustible, denominada Toyota FC Stack, y que ha recibido recientemente la certificación del Ministerio japonés de Transportes.

El vehículo tiene una autonomía de hasta 830 km, alcanza una velocidad máxima de 155 km/h y su motor desarrolla una potencia de hasta 122 caballos. [35]

Puede verse una fotografía del vehículo en la figura 2.7:



Figura 2.7: Toyota FC Stack

2.8.2. Mercedes-Benz Necar 5

El Mercedes-Benz Necar 5 es un prototipo de automóvil desarrollado por el fabricante alemán Mercedes-Benz en el año 2000. Funciona con una celda de combustible, cuyo hidrógeno se obtiene a partir de metanol almacenado en un tanque. El metanol se mantiene en estado líquido a temperatura ambiente, así que se puede manipular y distribuir de forma similar que los combustibles habituales como la gasolina o el gasóleo.

El Necar 5 alcanza una velocidad máxima de 150 km/h y tiene una autonomía de 450 km. [36]

Puede verse una fotografía del vehículo en la figura 2.8:



Figura 2.8: Mercedes-Benz Necar 5

2.8.3. GM HY-WIRE

Se llama Hy-wire y su carrocería ha sido diseñada por Bertone. Aún faltan algunos años hasta que se comercialice. Es el primer automóvil desarrollado a partir del vehículo Autonomy que General Motors presentó en Detroit a principios del 2003. La principal novedad que aporta es la conducción “by-wire”, es decir, por cable, sin conexiones mecánicas entre la carrocería y el chasis. Su motor eléctrico funciona alimentado por una pila de combustible.

Su motor eléctrico desarrolla una potencia máxima de 60 kilowatios, equivalentes a 80 caballos. Tiene tres tanques cilíndricos realizados con fibra de carbono y materiales compuestos para almacenar hidrógeno comprimido a una presión de 350 bares, con una capacidad total de dos kilos, que permite una autonomía de 90 km. La pila de combustible, está formada por 200 células simples

conectadas en serie que trabajan con un voltaje de entre 125 y 200 voltios y a una presión máxima de 2,7 bares. Su potencia continua es de 94 kilowatios. [37]

Puede verse una fotografía del vehículo en la figura 2.9.



Figura 2.9: GM HY-WIRE

2.8.4. General Motors Sequel

El General Motors Sequel es un prototipo monovolumen con combustible de hidrogeno deportivo de la marca estadounidense de automóviles General Motors, que emplea tecnología de última generación HydroGen3 desarrollado por Opel. Tiene una autonomía de 480 kilómetros, y su única emisión es agua. Debutó en el 2005 en el North American International Auto Show y se mostro en la 75ª muestra internacional de automóviles en Ginebra, Suiza.

Este vehículo puede acelerar de 0-60 mph en menos de diez segundos. Además, proporciona un alto nivel de control sobre el terreno accidentado, la nieve y el hielo. 42 por ciento más de par y la más rápida deceleración de frenado cuando son beneficios adicionales de algunas de las nuevas tecnologías utilizadas en el Sequel. [38]

Puede verse una fotografía del vehículo en la figura 2.10.



Figura 2.10: General Motors Sequel

2.8.5. Open Zafra Hydrogeen3

Aún quedarán un par de años para que salga al mercado, pero ya se especula sobre las plantas que se encargarán de su montaje. La factoría de Opel en Figueruelas (Zaragoza) podría ser una de ellas.

El potente motor asíncrono trifásico que incorpora es capaz de proporcionar una elevada dosis de par desde los inicios del giro hasta las 12.000 rpm que es capaz de suministrar. Funciona de forma similar a un motor Diesel de unos 100 CV de potencia. [39]

Puede verse una fotografía del vehículo en la figura 2.11.



Figura 2.11: Open Zafra Hydrogeen3

2.8.6. FCX Clarity de Honda

Se llama FCX Clarity y Honda comenzará a comercializarlo el próximo mes de julio como el primer vehículo de hidrógeno con cero emisiones a la atmósfera. El coche, de cuatro plazas, funciona con una pila de combustible y de su tubo de escape sólo sale vapor.

Honda no pondrá el vehículo a la venta, sino que lo alquilará. El precio será, para un arrendamiento de tres años, de unos 600 dólares mensuales (390 euros). Aunque la cifra no parece excesiva, sólo unos pocos podrán beneficiarse, porque en el horizonte de la compañía japonesa sólo figura la fabricación de 200 de estos vehículos entre 2008 y 2010.

Eso sí, los primeros estarán listos en el próximo mes. Los FCX Clarity comenzarán a rodar por las carreteras del sureste de California (EE UU) en julio y, antes de finales de año, Honda espera comercializarlos también en Japón.

El motivo de su tímida expansión geográfica hay que buscarlo en la escasez de estaciones de repostaje de hidrógeno. Cuestión de hábitat: el FCX Clarity necesita hidrógeno para alimentar su pila de combustible y que ésta produzca electricidad. Por eso Honda ha buscado una zona bien abastecida de gasolineras de hidrógeno, como el sureste de California, para iniciar la comercialización de su coche de emisiones cero. [40]

Puede verse una fotografía del vehículo en la figura 2.12.



Figura 2.12: FCX Clarity de Honda

2.9. Sistemas de control

El sistema de control de potencia de un vehículo híbrido es un algoritmo de control que va programado en un ordenador de a bordo del vehículo, constituyendo lo que se conoce como “controlador supervisor”. Este algoritmo de control se encarga de decidir cómo operar los dispositivos de potencia del vehículo, demandándoles más o menos potencia, o haciéndolos funcionar en modo de descarga o de carga (caso de las baterías), para producir como resultado el par deseado. Así mismo, el controlador supervisor ha de operar estos dispositivos de potencia considerando ciertas restricciones de operación, ya sea por motivos de seguridad o por motivos de eficiencia.

El sistema de control tiene los siguientes objetivos:

- Satisfacer la potencia de tracción demandada por el conductor.
- Minimizar el consumo de combustible.
- Velar porque se operen los dispositivos de potencia dentro de unas restricciones.

El diseño y la simulación de estrategias de control, en el caso de un vehículo híbrido con pila de combustible, es el objeto de este proyecto, por lo que se explicarán brevemente los algoritmos de control más usados actualmente en el apartado 3 “Estado del arte”, y se detallará el diseño de dos estrategias de control en los apartados 5 y 6.