

ELECTROMOVILIDAD PARA UN MEDIOAMBIENTE MÁS LIMPIO

ELECTROMOBILITY FOR A CLEANER ENVIRONMENT

Carlos Marschoff¹, Jairo Márquez P.², Olga P. Márquez²

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química Buenos Aires C1063ACV - Argentina

²Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Laboratorio de Electroquímica. Mérida 5101 - Venezuela.
e-mail : cmarschoff@gmail.com

Recibido: 11-02-2023

Aceptado: 23-04-2023

Resumen

El aumento de la población global y las demandas asociadas con ese crecimiento requieren acciones urgentes para frenar el impacto que ello tiene sobre el medio ambiente, la supervivencia de los seres vivos y la recuperación del equilibrio ecológico. En ese contexto la fracción de demanda originada por las necesidades del sector transporte, vital para movilidad de las personas y la distribución de productos y servicios, es una de las causas importantes de ese impacto, toda vez que, por estar fundamentalmente basado en el uso de combustibles fósiles, lleva a un incremento de las emisiones de sustancias nocivas a la atmósfera. En particular, se estima que el transporte es responsable de una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero entre los cuales el dióxido de carbono (CO₂) representa el 75% de la contaminación mundial. En el marco de la creciente concienciación medioambiental, se ha planteado la necesidad de desarrollar nuevas alternativas para lograr, de modo ambientalmente sostenible, la provisión de energía al sector del transporte, y de los desarrollos alcanzados, surge el concepto de electromovilidad. En este artículo se presenta una resumida discusión de los principios de funcionamiento de las tecnologías involucradas.

Palabras clave: Electromovilidad, Cambio climático, Vehículos eléctricos, Vehículos híbridos, Energías limpias.

Abstract

The global population growth and the associated demands linked to it require that urgent actions be implemented in order to reduce as much as possible the environmental impact, thus contributing to recover ecological equilibrium and to avoid species extinction. In this context the increase of the energy demand of the transportation sector, which stems from the ever increasing needs due to people mobility and distribution of goods and services, is one of the main reasons of this impact, since the almost exclusive use of fossil fuels as energy source for vehicle impulsion leads to increasing emissions of atmosphere polluting agents. In particular, it is reckoned that transportation is responsible of almost 25% of greenhouse effect gases, among which carbon dioxide (CO₂) accounts for a 75% share. Within the general acknowledgment of the environmental impact of fossil fuels significant work has been devoted to the development of alternative technologies for sustainable means of providing energy to vehicles through which the concept of electromobility is coined. In the present paper a brief analysis of the involved technologies is given

Keywords: Electromobility, Climate change, Electric vehicles, Hybrid vehicles, Clean energies

Carlos M. Marschoff: Doctor en Química (UBA), Investigador Científico en las áreas de fisicoquímica, energía y gestión tecnológica. Fue director de convenios y transferencia de tecnología de la UBA. Coordinador del FONTAR (Fondo Tecnológico Argentino). Gerente general de UBATEC; consultor de organismos internacionales, Prof. de Electroquímica en la Facultad de Ingeniería de la UBA, director general del FONCYT. Director de Proyectos de Green Cross Argentina. E-mail: cmarschoff@gmail.com; **Olga P. Márquez:** Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciada en Química (UCV-ULA), personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. Mérida-Venezuela. Email: olgamq@gmail.com;

Jairo Márquez P: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciado en Química (UCV-ULA), personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. Mérida-Venezuela. Email: jokkmarquez82@gmail.com.

INTRODUCTION

Desde la invención de la máquina a vapor, que desencadenó la llamada “revolución industrial”, la humanidad comenzó a acceder a nuevos productos y prestaciones que requirieron un consumo cada vez mayor de energía. Este aumento de oferta energética fue posible por la disponibilidad de cantidades crecientes de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) que, aún hoy, cubren el 80% de la demanda mundial de energía.

La combustión de carbón e hidrocarburos genera como producto inevitable dióxido de carbono (CO_2) y, durante más de un siglo, las cantidades crecientes de CO_2 emitido a la atmósfera fueron toleradas porque sus efectos resultaban poco perceptibles. Avanzada la segunda mitad del siglo pasado en algunos círculos científicos comenzó a evaluarse ese impacto y las primeras voces de alarma señalaron que debía tomarse en cuenta el efecto de las concentraciones cada vez mayores de CO_2 en la atmósfera. Hoy, se sabe que el incremento de la concentración de CO_2 en la atmósfera ha desatado el mecanismo conocido como “efecto invernadero”, responsable de que las temperaturas globales mantengan un aumento continuo desde mediados del siglo pasado. Las mediciones de distintos centros

y laboratorios evidencian ese efecto y, al respecto, se puede señalar que los cinco años más cálidos de temperaturas medias globales se han producido desde 2010 en tanto que 16 de los 17 años más cálidos registrados corresponden a las últimas dos décadas¹ (figura 1).

El cambio climático desencadenado como consecuencia es una de las mayores amenazas para el futuro de la especie humana y, en este sentido, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático viene emitiendo continuos llamados de atención sobre la magnitud y urgencia del problema.

En este contexto es interesante señalar que tomando los datos de consumo de energía recopilados por las Naciones Unidas y analizándolos mediante modelos de sustitución logística se encuentra que la evolución del consumo de energía está claramente definida por la demanda, por parte de los usuarios, de recibir una fracción cada vez mayor de electricidad, a expensas de la combustión de hidrocarburos o carbón, en el punto de uso final y, de hecho, hacia 1999 más del 50% de la energía del mundo se consume bajo la forma de electricidad.

