

VEHÍCULOS CON PILA DE COMBUSTIBLE

JOSÉ M^º LÓPEZ
ÁNGEL MARTÍN
ENRIQUE ALCALÁ
M. NURIA FLORES
VÍCTOR DEL POZO
INSIA

La descarbonización del transporte en general, y del rodado en particular, está demostrando ser uno de los mayores retos de la sociedad de este principio de siglo. El parque mundial de vehículos automóviles en todo el mundo se estima de 1.400 millones [1], satisfaciendo muchas necesidades de movilidad diaria tanto de pasajeros como de mercancías, con el correspondiente impacto medioambiental y de consumo de energía.

TABLA 1
COMPARATIVA EMISIONES GEI EN EL TRANSPORTE
A NIVEL MUNDIAL, EUROPEO Y NACIONAL

Emisión GEI	Mundial [2]	Europa[3]	España[4]
Total	33,5 Gt	4067,1 Mt	314,15 Mt
Transporte	8,3 Gt	956,6 Mt	91,4 Mt
Transporte rodado	6 Gt	904,7 Mt	85,4 Mt

Fuente: Elaboración propia

En este sentido el sector del transporte por carretera tiene que hacer frente a los siguientes retos energéticos y medioambientales:

- Contaminación global: el sector del transporte por carretera contribuye con 18 % de las emisiones de GEI en todo el mundo (6 Gt de CO₂ por año)[2]. Con relación a Europa la contribución es de 904,7 Mt en 2019, lo que supone un

22,3 5 sobre el total y un 25% más con relación a 1990 [3]. Para el caso nacional la contribución del transporte por carretera es de 84,5 Mt, lo que supone un 26,9 % sobre el total y un incremento del 26 % respecto a 1990 [4]. Reducir los GEI se ha convertido en un tema prioritario.

- Contaminación local: las emisiones del tubo de escape son responsables de varias afecciones respiratorias, en particular las partículas y los óxidos de nitrógeno. La concentración de productos contaminantes es muy diferente según el momento y el lugar. Depende de la hora del día, de las condiciones meteorológicas (sobre todo el viento, pero también la temperatura y la humedad) y de la cercanía y cantidad de fuentes de emisión. Por lo tanto no se estará igualmente expuesto a contaminación en una ciudad que el campo, y no será lo mismo un día de verano sin viento que uno de invierno con viento. Los gases contaminantes que se tienen en cuenta son, principalmente, el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos

TABLA 2
COMPARATIVA DE CONSUMO FINAL DE ENERGÍA ENTRE DISTINTOS MODOS DE TRANSPORTE

Modo de transporte	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Ferrovioario	15.796	16.128	16.267	15.832	15.527	15.840
Aéreo	32.851	32.637	33.999	36.690	38.470	41.561
Marítimo*	21.181	13.487	17.893	25.281	40.039	41.303
Carretera total	1.059.496	1.074.714	1.111.907	1.145.297	1.170.339	1.196.381
Carretera urbana**	362.987	372.063	378.352	389.664	392.067	403.872
Carretera no urbana	696.509	702.651	733.555	755.633	778.272	792.509
Carretera no urbana - pasajeros	411.683	409.112	424.196	441.600	433.937	442.597
Carretera no urbana - mercancías	284.826	293.539	309.359	314.034	344.335	349.912
Total transporte nacional	1.129.323	1.136.966	1.180.066	1.223.101	1.264.375	1.295.085

* Los datos del modo marítimo adolecen de falta de consistencia entre los metodologías de estimación del consumo energético, debido a la incertidumbre en el cálculo de los consumos del tráfico internacional y a la dificultad en el cálculo de los tráficos nacionales por la ubicación geográfica de España en relación con el tráfico marítimo en el mar Mediterráneo y a través del estrecho de Gibraltar.

** Los datos de la pauta urbana se estiman como el complemento del resto de pautas, debido a la ausencia de datos agregados a escala nacional de tráficos en ámbitos urbanos.

Fuente: Sistema Español de Inventario y Proyecciones de Emisiones a la Atmósfera de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) y el informe «Los Transportes y las Infraestructuras» (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana).

de nitrógeno (NO y NO₂), los compuestos orgánicos inquemados (HC, en forma de partículas o volátiles: COV) y en menor medida el monóxido de carbono (CO) y otros. También se enmarcan en este tipo las partículas en suspensión (aerosoles) principalmente de carbono, plomo, sulfatos y componentes inorgánicos del polvo atmosférico. Este nivel es el que se ha tenido en cuenta a la hora de establecer las reglamentaciones para los automóviles en Europa y EE.UU, pensando fundamentalmente en las grandes urbes porque en el año 1984 había en el mundo 34 ciudades de más de 5 millones de habitantes, pero las previsiones de las Naciones Unidas para el año 2025 sitúan este número en 93. Los automóviles contribuyen a la contaminación del aire por sus emisiones por el tubo de escape (CO, COV, NOX y partículas), por sus emisiones de evaporación (muy pequeñas actualmente), por las partículas desprendidas del desgaste de frenos y neumáticas (igual en vehículos eléctricos) y por el levantamiento de polvo del suelo por los efectos aerodinámicos al circular. En este sentido, la normativa euro 6 que regula las emisiones contaminantes de los turismos y vehículos comerciales ligeros, ha contribuido mucho a la reducción de estos contaminantes. El incremento del número de habitantes en las grandes urbes podría complicar más la calidad del aire de las ciudades, como consecuencia de un aumento sustancial de la movilidad

- Aseguramiento del suministro. Tanto en la Unión Europea como en España el transporte es el sector con mayor consumo energético, con un 31 % de la energía final consumida en los países de la UE-28, y un porcentaje aún mayor en España, donde en 2018 se alcanzó una participación del 39,7%. Esta cuota, más de 8 puntos superior a la media europea, está condicionada por la estructura productiva de nuestra economía, con un

sector con un peso relevante de la automoción y un sector servicios con un peso importante -que incluye el turismo con una partición del 12,3% del Producto Interior Bruto en 2018 [5]. Los datos de consumo de energía final en el transporte indican que el modo que más peso tiene con gran diferencia es la carretera, responsable de más del 92% del consumo de energía final en el sector en 2018. El consumo total de este modo durante 2018 fue de 1.196.381 TJ, frente a los 1.295.085 TJ que componen el total del transporte nacional. La dependencia tan fuerte del sector transporte con relación al petróleo (94% aproximadamente, el resto son biocombustibles) y considerando que las reservas de petróleo están concentradas en regiones políticamente inestables [6], es necesario, por tanto, reducir el porcentaje de consumo de los combustibles fósiles para el transporte.

