

Vehículos Eléctricos. Historia, Estado Actual Y Retos Futuros

Prof. Francisco Martín Moreno

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Málaga, España

Abstract

Electric Vehicles. Past, present and future trends. In this century, environment impact and energy conservation are very important and growing concerns. The development of electric vehicles is of vital importance because combustion based vehicles is not a sustainable option for a near future. Moreover, policy incentives together with pollution and noise concerns and the use of renewable energy have made commercially viable electric and hybrid vehicles a reality. This paper gives an overview of the history of electric vehicles, the present status, and the future research lines. The main problems associated with electric vehicles development and effective implementation such as energy storage, electronics and control is analysed.

Keywords: Electric Vehicles, technology

Resumen

El uso de combustibles fósiles en los vehículos actuales con motores de combustión interna es insostenible a medio plazo. La única alternativa posible es el desarrollo de vehículos eléctricos. En este artículo se analiza la historia, la evolución y los principales problemas que se deben resolver para el desarrollo y la implantación de los vehículos eléctricos.

Palabras Clave: Vehículos eléctricos, tecnología

Historia

Durante el siglo XIX se desarrolló la electricidad de forma espectacular. La pila de Volta (1800) dio lugar al desarrollo de esta rama de la ciencia, al permitir la realización de experimentos repetibles con corrientes eléctricas. Los vehículos eléctricos se inventaron en la primera mitad del siglo XIX, mucho antes que los vehículos con motores de gasolina y diesel. Posiblemente el primer prototipo lo construyó el húngaro Ányos Jedlik en

1828. Era un modelo de pequeño tamaño movido por un motor eléctrico inventado por él mismo

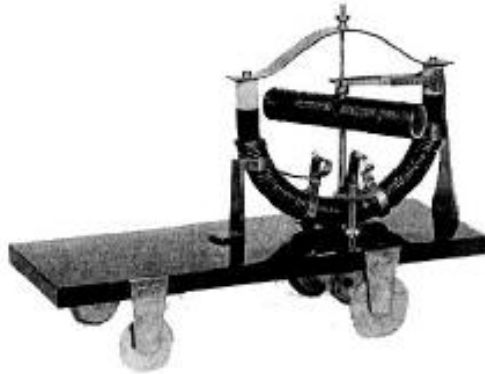


Fig. 1. Vehículo eléctrico inventado por Ányos Jedlik en 1828

En 1834 un herrero de Vermont llamado Thomas Davenport inventó el primer vehículo eléctrico movido por una batería. Construyó un pequeño tren con una vía circular, movido por una batería. Las vías hacían de conductores de la electricidad. Davenport también inventó el primer motor eléctrico de corriente continua.

Entre 1832 y 1839 el escocés Robert Anderson construyó el primer coche movido por electricidad, usando como fuente de energía una batería no recargable.

En 1835 el holandés Sibrandus Stratingh y su ayudante Cristofer Becker desarrollaron un vehículo accionado por baterías no recargables, que es el precedente de los actuales coches eléctricos.



Fig. 2. Coche eléctrico construido por el profesor Stratingh

La primera locomotora eléctrica fue inventada por Robert Davidson en 1837, impulsada por motores eléctricos contruidos por él mismo. Independientemente, en USA Willian H Taylor inventó los mismos motores en 1838, sin conocer cada uno el trabajo del otro.

Davidson construyó en 1842 un vehículo eléctrico con cuatro ruedas al que llamó Galvani, que usaba como fuente de energía baterías de zinc-ácido y que alcanzaba una velocidad de 4 mph, aunque no podía transportar pasajeros.

El problema principal de los vehículos eléctricos eran las baterías. Los cálculos demostraban que el consumo de zinc de una batería resultaba cuatro veces más caro que el carbón de una máquina de vapor, que en aquel tiempo era el competidor del motor eléctrico.

En 1840 en Inglaterra, y en 1847 en USA se patentó el uso de los railes de tren para el transporte de la electricidad. El invento de la dinamo en 1860 y su perfeccionamiento posterior dio un gran impulso a la tracción eléctrica .

En 1850 Gaston Planté inventó la batería recargable de ácido-plomo, que todavía se usa en la actualidad para alimentar el motor de arranque de los coches. Su principal ventaja es que puede mantener una corriente eléctrica durante un largo periodo de tiempo, aunque en sus primeras versiones era pesada y voluminosa.