Hasta finales del siglo pasado el sector del transporte no acompañó esta tendencia y

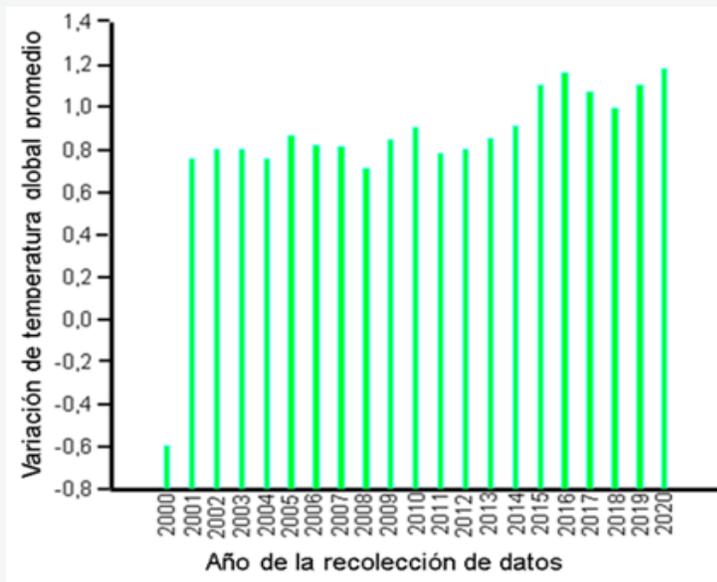


Figura 1.- Cambio en la temperatura global promedio, comparada con el período preindustrial 1850-1900. (datos tomados de la oficina del Servicio Meteorológico Nacional del Reino Unido (MET))

sólo cuando los efectos de las emisiones de contaminantes, en particular dióxido de carbono (CO₂), sobre el cambio climático se hicieron evidentes se puso en marcha una serie de iniciativas para sustituir la combustión de hidrocarburos y carbón en el transporte, por electricidad.

Debe destacarse, en este sentido, que tanto desde la Universidad de Los Andes como desde la Universidad de Buenos Aires se viene señalando, desde las últimas décadas del siglo pasado, la necesidad de tomar en cuenta el efecto invernadero señalando la importancia de emplear técnicas electroquímicas para la producción de hidrógeno como combustible² y de su utilización en celdas de combustible³ así como para potenciar la participación de las fuentes renovables en la matriz energética.^{4,5}

En particular, el desarrollo de tecnologías que permitan impulsar vehículos con energía eléctrica se ha transformado en una meta hacia la que apuntan los esfuerzos de investigación y desarrollo que se están llevando a cabo, tanto en el ámbito público como en el de las empresas, a lo largo y ancho del planeta.

2. Antecedentes de la electromovilidad

El uso de la electricidad para impulsar vehículos tiene una larga historia. De hecho, el primer automóvil que superó los 100 km/h, “La Jamais Contente”⁶ fue construido en 1899 por el belga Camille Jenatton sobre chasis y carrocería de aluminio, con un perfil aerodinámico, como se ve en la Figura 2. Con este vehículo, Jenatton alcanzó los 104,88 km/h, asombrando a los periodistas convocados para la prueba. Pese a este logro, la construcción de vehículos con baterías de plomo, debido a su baja autonomía (65 km) y al hecho de que el 50% de la masa del vehículo estaba dada por las baterías, fue rápidamente desechada frente a las prestaciones de los automóviles impulsados con motor de combustión interna que ofrecen mayor autonomía, una relación peso/energía mucho más conveniente y, fundamentalmente, menores costos⁷. Por estas razones los motores de combustión interna dominaron, desde entonces, el mercado automotor a pesar de su baja eficiencia energética (25-30% para un motor a gasolina) y de la emisión de distintos gases contaminantes (CO₂, CO, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre).

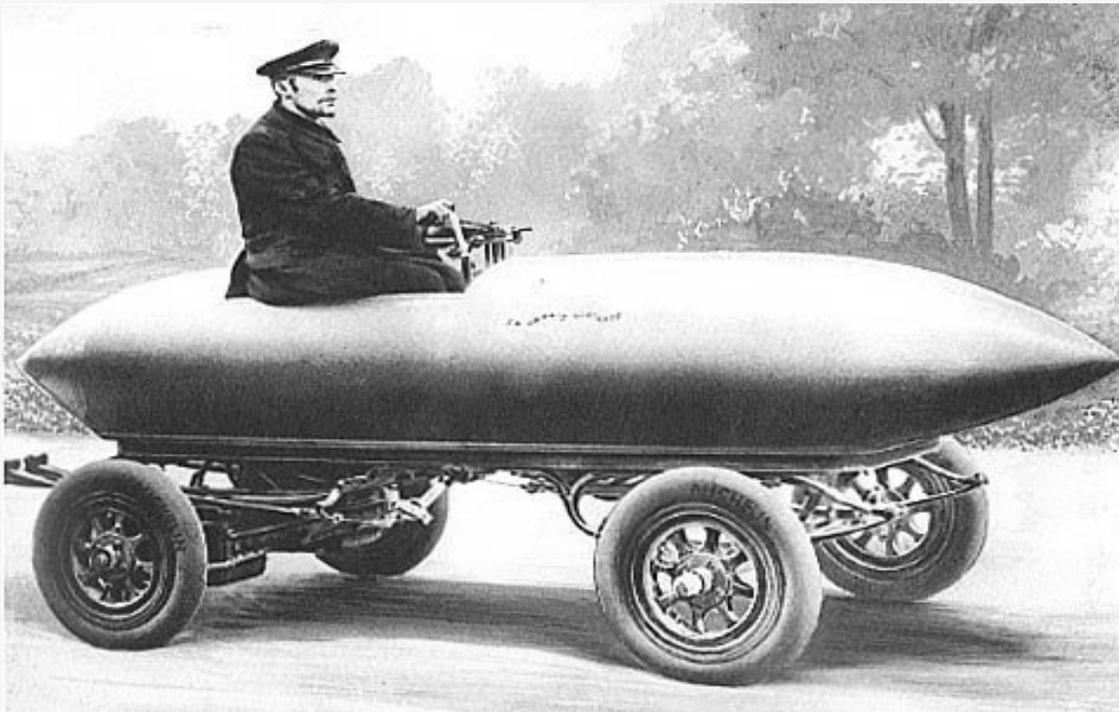


Figura 2: La Jamais Contente y su constructor en un grabado de 1899⁵

Como se ha mencionado en la sección anterior, el crecimiento de la población y la consiguiente expansión del parque automotor han llevado a que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático convocado por las Naciones Unidas y la Organización Mundial de la Salud hayan emitido repetidas alarmas respecto de la concentración de gases de efecto invernadero y fijado metas para su reducción.