Las sociedades avanzadas, mostrando cada vez mayor preocupación por los problemas medioambientales a escalas local y global, y demandando un uso mayor de energías limpias, afrontan retos y conflictos de gran importancia, en diferentes ámbitos. En relación con la movilidad, que es un factor fuertemente relacionado con el desarrollo económico y social y, a la vez, generadora de impactos medioambientales que deben reducirse, el problema se plantea en términos de adoptar soluciones compatibles con un desarrollo sostenible, lo cual implica la sustitución de los vehículos actuales, de forma progresiva, y lo más rápida posible, por otros de emisiones nulas o muy reducidas y el uso de energías limpias.

La demanda cada vez mayor de la movilidad personal y de mercancías y casi total dependencia de los hidrocarburos líquidos significa que la reducción de emisiones de este sector será particularmente difícil. Por lo tanto, las tecnologías bajas en carbono están avanzando rápidamente, con vehículos híbridos y en-

chufables, vehículos eléctricos de batería y vehículos de pila de combustible alimentados con hidrógeno. En este sentido, el hidrógeno y la electricidad se consideran como los combustibles del transporte sostenible del futuro.

En las próximas décadas, se espera que la tecnología de pilas de combustible se convierta en una solución técnico-económica viable para aplicaciones. Aunque hay varios tipos de pila de combustible disponibles para su uso en sistemas vehiculares, se ha encontrado que la de membrana de intercambio de protones (PEMFC) es la mejor candidata, ya que tiene una alta densidad de potencia con temperaturas de funcionamiento más bajas en comparación con los otros tipos. Un sistema de pila de combustible autónomo integrado en un tren propulsor de un automóvil no siempre es suficiente para satisfacer las demandas de carga del vehículo. Aunque los sistemas de pila de combustible muestran una buena capacidad de potencia durante el funcionamiento en condiciones estables, la respuesta de las pilas de combustible durante las demandas de potencia pico transitorias e instantáneas es relativamente pobre. En consecuencia, el alto costo y la lenta dinámica de los sistemas de pila de combustible son los principales desafíos para la comercialización de este tipo de vehículos.

Para superar estos desafíos, el sistema de pila de combustible debe hibridarse con uno o varios sistemas de almacenamiento de energía (como la batería y/o el ultracondensador) para satisfacer la demanda total de energía-potencia del vehículo y mejorar el rendimiento. Es necesario, asimismo, incrementar los activos de investigación en otras aplicaciones del transporte por carretera como los vehículos pesados y comerciales ligeros, para ir incrementando el conocimiento de la operabilidad de la pila de combustible integrada en configuraciones más complejas sometida a ciclos de conducción, muchos de ellos muy transitorios con arranque y paradas frecuentes y condiciones climáticas adversas.

La Unión Europea, junto a otros países, ha emprendido acciones encaminadas a resolver en el medio plazo este conflicto, de la manera más satisfactoria posible. En diciembre de 2019, la Comisión Europea (EC) presentó el Pacto Verde Europeo (European Green Deal) como la nueva estrategia europea de crecimiento que establece una agenda clara para hacer de Europa hacia el 2050 el primer continente climáticamente neutro del mundo. Esta transformación fundamental de la economía europea en una economía verde y competitiva requiere cambios fundamentales y tecnologías innovadoras. Así, se identificó el hidrógeno limpio como un área prioritaria en la que la UE necesita de recursos para desarrollar estas tecnologías y aplicaciones comerciales.

En el futuro, a corto y medio plazo, se impone la descarbonización del transporte de la manera más rápida posible, lo cual exige la electrificación de los vehículos automóviles, en diferentes niveles, tanto ligeros como

pesados, en la medida de lo posible, y el uso de nuevos combustibles, como los e-fuels, el hidrógeno verde y de energías limpias renovables.

SISTEMAS Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN

El transporte es el sector con mayor consumo energético en la Unión Europea, con un 31 % de la energía final consumida. Este porcentaje es aún mayor en España con un 39,7% [5]. Este alto porcentaje genera determinadas externalidades ambientales negativas relativamente importantes, concretamente emisiones contaminantes y emisiones de gases de efecto invernadero-GEI ($\text{CO}_{2,\text{equivalente}}$) que precisan de medidas concretas que hagan que el futuro del transporte, y en especial el de carretera, sea sostenible para el medio ambiente y seguro para sus usuarios.

Sin duda alguna, la gasolina y el gasóleo son los combustibles más utilizados para el transporte por carretera a nivel mundial. Por su carácter de líquidos, son fácilmente manejables y almacenables a bordo del vehículo a presión ambiente, además de que ese estado facilita también la dosificación de la mezcla aire-combustible. Su densidad energética (poder calorífico por unidad de masa o de volumen) es elevada.

Como alternativa a estos combustibles convencionales, existen otros que, aunque no sustitutos, están siendo utilizados bien de forma individual (Gas Natural, GLP, electricidad e hidrógeno) o mezclados (bioetanol y biodiésel).