Durante el siglo XIX, paralelamente a los motores eléctricos, también se fueron desarrollando las baterías eléctricas.

En 1898 se construyeron y comercializaron los primeros modelos de veículos eléctricos que circularon por las calles de Londres y Nueva York. Los motores eran de corriente continua, conectados a unas baterías que se podían conectar en serie y en paralelo en varias configuraciones, controlando así la velocidad y el par.

En la primera década del siglo XX se fabricaron y comercializaron varios modelos de coches eléctricos, que eran poco más que una carroza donde los caballos se habían sustituido por un motor eléctrico de corriente continua y una batería. La autonomía era de entre 20 y 30 km, la velocidad de 25 km/h, y el precio de 2000 a 3000 USD.

En las ciudades las distancias eran pequeñas, y no se precisaba de más autonomía. No obstante, su precio era prohibitivo, y solo estaban al alcance de personas muy ricas.

Los primeros coches de gasolina aparecieron en los años 20. Tenían grandes desventajas en comparación con los coches eléctricos: Eran muy ruidosos, producían un desagradable y fuerte olor a gasolina, y eran difíciles de conducir, debido al difícil manejo de la palanca del cambio de velocidades. Para arrancarlos había que usar una manivela para dar un impulso inicial al motor. Se necesitaba un chofer con fuerza y habilidad para

manejar aquella complicada máquina. El precio de un coche de gasolina era incluso mayor que el de su homólogo eléctrico, que no tenía problema de arranque, no producía olores ni ruido, y podía ser conducido incluso por una mujer. La batalla parecía haber sido ganada definitivamente por el vehículo eléctrico.



En la fotografía se muestra un vehículo utilitario comercializado en 1902. Es el Phaeton. Alcanzaba una velocidad de 14 mph, tenía una autonomía de 18 millas, y su precio era de 2.000 USD.

No obstante, en los años entre 1920 y 1930 ocurrieron algunos hechos que inclinaron la balanza “definitivamente” a favor del vehículo de gasolina:

En Texas y otros estados de USA se encontró gran cantidad de petróleo, lo que abarató el combustible de los coches de gasolina. Se construyeron carreteras que unían las ciudades, permitiendo a los vehículos de gasolina trasladarse de una ciudad a otra, lo que no estaba al alcance de la corta autonomía del vehículo eléctrico.

El invento de motor de arranque, un pequeño motor eléctrico que con la ayuda de una batería de relativamente pequeño tamaño daba el impulso inicial al motor de explosión facilitando el arranque eliminaba la incómoda manivela.

Finalmente, el invento por Henry Ford de la cadena de montaje permitió la producción en serie de coches de gasolina, abaratando su coste y poniéndolo al alcance de la clase media.

En la década de los 1920 un coche eléctrico costaba unos 2000 USD y tenía una autonomía de 25 km. Su equivalente de gasolina costaba unos 600 USD con autonomía prácticamente ilimitada.

Debido a la combinación de todos estos factores, al final de la década de los 20 el coche de gasolina había ganado la batalla definitiva y en los años 30 el coche eléctrico dejó de fabricarse.

En los años 70 comienza un nuevo resurgir del coche eléctrico. La crisis energética produce un aumento del precio de la gasolina. La sociedad en los países avanzados comienza a tomar conciencia de los efectos de la emisión a la atmósfera de los gases de la combustión del petróleo, el conocido efecto invernadero y el cambio climático.

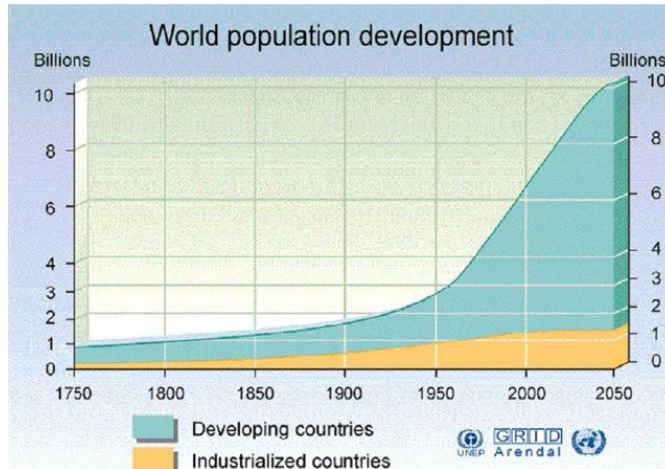
El resurgir es al principio tímido, pero da lugar a modelos desde vehículos utilitarios hasta autobuses e incluso camiones.