Por otra parte, a partir de la segunda mitad del siglo XX se ha producido avance en el desarrollo de sistemas de producción electroquímica de energía que ofrecen mejores prestaciones que las baterías de plomo, en particular en lo que se refiere a la relación energía/peso. Actualmente los dos dispositivos que se emplean para generar energía eléctrica para impulsar vehículos son las baterías de litio y las celdas de combustible alimentadas con hidrógeno.

3. Sistemas electroquímicos de provisión de energía.

Las celdas galvánicas son dispositivos que permiten generar energía eléctrica a partir de reacciones químicas que ocurren con cambios en el estado de oxidación de reactivos y productos y, en general, se pueden clasificar en dos categorías según se trate de reactores con masa limitada de reactivos o con una alimentación continua:

- **Baterías:** son dispositivos que convierten en energía eléctrica la energía química disponible en una masa limitada de reactivos que se encuentra contenida dentro de la batería
- **Celdas de combustible:** son dispositivos que convierten en energía eléctrica la energía química contenida en una masa, en principio ilimitada, de reactivos que se van suministrando a la celda de combustible a medida de los requerimientos específicos.

Las baterías, a su vez, distinguen dos tipos:

- **Baterías primarias:** Son aquéllas en las que al menos una de las reacciones de electrodo no puede revertirse aplicando una fuerza

electromotriz externa y, por lo tanto, una vez agotada la masa de reactivo disponible deben descartarse

- **Baterías secundarias:** Las reacciones de ambos electrodos pueden revertirse aplicando una fuerza electromotriz externa y, de ese modo, es posible regenerar la masa de reactivos una vez agotada la batería. Se dice entonces que este tipo de baterías es recargable.

Desde el punto de vista de su aplicación a la impulsión de vehículos las baterías primarias deben ser descartadas por su limitada vida útil; por lo tanto, limitaremos esta sección a comparar las ventajas y desventajas de utilizar baterías secundarias o celdas de combustible.

La motorización de un vehículo exige contar con un sistema que permita recorrer distancias de algunos cientos de kilómetros sin necesidad de detenciones y, también, que pueda ofrecer la capacidad de acelerar de modo satisfactorio frente a situaciones particulares. El primer punto exige contar con suficiente reserva de energía como para disponer de la autonomía deseada, lo que dependerá de la energía disponible por kilogramo del sistema de motorización. El segundo requiere que el sistema permita erogar la potencia necesaria para lograr la aceleración.

Estas características de los diferentes sistemas de motorización se pueden comparar empleando los gráficos de Ragone⁶ en los que se representa la densidad de energía en el eje de ordenadas y la densidad de potencia en el eje de abscisas. En la Figura 3 se muestra un gráfico de Ragone⁸ para algunos de los dispositivos de interés.

Como se ve de este gráfico, si bien el motor de combustión interna tiene el comportamiento óptimo, las celdas de combustible ofrecen una prestación equivalente en cuanto a densidad de energía, si bien la densidad de potencia es un orden de magnitud menor. Por su parte, las baterías de litio pueden alcanzar densidades de potencia comparables a los motores de combustión interna, pero menor densidad de energía.

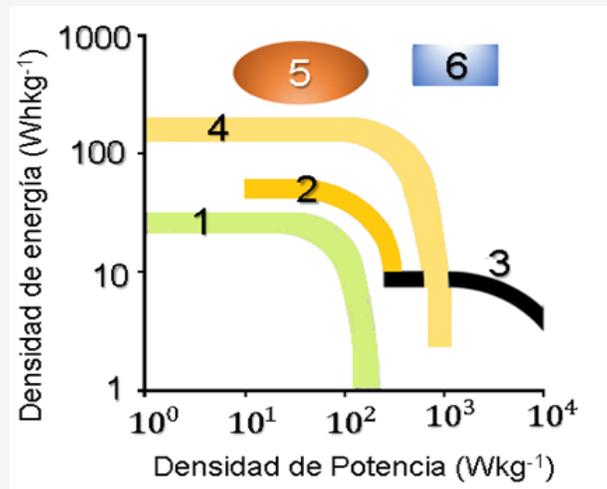


Figura 3.- Gráfico de Ragone para varios dispositivos. 1: Baterías de plomo; 2: Baterías de Níquel-hidruro metálico; 3: Capacitores; 4: Baterías de litio; 5: Celdas de combustible; 6: Motor de combustión interna

4. Estrategias para la electromovilidad

Evaluando la situación actual del transporte terrestre y marítimo es de señalar que sólo en el sector ferroviario hay una participación importante de la electromovilidad: de acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía en 2021 casi el 40% de la energía consumida para impulsar trenes de carga y de pasajeros fue entregada desde la red eléctrica, estimándose que esa participación será de más del 60% en 2030. En contraste, el transporte marítimo y el automotor dependen prácticamente en su totalidad de la combustión de hidrocarburos.