Los combustibles alternativos son aquellos que pueden reemplazar parcial o totalmente a los combustibles convencionales (gasolina y gasóleo) y que ofrecen un beneficio potencial sobre las emisiones locales y de efecto invernadero. Aunque algunos de los combustibles alternativos se pueden utilizar en el interior de un motor convencional sin cambios significativos, su utilización ofrece un mayor potencial en la reducción de las emisiones contaminantes si se emplean en los nuevos sistemas de propulsión.

El GLP (Gas Licuado del Petróleo) es una mezcla de propano y butano, con pequeñas proporciones de otros hidrocarburos que pueden manejarse como líquidos a temperatura ambiente a presiones moderadas (inferiores a 15 bar). Su estado líquido supone una densidad energética elevada, así como facilidad de trasiego y repostaje. Su empleo como combustible para motores de encendido provocado - MEP (tipo gasolina) presenta características intermedias entre la gasolina y el gas natural. Desde el punto de vista de las emisiones de CO_2 , su contenido en hidrógeno también intermedio entre la gasolina y el gas natural genera emisiones también intermedias.

El Gas Natural es una mezcla de gases siendo el metano el constituyente principal. Como combustible para motores de encendido provocado (MEP) presenta algunas ventajas frente a los combustibles convencionales debido a su estado gaseoso que facilita la mez-

cla con aire, su alto número de octano (que posibilita un aumento de la relación de compresión), su mayor velocidad de combustión y su reducido contenido en azufre. Además el mayor contenido en hidrógeno conlleva un menor factor de emisión de CO₂ en su combustión que el de la gasolina. El estado gaseoso a presión y temperatura ambiente supone una menor densidad energética, que requiere la necesidad de comprimirlo el hasta unos 250 bar, almacenándose en depósitos a presión en el vehículo (GNC), o bien licuarlo por debajo de -162°C (GNL), en cuyo caso el almacenamiento a bordo es en depósitos criogénicos. Tanto la compresión como la licuefacción suponen un mayor consumo energético, con las correspondientes emisiones de CO₂ en esta etapa.

Los biocombustibles son combustibles de origen renovable obtenidos a partir de biomasa de origen vegetal, animal o residual, si bien tras su obtención se pueden realizar diversas transformaciones que mejoran sus propiedades como combustible para motores. Existen dos tipos principales de biocombustibles: el bioetanol y el biodiésel. En ambos casos, se trata de hidrocarburos con un importante contenido en oxígeno, que se mezclan bien con la gasolina (aproximadamente en un 5%) lo que supone ventajas para aumentar el número de octano (MEP) o bien con gasóleo (máximo un 7%) lo que conduce a una reducción de emisiones de partículas (MEC). Su contenido renovable es variable, debido al empleo de componentes derivados del petróleo en su transformación para mejorar sus propiedades como combustible para motores. Desde el punto de vista de las emisiones de CO₂, si el contenido de los biocombustibles fuera totalmente renovable, el CO₂ producido en la combustión no se tendría en cuenta como emisión neta. Sin embargo, la parte no renovable de la composición del biocombustible o la energía necesaria para su procesado genera unas ciertas emisiones que deben ser tenidas en cuenta.

La electricidad es, en sí, un vector energético, muy extendido en la actualidad tanto en su transporte y distribución como en su infraestructura. Un aspecto importante es la procedencia en la producción de la misma. Si se produce vía centrales térmicas o ciclos combinados, tiene un impacto ciertamente negativo respecto a las emisiones de CO₂. Si su generación es vía renovable (eólica, hidráulica, solar) esta emisión sería cero. Como se puede intuir, las emisiones del vehículo eléctrico en el punto de uso son nulas.

El hidrógeno, al igual que la electricidad, es un vector energético, por lo que dependiendo de su producción, podría tener o bien un impacto muy negativo respecto a las emisiones de CO₂ (reformado de gas natural) o nulo si se obtuviera vía electrólisis mediante energía renovable. El hidrógeno posee un contenido energético por unidad de peso mayor que el de ningún combustible y, sin embargo, su contenido energético por unidad de volumen es el de los más pequeños, dada su extremadamente baja densidad. De aquí la necesidad de almacenarlo en estados físicos más condensados a fin de disponer de relaciones

razonables entre la energía almacenada y el volumen y/o peso del sistema de confinamiento. En este sentido los principales desafíos proceden de las aplicaciones en el transporte donde es esencial poder disponer de hidrógeno almacenado con elevada densidad energética. La opción más extendida es su almacenamiento en depósitos a 700 bar. Del mismo modo que el vehículo eléctrico, las emisiones del vehículo de pila de combustible, utilizando hidrógeno como combustible, en el punto de uso son nulas.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE COMBUSTIBLES Y TRENES DE PROPULSIÓN (ANÁLISIS WELL TO WHEEL) ↓

El análisis del pozo a la rueda (WtW: well to wheel) es considerado, en la actualidad, la base esencial para evaluar el impacto futuro de los sistemas de propulsión y de los combustibles. Sin embargo, la implementación en el futuro de las tecnologías y combustibles no está determinada sólo por este factor. Otros factores, tales como el coste, la infraestructura, las reservas energéticas, las tecnologías complementarias y el potencial de suministro, tienen también, una influencia determinante. En el futuro, será necesario encontrar la combinación óptima vehículo-combustible de acuerdo con las circunstancias energéticas, la disponibilidad de infraestructura y los reglamentos que apliquen en cada región o país.