En este marco, es claro que la sustitución de la combustión de hidrocarburos por una impulsión puramente eléctrica en la flota automotriz no es viable en el corto plazo en vista de los enormes costos que supone dismantlar la actual infraestructura de producción y distribución de combustibles y, por ello, tanto desde los organismos gubernamentales competentes como desde las propias empresas, se ha definido una estrategia de mediano y largo plazo que apunta a que, en un plazo de 30 – 40 años, se pueda alcanzar la eliminación definitiva del uso de hidrocarburos en el transporte. El desarrollo de esta estrategia contempla como objetivo final lograr que la totalidad de los automóviles y camiones sean impulsados por motores eléctricos y, para ello, considera como elemento crítico en la transición, la introducción de automóviles híbridos, es

decir, impulsados por un motor eléctrico suplementado por otro motor convencional. Dado que los automóviles híbridos y los puramente eléctricos, son más costosos que los de motor tradicional y sus gastos operativos son también mayores, una de las herramientas básicas en la estrategia es la asignación de subsidios, directos e indirectos, para promover su uso. En este sentido, la Unión Europea ha logrado un impactante aumento del patentamiento de nuevos vehículos con impulsión eléctrica total o parcial, (figura 4)⁹

Los datos volcados en la Figura 4 indican que el patentamiento de estos tipos de automóviles pasó de 600 unidades en 2010 a 1.061.000 en 2020 y 1.729.000 en 2021, lo que corresponde a un avance muy importante en los últimos años. De seguirse esta tendencia se alcanzará la meta de eliminar en Europa la producción de unidades convencionales antes de 2040.

5. Características básicas de los automóviles con impulsión eléctrica

Distintos fabricantes comercializan hoy automóviles con impulsión eléctrica en una amplia gama de modelos que, en líneas generales, se pueden clasificar bajo dos categorías: los automóviles híbridos y los automóviles eléctricos.

La diferencia central entre ambas categorías reside en que los híbridos están impulsados

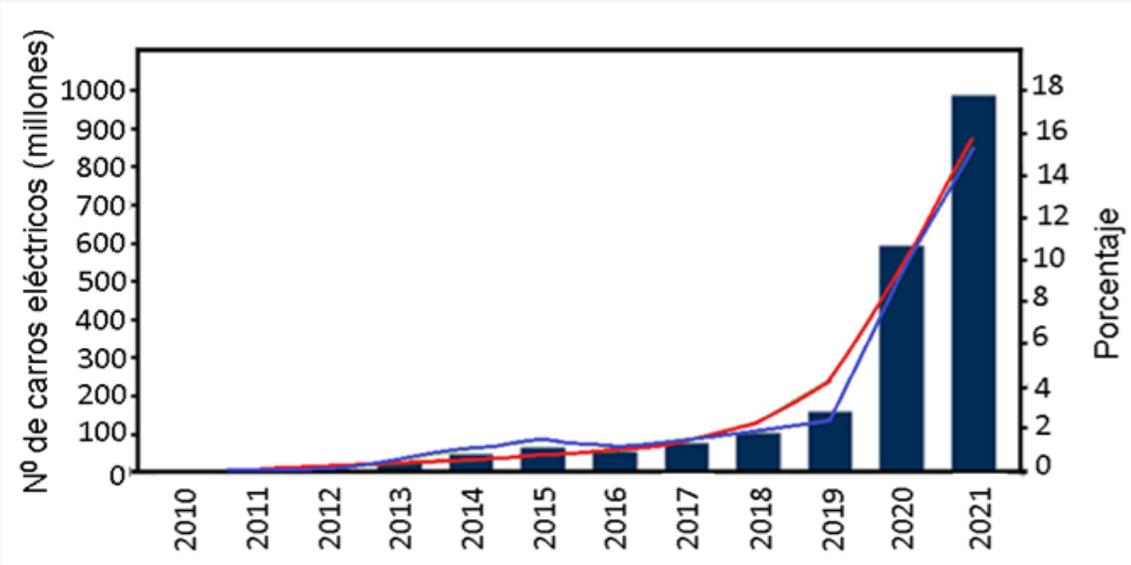


Figura 4.- Patentamiento de unidades (escala izquierda) la línea azul corresponde automóviles híbridos y la roja a automóviles a batería. La escala de la derecha indica el porcentaje respecto del patentamiento total

por un motor combustión interna acoplado con uno o más motores eléctricos en tanto que los automóviles eléctricos se movilizan exclusivamente con motor eléctrico. Desde el punto de vista de la sustentabilidad ambiental es claro que los automóviles eléctricos tienen, en principio, menor impacto ambiental que los híbridos, ya que no consumen hidrocarburos y, por lo tanto, no generan emisiones de gases de efecto invernadero, pero, operativamente, tienen mayores costos y, por lo tanto, ambos tipos de automóvil participarán activamente en el mercado durante las próximas décadas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el impacto ambiental real no depende sólo de las emisiones que el vehículo produce, sino de todas las emisiones generadas por la producción de los combustibles y de las fuentes electroquímicas de energía. Antes de avanzar en el análisis de cada uno de estos conceptos de vehículos con impulsión eléctrica conviene señalar algunos aspectos que son comunes a todos ellos:

- En todos los casos se trata de obtener el mejor desempeño del vehículo por lo que es de central importancia contar con un sistema de control centralizado que recopile los valores de todas las variables críticas para definir la forma operativa óptima en cada caso
- En todos los casos los motores eléctricos

están alimentados por una fuente electroquímica de energía: baterías o celdas de combustible

- La presencia de un motor eléctrico permite recuperar parte de la energía cinética durante el frenado haciendo funcionar al motor como un generador para cargar las baterías
- Las baterías incluyen, en la mayoría de los casos, sustancias cuya liberación al ambiente genera contaminación y riesgos ambientales, entre las que los metales pesados son las más comunes. Por lo tanto, en la medida en que la utilización de vehículos con impulsión eléctrica se generalice será imprescindible establecer un sistema de reciclado y recuperación de las baterías agotadas.¹⁰

Dicho esto, señalemos ahora que dentro de cada una de las categorías indicadas cabe distinguir al menos dos tipos de vehículo en cada caso. Así, los automóviles híbridos pueden ser vehículos híbridos eléctricos, en inglés hybrid electric vehicles (HEV) o vehículos híbridos eléctricos enchufables, en inglés plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) según la carga de las baterías se lleva a cabo internamente, utilizando la energía del motor de combustión interna, o por conexión a una fuente de potencia externa. A su vez, si en un HEV la energía eléctrica es generada por una celda de combustible se tiene un

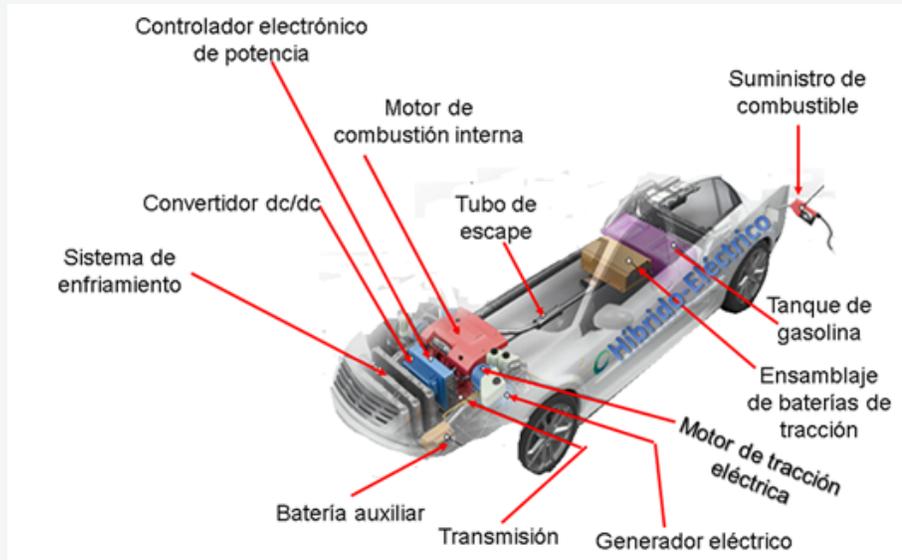


Figura 5.- Distribución de los componentes motores de un HEV¹²

fuel cell hybrid electric vehicle (FCHEV). Por su parte, los vehículos eléctricos pueden tener como impulsor principal una batería, y se habla entonces de un vehículo eléctrico a batería (BEV), o una celda de combustible y se tiene un vehículo eléctrico impulsado por celdas de combustible¹¹ (FCEV).

6. Vehículos híbridos eléctricos (HEV)

Los HEV están impulsados por un motor de combustión interna y uno o más motores eléctricos que reciben energía de un conjunto de baterías de litio. Normalmente el motor de combustión interna y el tamaño del tanque de combustible son los principales responsables de definir la autonomía del vehículo y el motor eléctrico funciona como complemento durante la operación a velocidad constante. Cuando es necesario acelerar el vehículo el motor de combustión interna funciona independientemente del motor eléctrico. La recarga de las baterías en los HEV se produce mayoritariamente utilizando la energía del motor de combustión interna, del mismo modo en que los automóviles tradicionales las baterías de plomo se recargan durante la marcha mediante un generador alimentado por el motor; sin embargo, una parte significativa de la recarga se realiza aprovechando la energía cinética de frenado. La Figura 5 muestra la distribución de los componentes motores de un HEV.

La descripción de los elementos críticos es la siguiente:

- Batería auxiliar: provee la energía para el arranque del motor antes de que las baterías de tracción entren en operación y, además, alimenta otros accesorios (luces, aire acondicionado, etc.)
- Baterías de tracción: Almacenan energía eléctrica para alimentar el motor eléctrico de tracción
- Convertor DC/DC: Convierte la potencia en continua de alto voltaje proveniente del paquete de baterías de tracción en continua de bajo voltaje para alimentar accesorios y recargar la batería auxiliar
- Motor eléctrico de tracción: Utiliza la potencia entregada por el sistema de baterías para impulsar las ruedas
- Generador eléctrico: Genera electricidad a partir de la energía cinética de las ruedas durante el frenado. Algunos modelos utilizan motores eléctricos que se convierten en generadores durante el frenado
- Motor de combustión interna: Es un motor convencional que opera con el combustible inyectado desde el tanque
- Sistema de gases de escape: Canaliza y

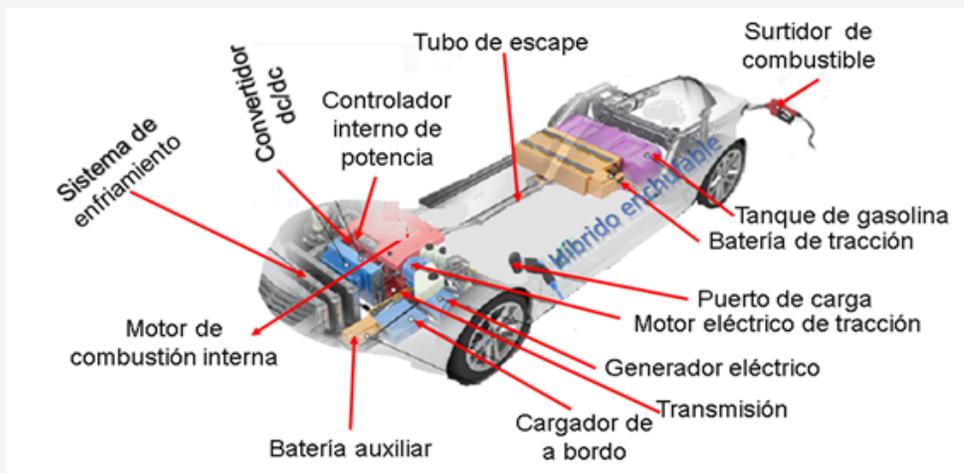


Figura 6.- Estructura de los vehículos eléctricos híbridos enchufables

procesa con sistemas de catalizadores de triple acción los gases de la combustión

- Controlador electrónico: Administra el flujo de energía eléctrica entregado por las baterías de tracción y el flujo de combustible al motor de combustión interna

Todas las grandes empresas productoras de automóviles ofrecen actualmente diversos modelos de HEV

7. Vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV)

Los PHEV emplean, también, un motor de combustión interna junto con uno o más motores eléctricos alimentados por baterías, pero a diferencia de los HEV las baterías pueden recargarse conectándolas a la red eléctrica y la distribución de sus componentes es la que se muestra en la Figura 6.