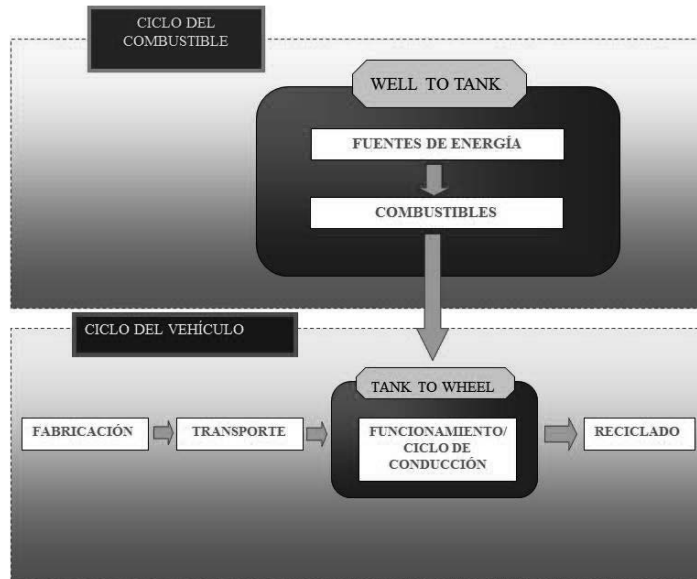
Mientras llega la previsible puesta en el mercado de los vehículos con pila de combustible, el abanico de elección de sistemas de propulsión está incrementándose, al igual que la diversificación de los combustibles. Con este panorama, se hace necesario establecer los criterios necesarios para considerar el potencial de las diferentes tecnologías y combustibles con relación a su impacto medioambiental.

En concreto, deben abordarse estudios de investigación con relación a los caminos de producción de los combustibles potencialmente válidos para los vehículos automóviles con las futuras tecnologías, desarrollando métodos de cálculo que permitan evaluar las energías involucradas, las emisiones de gases de efecto invernadero y el rendimiento energético de los caminos marcados desde el pozo hasta la rueda.

El ciclo de vida de un automóvil consta del ciclo de combustible (extracción, producción y distribución), del ciclo del automóvil (fabricación, funcionamiento/mantenimiento y reciclado) y otros relacionados con la infraestructura (ver figura 1). En particular, son de especial interés los cálculos relacionados con las energías involucradas y las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo del combustible (WtT: well to tank), así como la parte correspondiente al funcionamiento del vehículo a través de un determinado ciclo de conducción estandarizado (TtW: tank to wheel), dentro del ciclo del vehículo automóvil.

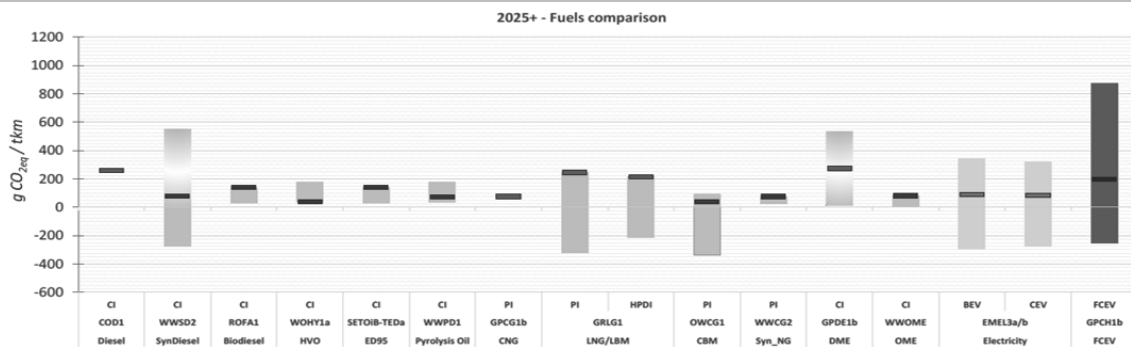
La energía total utilizada en el WtW (Well to Wheel) se calcula multiplicando los requerimientos de energía del WtT por el consumo de combustible del vehículo y sumárselos a los obtenidos en el TtW. Aquí, los requere-

FIGURA 1
ESQUEMA DEL CICLO DE VIDA DE UN VEHÍCULO



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 2
ESTUDIO COMPARATIVO WTW CON RELACIÓN AL IMPACTO GEI [7]



Fuente: JEC Well to Wheel report v5. [7]

rimientos de energía del combustible suministrado incluye el poder calorífico inferior del combustible disponible en el tanque.

Las emisiones de GEI se obtienen del contenido de carbono en el combustible utilizado en el vehículo, y del consumo de combustible y de las emisiones de CH_4 y de N_2O generadas durante la combustión a bordo del vehículo. Las emisiones totales de GEI se calculan multiplicando las emisiones del WtT en gramos por MJ por el consumo de energía del vehículo en MJ por km, que se suman a las emisiones del TtW en gramos por km.

En la figura 2 se puede observar a modo de ejemplo una comparativa de diferentes combustibles y trenes de propulsión en un análisis WtW.

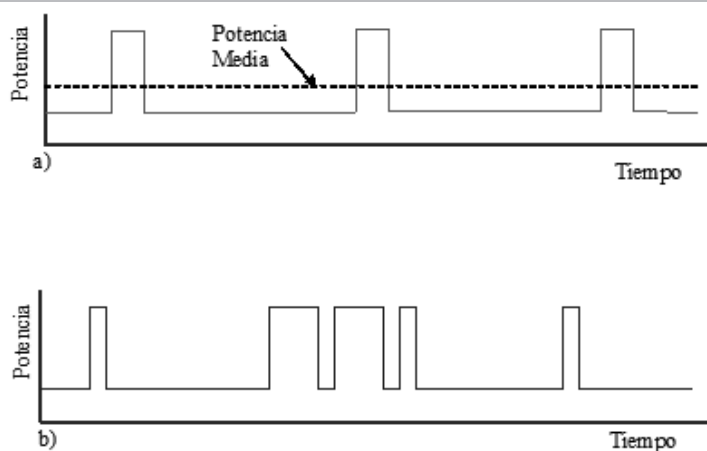
Como se puede observar, casi todos los combustibles alternativos analizados ofrecen un mejor rendimiento WtW que la gasolina o el gasóleo cuando se utiliza en

vehículos convencionales propulsados por un motor de combustión interna alternativo. Algunas excepciones están presentes, como la gasificación de carbón para producir diésel sintético. La electricidad y el hidrógeno tienen el potencial de ofrecer bajas emisiones de CO_2 comparables con la de los biocombustibles líquidos/gaseosos. El uso de electricidad renovable para los VE y los VHPC ofrecen los valores más bajos de CO_2 en el WtW similares al uso de biometano y el syndiesel (e-fuel) para vehículos convencionales.

CONFIGURACIÓN DEL TREN PROPULSOR CON PILA DE COMBUSTIBLE ↓

Los vehículos con pila de combustible se pueden clasificar en vehículos puros de pila de combustible (full power) y en vehículos híbridos (hybrid fuel cell). Un vehículo puro de pila de combustible, utiliza ésta como única fuente de potencia sin el empleo de baterías.

FIGURA 3
GRÁFICOS POTENCIA/TIEMPO PARA DOS DIFERENTES APLICACIONES ADECUADAS PARA UNA CONFIGURACIÓN HÍBRIDA BATERÍA-PILA DE COMBUSTIBLE



Fuente: Elaboración propia

El sistema de potencia generalmente consta de un inversor para convertir la corriente continua en alterna de frecuencia y tensión variables que alimenta a un motor de alterna que, a través de una transmisión, transmite la potencia a las ruedas del vehículo. Generalmente la potencia de salida de la pila de combustible (PC) es satisfactoria, pero la regulación de la tensión es pobre y su respuesta a requerimientos transitorios de potencia es algo lenta. Para cubrir estos picos de potencia de modo económico sin tener que sobredimensionar las celdas, la pila de combustible se híbrida con baterías y/o ultracondensadores.

Un vehículo híbrido de pila de combustible (VHPC) dispone de una batería y/o ultracondensador en la configuración del tren propulsor. El funcionamiento del VHPC permite un uso más eficiente de la alta densidad de energía de la pila y de la alta densidad de potencia de la batería. Cuando la demanda de potencia es alta, como en una aceleración, las baterías proporcionan la potencia necesaria. Cuando la demanda de potencia es baja, como en condiciones de velocidad crucero, la pila proporciona la potencia. Las baterías se recargarán durante los periodos de baja potencia. Así pues, dependiendo de los requerimientos de potencia y de energía, la pila se podría diseñar bajo el punto de vista de velocidad crucero, y la batería para proporcionar potencias pico. La hibridación completa con baterías y ultracondensadores permite una importante flexibilidad para optimizar el dimensionamiento de los componentes pero, por el contrario, la configuración es más compleja en su control. El VHPC ofrece buen comportamiento, mayor autonomía, rápido repostaje y larga vida. Otras ventajas son las siguientes:

- El vehículo puede arrancar sin necesidad de precalentamiento de la pila.
- El vehículo puede operar en modo puramente eléctrico durante el tiempo en que la pila se lleva a su condición de tensión de salida nominal.

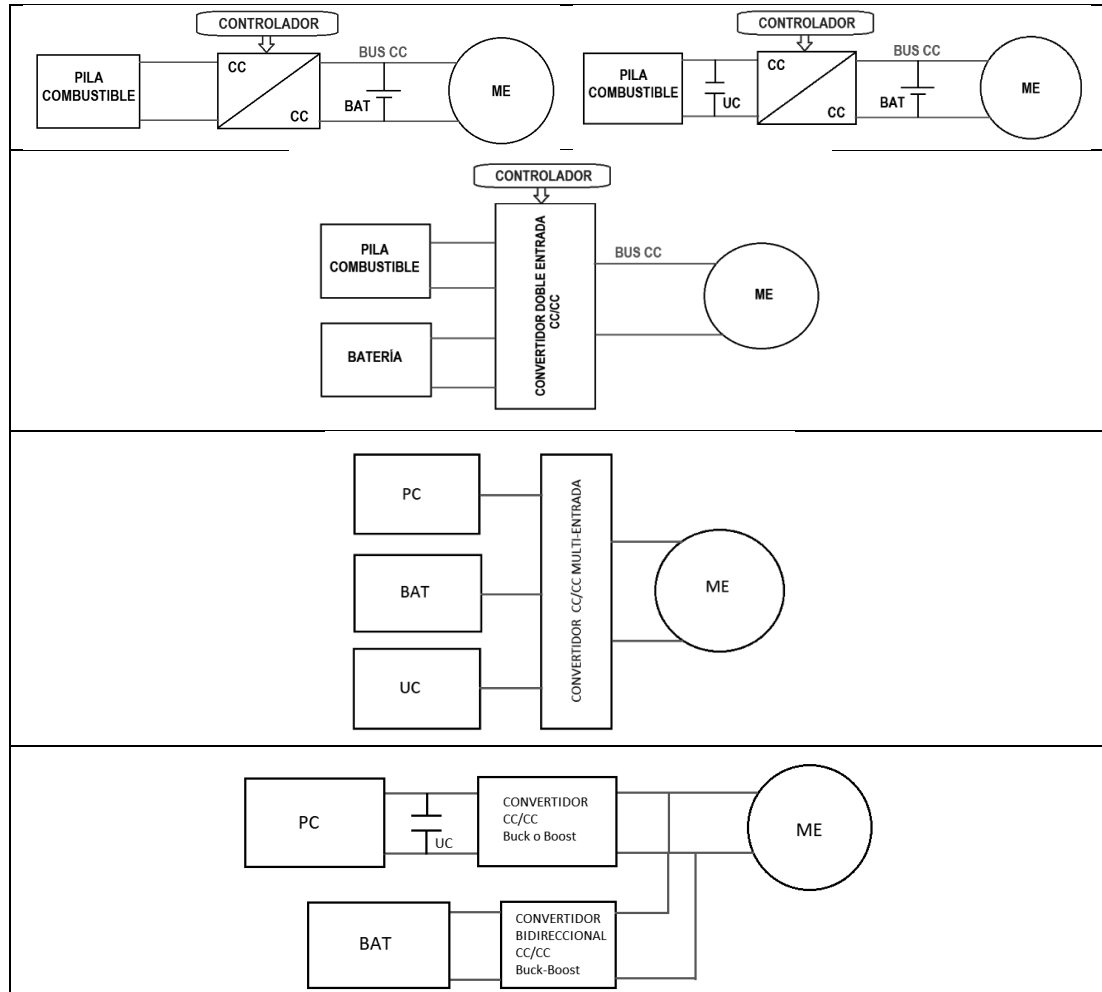
- La respuesta frente a cambios de carga es más rápida.