La descripción de los elementos críticos es la misma que la de los HEV con el agregado de un nuevo elemento, el cargador incorporado que convierte la corriente alterna recibida de la red en corriente continua en condiciones de potencia adecuadas para cargar las baterías de tracción lo que permite utilizar paquetes de baterías más grandes, como se ve comparando las Figuras 5 y 6.

Por esa razón en los PHEV la participación del motor eléctrico en la operación es considerablemente mayor que en los HEV:

típicamente el vehículo opera con el motor eléctrico hasta el agotamiento de las baterías, momento en el que la tracción pasa a ser impulsada por el motor de combustión interna. De este modo, el consumo de combustible es menor que en el caso anterior. Estas características operativas permiten un intervalo de autonomía significativo con tracción puramente eléctrica que, para los modelos más sencillos varía entre 20 y 100 km, si bien en el caso de vehículos de mayor porte pueden alcanzarse los 200 – 300 km de operación eléctrica pura. De este modo, para un uso exclusivamente urbano es frecuente que la mayor parte de la energía consumida en una jornada sea a través del motor eléctrico ya que al fin del día las baterías se recargan conectando el PHEV a un tomacorriente adecuado.

El proceso de recarga de las baterías tomando energía de la red se puede llevar a cabo empleando diferentes clases de equipo de carga. Actualmente existen tres tipos de cargadores clasificados, en función de la autonomía que se alcanza con una hora de carga, como Nivel 1, 2 o 3.¹³

- Nivel 1: Emplea corriente de la red domiciliar de 120 V y otorga una autonomía de aproximadamente 10 km por hora de carga
- Nivel 2: Emplea corriente de red de 240 V y permite una autonomía de 40 – 50 km por hora de carga

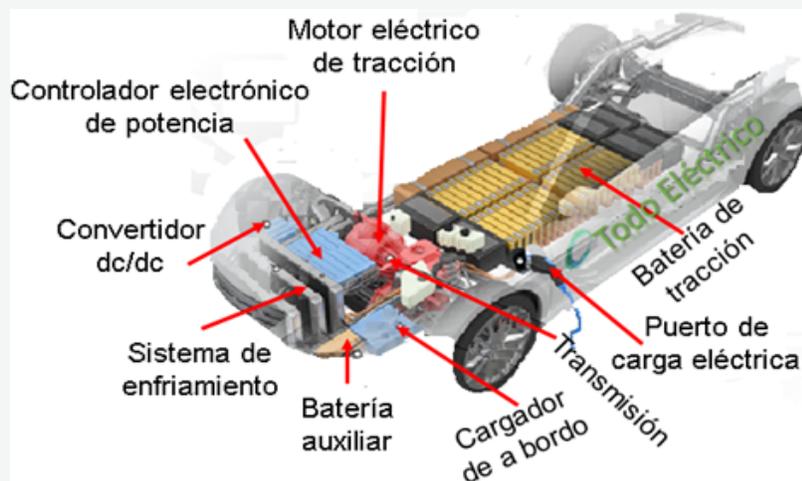


Figura 7.- Distribución de los componentes motores de un BEV

• Nivel 3: Se alimenta de corriente trifásica y brinda una autonomía de 150 – 300 km con media hora de carga.

Los equipos de Nivel 3 son relativamente complejos y se operan en estaciones de carga con instalaciones adecuadas.

No todas las grandes fábricas de automóviles comercializan PHEV. En este sentido se puede mencionar que, a marzo de 2023, en los EE.UU. sólo 8 compañías ofrecen este tipo de vehículos con un total de 33 modelos.¹⁴

8. Vehículos eléctricos a batería (BEV)

Estos vehículos utilizan exclusivamente motores eléctricos y, por lo tanto, no emiten gases debidos a la combustión de hidrocarburos. La Figura 7 muestra la distribución de componentes de un BEV.

Los BEV recargan las baterías tomando corriente de la red, en forma similar a lo que se señaló en relación con los PHEV, pero, dado que la batería es el único proveedor de energía para el motor, el tema de la autonomía pasa a ser muy significativo ya que no existe otra fuente impulsora para sustituir las baterías cuando éstas se descargan.

A su vez, en el diseño de un BEV se debe tener en cuenta que el incremento de la autonomía mediante la ampliación del paquete de baterías está limitado por el

hecho de que la relación peso-energía es más desfavorable que la de un motor de combustión interna. Por otra parte, el tiempo de recarga de una batería tomando electricidad de la red es otro factor que afecta directamente la performance, sobre todo si se piensa en transporte en carreteras y con vehículos pesados.

Por lo tanto los fabricantes de BEV, que se han volcado decididamente por el uso de baterías de litio por ser las de mejores prestaciones en estos rubros, dedican importantes sumas para trabajos de investigación y desarrollo en la mejora de las baterías de litio y, también, en la búsqueda de formulaciones alternativas.¹⁵

9. Vehículos eléctricos con celda de combustible (FCEV)

Las celdas de combustible, como se ha mencionado en la sección 3 de este artículo, funcionan haciendo reaccionar electroquímicamente hidrógeno con oxígeno para generar agua. Esta reacción tiene una alta eficiencia energética y, por esa razón y por no generar emisiones contaminantes, es una alternativa atractiva para impulsar vehículos eléctricos.