Los sistemas híbridos más fáciles de diseñar son aquellos en los que los requerimientos de potencia eléctrica son muy variables, pero predecibles. Tal situación se muestra en la figura 3.a. Durante largos periodos de tiempo el dispositivo permanece en modo de espera, y la pila de combustible estará recargando la batería. Durante los periodos transitorios, la batería suministra la mayor parte de la potencia. La pila de combustible trabaja más o menos continuamente en su potencia media y, así, simplifica su especificación. Los requerimientos de la batería son también claros, debe absorber los picos de potencia y ser capaz de recargarse entre periodos de picos de potencia.

En otras ocasiones, además de ser variables los requerimientos de potencia, son impredecibles. Tal situación se muestra en la figura 3.b. Los impulsos de potencia pueden ser de alta frecuencia y mayor duración o de baja frecuencia y menor duración. Podría hacerse funcionar la pila de combustible durante largos periodos a su potencia media, pero se necesitaría una batería de mayor tamaño, ya que podría necesitarse absorber varios picos de potencia sin tiempo para recargarse. También podría ser ventajoso aumentar la potencia de la pila, y trabajar durante largos periodos a una potencia media mayor, y así, recargar la batería más rápidamente.

Existen diversos tipos de configuraciones para diseñar un sistema híbrido con pila de combustible (ver figura 4). En la topología más simple, la salida de la PC se conecta a través de un convertidor CC/CC al bus de continua, donde la PC se puede hibridar con otros dispositivos como baterías o ultracondensadores. El motor eléctrico (ME) se conecta también en paralelo al bus de continua. Un elemento clave en toda configuración híbrida es el controlador, el cual se encarga de la gestión energética del sistema.

FIGURA 4
ESQUEMAS DE CONFIGURACIONES HIBRIDAS CON PILA DE COMBUSTIBLE



Fuente: Elaboración propia

El uso de baterías puede restringir la tensión del bus de continua. En función del número de celdas en serie las baterías tienen definida su tensión de salida. Como resultado la salida del convertidor se tiene que adaptar a dicha tensión. Sin embargo, con el uso de ultracondensadores, los cuales no dependen de la tensión, la salida del convertidor puede ser cualquier tensión que se demande desde el ME. Si el uso de las baterías parece razonable colocarlo detrás del convertidor, los ultracondensadores podrían colocarse entre la pila y el convertidor para estabilizar más el sistema y reducir los picos de intensidad en la PC.

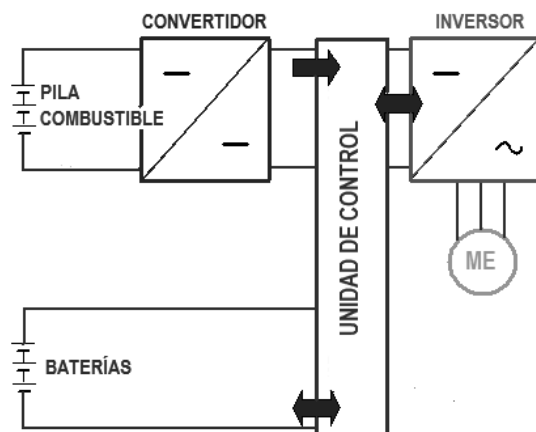
Otra posibilidad sería utilizar un convertidor de doble entrada, donde ambos componentes, batería y pila de combustible se conectan en paralelo para entregar su potencia al ME. Esta disposición permite controlar independientemente cada elemento con el objetivo de facilitar la estrategia de control. Por ejemplo, se puede controlar la batería para mantener la tensión en el bus de continua mientras que, por otro lado, se puede controlar la PC en intensidad para proporcionar la intensidad requerida por el ME. El convertidor de do-

ble entrada también puede ser buck-boost, que posibilita que los niveles de tensión de cada fuente de potencia puedan estar por debajo o por encima del nivel de tensión del bus de continua. La batería podría sustituirse por un ultracondensador pero tendría que modificarse la estrategia de control por tratarse de dos componentes de características diferentes.

Utilizando un convertidor CC/CC de múltiple entrada, podrían acoplarse la PC, la batería y el ultracondensador. Una variante de esta configuración es utilizar varios convertidores. Los convertidores bidireccionales permiten entrar y salir la intensidad del sistema de almacenamiento de energía, lo que posibilita entregar potencia al ME o bien que se carguen a través de otra fuente de potencia o mediante la frenada regenerativa. La estrategia de control en estos dos últimos sistemas es más compleja.