Existen varios tipos de celda de combustible, caracterizados por la naturaleza del electrolito que está en contacto con los electrodos, entre los cuales las que emplean membranas poliméricas ácidas son las que ofrecen mejores características

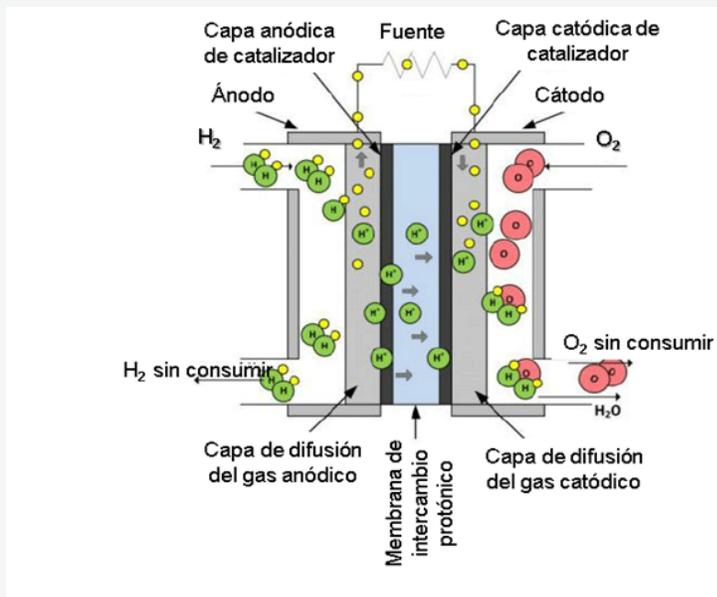


Figura 8.- Esquema de funcionamiento de una celda de combustible unitaria con membrana de intercambio de protones

de las relaciones peso/potencia y peso/energía. En la Figura 8 se esquematiza el funcionamiento de una celda elemental de este tipo.

La celda es alimentada por hidrógeno gaseoso en el ánodo, donde se oxida para generar protones y liberar electrones que circulan hacia el cátodo donde el oxígeno se reduce, reaccionando con los protones que migran a través de la membrana y los electrones para dar agua. Combinando muchas de estas celdas unitarias en apilamientos, o stacks, se construyen unidades generadoras de electricidad cuya potencia depende del

número de celdas utilizadas. En la Figura 9 se detallan los elementos que configuran la planta motriz de un FCEV típico.

Como se ve de esta Figura, la unidad motriz está constituida por uno o más motores eléctricos alimentados por el ensamblaje (stack) de celdas de combustible que está suplementado por un pack de baterías de alto voltaje que acumulan energía recuperada en el frenado. Las celdas operan tomando hidrógeno de los tanques de combustible y oxígeno del aire. Un punto importante está dado por los tanques de almacenamiento de hidrógeno que puede

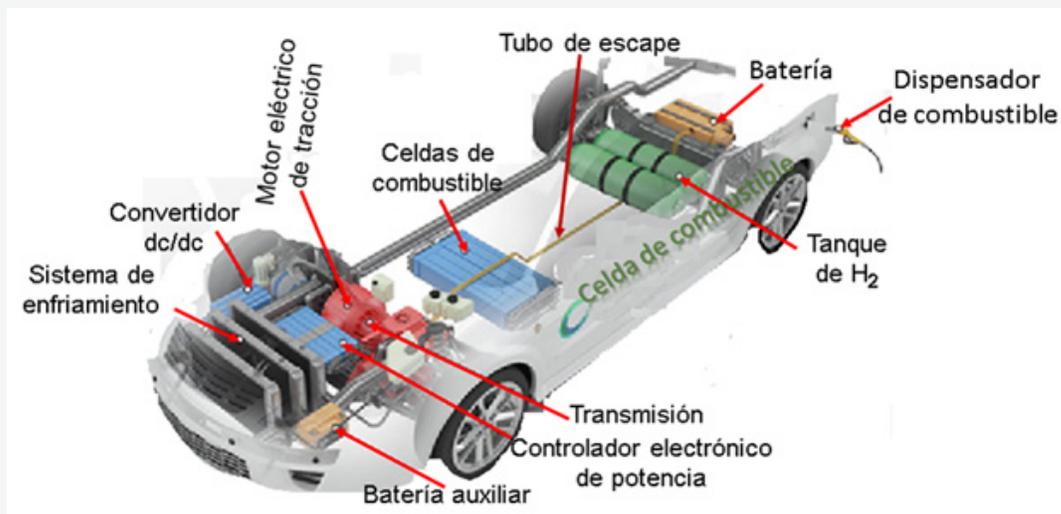


Figura 9.- Distribución de los componentes motores de un FCEV

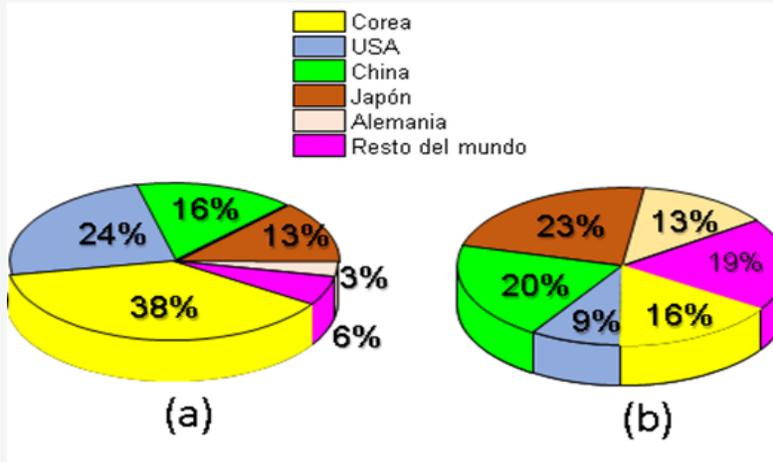


Figura 10.- Distribución geográfica de las unidades de FCEV en circulación (a) y de las estaciones de recarga de hidrógeno (b) según la AIE.

estar comprimido a muy altas presiones o, directamente, bajo forma de hidrógeno líquido y uno de los puntos a resolver para que los FCEV puedan llegar al público general es construir una red de estaciones de servicio para recargar los tanques de hidrógeno. Es claro, entonces que los FCEV no están en etapa de comercialización si bien casi todas las grandes automotrices, en la mayoría de los casos en asociación con entes gubernamentales están trabajando en la construcción de automóviles impulsados por celdas de combustible. Este interés se debe a las sensibles ventajas que este modelo de automóvil ofrece respecto de los arriba descritos:

- Reducido impacto ambiental, por su mayor eficiencia energética y la mínima presencia de sustancias peligrosas que, básicamente, se encuentran en las baterías

de suplementación.