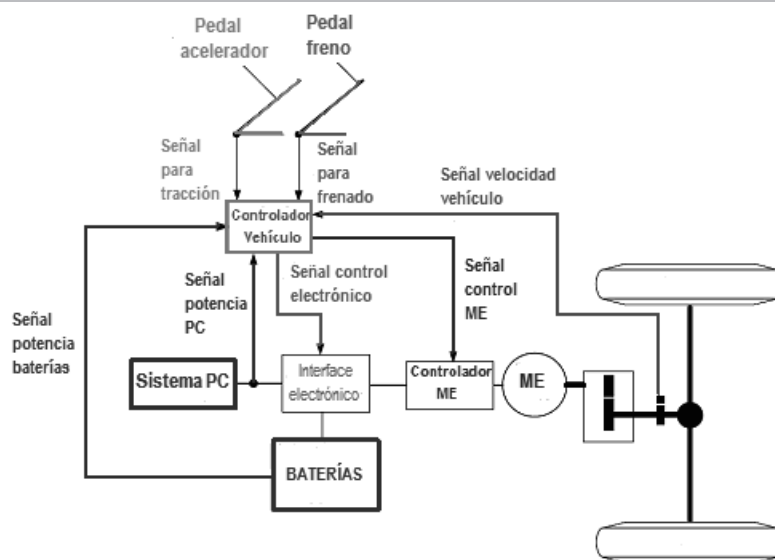
Un tren propulsor con pila de combustible se puede observar en la figura 6. Consta principalmente de una pila de combustible como fuente principal de energía, una batería, un motor eléctrico con su inversor, un con-

FIGURA 5
ESQUEMA DE UNA CONFIGURACIÓN DE ALTO GRADO DE HIBRIDACIÓN BATERÍA-PILA DE COMBUSTIBLE



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 6
CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA PROPULSOR DE UN VEHÍCULO CON PC [8]



Fuente: Eshani, Gao y Emadi (2010) [8]

trolador del vehículo y un acoplamiento eléctrico entre pila y batería.

MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE Y SU GESTIÓN ↓

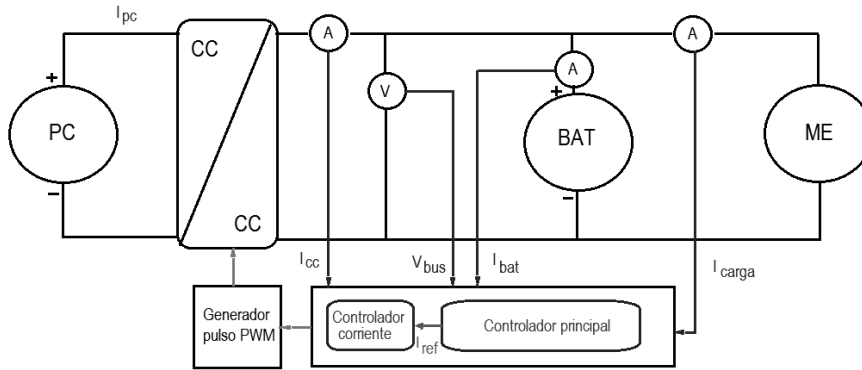
La estrategia de control, que se programa en el controlador del vehículo, consiste en controlar el flujo de potencia entre la PC, las baterías y el tren propulsor. La estrategia de control debería asegurar que:

- La potencia del motor eléctrico corresponda con la demandada.
- El nivel de energía de las baterías siempre se encuentre por encima de un determinado valor.

- El sistema de PC funcione siempre dentro de su zona de óptimo rendimiento.

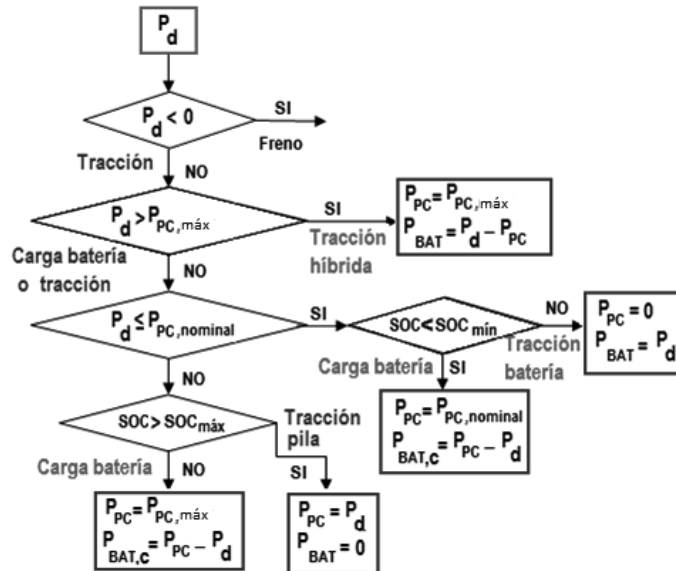
La pila, la batería y el ME conectan en paralelo de manera que ambas fuentes de potencia puedan suministrar potencia al ME. La tensión de la PC varía en un amplio rango dependiendo de la corriente de descarga. Para mantener la tensión constante en el bus de continua, la PC se aísla de la batería y del ME mediante un convertidor CC/CC. Utilizando las medidas de intensidad del ME (I_{cargal}) y la de la batería (I_{bat}) y la tensión del bus de continua (V_{bus}), el controlador principal calcula la intensidad de referencia (I_{ref}), que junto a la intensidad del convertidor servirá para determinar el ciclo de trabajo del convertidor. Para la estrategia de control se utilizan dos controladores: un controlador principal y un controlador de intensidad.