- Acceso ilimitado al combustible, que se puede obtener por electrólisis de agua empleando energía producida por fuentes renovables como solar o eólica.

- Mejores prestaciones en cuanto a autonomía y a las relaciones peso-energía y peso-potencia.

Una muestra de ese interés se encuentra en el hecho de que, de acuerdo con los datos de la Agencia Internacional de la Energía en 2021 se encontraban en circulación 51.600 FCEV, todos ellos en etapas de evaluación y desarrollo, alimentados por 730 estaciones de recarga de hidrógeno según la distribución que se muestra en la Figura 10.¹⁶

Por su parte, la Figura 11 muestra



Figura 11.- Esquema de funcionamiento de una estación de recarga de hidrógeno

esquemáticamente cómo es el funcionamiento de una estación de recarga de hidrógeno que opera a partir de una provisión de hidrógeno líquido.¹⁷

Como se ve de esta Figura, el tanque de alimentación contiene hidrógeno líquido en equilibrio con hidrógeno gaseoso y se toman dos corrientes de salida: el hidrógeno líquido se presuriza a 950 bar y se inyecta a un evaporador que alimenta un tanque intermedio de almacenamiento

a esa presión. Ese tanque recibe también hidrógeno proveniente de la corriente gaseosa que es comprimido a 950 bar antes de su inyección al tanque. Finalmente, el hidrógeno a 950 bar es enviado al tanque de despacho que se encuentra a -400 C para su despacho al vehículo. Las figuras 12 y 13 muestran, respectivamente una estación de recarga de hidrógeno operando en Japón¹⁸ y el detalle del pico de salida del hidrógeno que se acopla con la boca del tanque.¹⁹



Figura 12.- Operación de recarga de hidrógeno



Figura 13.- Detalle del acople surtidor – FCEV

Conclusión

La rama científica Electroquímica, tal como su nombre lo indica, tiene una estrecha vinculación con aspectos de la vida diaria tales como, Electricidad, Química, Ambiente, Contaminación/Descontaminación, Alimentación, Salud, Farmacéutica, Seguridad, Transporte, etc. La creciente contaminación ambiental actual y las consecuencias que acarrea (cambio climático, lluvia ácida, fenómenos agresivos-dañosos-destructivos y mortales, etc.) exigen una atención y tratamiento inmediato. En referencia con la electromovilidad, vemos en este trabajo, tratamientos electroquímicos que contribuyen a la disminución en unos casos y eliminación en otros, de contaminantes ambientales que requieren de urgente atención y en ese sentido se presentan tecnologías y procesos tales como las posibilidades de uso de baterías secundarias, celdas de combustible, vectores energéticos valiosos (ej. H₂) y procesos acoplados, que han de contribuir sustancialmente con cambios y modificaciones a la movilidad y transporte en nuestras sociedades (trenes, vehículos, barcos, etc.) responsables de gran parte del suministro ambiental de contaminantes. De hecho, y se muestra en este trabajo, importantes aportes ya logrados en numerosos países y en adición, son muchos otros los países que actualmente atienden la electromovilidad con énfasis en transporte de vehículos pesados, transporte aéreo y marítimo.

References

- 1.- McLean M, Gibbs T. (2022). Addressing Code Red for humans and the planet: We are in this together, *Medical Teacher*, 44(5) 462 - 465.
- 2.- Marschoff CM, Aragón PJ. (1974). Conversión de energía: celdas de combustible. *Acta Cient. Venezolana*, 24 185-188.

- 3.- Marschoff CM. (1986). Prospects for hydrogen energy systems in Argentina. *Int. J. Hydrogen Energy* 11(5) 317-319.
- 4.- Márquez J, Márquez OP. (2019). Solar Energy and Electrochemistry in the book “Recent advances in Electrochemical Research”, Rolando Tremont editor, Kerala, India, 169-222, ISBN:978-81-7895-545-2.
- 5.- Márquez J, Márquez OP, Weinhold E, Márquez PK. (2021). Hydrogen from Solar Energy (with Electrochemistry): A review. *Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE)*. 4(1)11-27.
- 6.- Science Photo Library. (1899). <https://www.motorpasion.com/clasicos/a-cien-jenatzy-y-la-jamais-contente>.
- 7.- Ragone DV. (1968). Review of battery systems for electrically powered vehicles. SAE Technical Paper. SAE Technical Paper Series. 1. doi:10.4271/680453. 680453.
- 8.- Christen T, Carlen MW. (2000). Theory of Ragone plots. *Journal of power sources*, 91(2), 210-216.
- 9.- <https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles>.
- 10.- Li H, Dai J, Wang A, Zhao S, Ye H. (2019). Recycling and Treatment of Waste batteries. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 612, 052020.
- 11.- Muthukumar M, Rengarajan N, Velliyangiri B, Omprakas MA, Rohit CB, Raja UK. (2021). The development of fuel cell electric vehicles—A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1181-1187.
- 12.- U.S: Department of Energy <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>.
- 13.- Das HS, Rahman MM, Li S, Tan CW. (2020). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109618.
- 14.- <https://evadoption.com/ev-models/available-phevs/>.
- 15.- Grant PS et al. (2022). Roadmap on Li-ion battery manufacturing research. *J. Phys. Energy*. 4 042006 doi 10.1088/2515-7655/ac8e30.
- 16.- <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicle-stock-and-hydrogen-refuelling-stations-by-region-2021>.
- 17.- <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hdsam>.
- 18.- <https://hydrogen-central.com/japan-1000-hydrogen-stations/>.
- 19.- <https://www.petrolplaza.com/news/25683>