FIGURA 7
ESQUEMA DE UNA CONFIGURACIÓN DE BAJO GRADO DE HIBRIDACIÓN BATERÍA-PILA DE COMBUSTIBLE



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 8
ESQUEMA DE ESTRATEGIA DE CONTROL. PD: POTENCIA DEMANDADA [8]



Fuente: Eshani, Gao y Emadi (2010) [8]

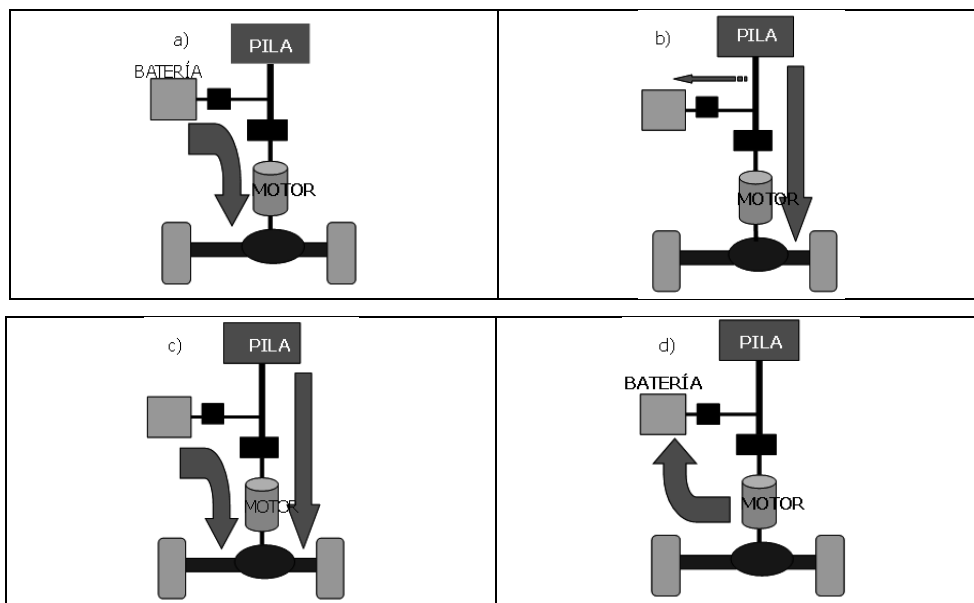
La figura 8 muestra, a modo de ejemplo, el esquema de la estrategia de control de un vehículo con pila de combustible y baterías.

En función de la potencia demandada del conductor, el estado de carga de las baterías y las condiciones de mínimo funcionamiento de la PC, se pueden observar los siguientes modos de operación (figura 9):

- Modo vehículo parado: Ni la PC ni las baterías suministran potencia al tren de tracción. La PC funciona al ralentí, entregando su energía a las baterías.
- Modo frenada regenerativa: La PC funciona al ralentí y las baterías absorben la energía de la frenada regenerativa.
- Modo tracción:

- Tracción híbrida: Si la potencia demandada es mayor que la nominal de la PC, entonces se utiliza el modo de tracción híbrida, en el que la PC funciona en potencia base y las baterías suministran el extra de potencia. La potencia nominal del sistema de PC se podría situar en la línea superior de la región óptima de operación de la PC.
- Carga batería: Si la potencia demandada es menor que la nominal de la PC, y las baterías necesitan cargarse, entonces la PC funciona a su potencia nominal, parte de la misma va hacia la tracción mientras que el resto carga baterías.
- Tracción batería: Sin embargo, si las baterías están cargadas, la PC de combustible traba-

FIGURA 9
MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO DE PILA DE COMBUSTIBLE: A) ARRANQUE, B) VELOCIDAD CRUCERO, C) ACELERACIÓN, D) FRENADA REGENERATIVA



Fuente: Elaboración propia

ja al ralentí y las baterías suministrarían toda la potencia de tracción. En este último caso, la potencia pico que las baterías son capaces de producir es mucho mayor que la potencia demandada de entrada al motor.

- Tracción pila: Si la potencia de carga es mayor que la mínima prefijada y menor que la potencia nominal de la PC y las baterías están cargadas, entonces la PC mueve sola el vehículo. Sin embrago, si las baterías necesitan cargarse, entonces parte de la potencia de la PC va hacia la tracción y la otra hacia las baterías.

CONCLUSIONES ↓

Una reducción importante de los gases de efecto invernadero en el transporte por carretera sólo se podrá alcanzar mediante un incremento significativo del rendimiento de los sistemas de propulsión. A este respecto, los vehículos híbridos, eléctricos y de pila de combustible se posicionan como candidatos prometedores para un sistema de transporte sostenible. Los fabricantes de vehículos prevén una división en el mercado en segmentos optimizados para aplicaciones específicas. En este sentido, los vehículos con pila de combustible presentan una clara ventaja respecto a la autonomía del vehículo, aunque sus trenes de propulsión sean de complejo control, así como su coste.

En este artículo se ha mostrado el funcionamiento del tren propulsor con pila de combustible, así como, su estrategia de control y modos de funcionamiento. El hidrógeno, que alimenta la pila de combustible, ob-

tenido mediante electrolisis vía energías renovables es la solución que la UE plantea como viable para un transporte totalmente descarbonizado desde el pozo a la rueda. Las exigencias medioambientales y legislativas, asociadas a la reducción de gases de efecto invernadero, están llevando a la industria del automóvil a un proceso paulatino de transición ordenada de los convencionales sistemas de propulsión con motor de combustión interna a sistemas de propulsión de cero emisiones por el tubo de escape. Es por ello que las baterías y la pila de combustible de hidrógeno se consideran las tecnologías que tienen el mayor potencial para su incorporación en los trenes de propulsión de vehículos de cero emisiones.

REFERENCIAS ↓

[1] <https://hedgescompany.com/blog/2021/06/how-many-cars-are-there-in-the-world/>
 [2] IEA, 2021. Data and statistics. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=-CO2%20emissions&indicator=CO2BySector>.
 [3] EEA, 2021. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2019 and inventory report 2021. Submission to the UNFCCC Secretariat.
 [4] MITECO, 2021. INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Serie 1990-2019.
 [5] Informe OTLE 2020.
 [6] BP Statistical Review of World Energy 69th edition 2020.[7] JEC Well to Wheel report v5
 [8] Eshani, M., Gao, Y., Emadi, A. «Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory and Design» CRC Press, 2010.