La preocupación por la emisión de gases de efecto invernadero y por el cambio climático desde entonces ha ido en aumento así como el precio del petróleo. La sociedad es cada vez más consciente de que el modelo de transporte actual, basado en el vehículo individual impulsado por un motor de combustión interna es insostenible a medio plazo.

En otro orden de cosas, en los países desarrollados se produce durante el siglo XX un crecimiento espectacular de las ciudades debido al desarrollo del vehículo individual, las ciudades han crecido de forma espectacular, pues es posible desplazarse decenas de kilómetros todos los días desde el domicilio al lugar de trabajo. Se desarrollan zonas residenciales, muy alejadas del centro y de las zonas industriales de las ciudades, donde habita la mayor parte de la población, que depende del automóvil. Es imposible volver al modelo de ciudad anterior, pero el actual es insostenible. Es urgente encontrar una alternativa a los medios actuales de transporte que sea respetuosa con el medio ambiente.

En la siguiente figura se muestra la evolución de la población mundial desde 1750 hasta la actualidad y su probable aumento hasta 2050. La población en 2010 era de 7.000.000.000 personas, se espera que en 2050 sea de 10.000.000.000 de personas.

El número de vehículos en 2010 era de 75 millones, y se espera que en 2050 sea de 2.500 millones. Si todos estos vehículos son propulsados por motores de explosión y de combustión interna, no hay suficientes reservas de combustibles fósiles en nuestro planeta. Pero mucho antes de agotar las reservas, debido a la diseminación de los gases resultantes de quemar ese combustible la Tierra sería inhabitable por el efecto invernadero.



1. Tipos de vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos actuales se clasifican en tres clases:

- a) Vehículo eléctrico de batería (BEV)
- b) Vehículo híbrido (HEV)
- c) Vehículo de célula de combustible (FCEV)

Para la propulsión de los modernos coches eléctricos se utilizan motores de corriente alterna. Solo los pequeños vehículos, como los cochecitos de los campos de golf o los coches de minusválidos usan motores de corriente continua.

Los motores más usados son motores síncronos de imanes permanentes, aunque a veces también se usan motores asíncronos.

Los motores de corriente alterna son más potentes que los de continua, más ligeros, y no necesitan apenas mantenimiento, pero tienen el inconveniente de que su velocidad está determinada por la frecuencia de la corriente alterna de alimentación. Por ese motivo a principios del siglo XX se usaban solo motores de corriente continua, que pueden funcionar a velocidad variable. Los motores de corriente alterna (síncronos o asíncronos) funcionan a velocidad constante, por tanto su uso hasta avanzado el siglo XX se limitaban a aplicaciones como bombas de agua, o en ascensores, pero no era posible su uso en la propulsión de vehículos.

Las baterías suministran corriente continua, y esta es la segunda razón por la que los antiguos vehículos eléctricos usaran motores de corriente continua. Además, en estos motores el control de velocidad es relativamente sencillo, y consiste básicamente en variar la tensión de entrada.

El control de los motores de corriente alterna es más complejo, y requiere de un inversor electrónico que genera a partir de la corriente continua de la batería una corriente alterna de frecuencia variable. Para aumentar la velocidad hay que aumentar la frecuencia, y además

proporcionar el par necesario para acelerar el vehículo, lo que requiere métodos de control más complejos.

Cuando un vehículo eléctrico frena o baja una cuesta existe la posibilidad de invertir el funcionamiento del motor, que pasa a trabajar como generador, y cargar la batería con la energía cinética en el caso de frenada o con la energía potencial en caso de bajada de una cuesta. A este proceso se le llama frenado regenerativo. Esto no es posible en los vehículos de gasolina, en los que estas energías se convierten en pérdidas.

En el siglo XX se ha desarrollado la electrónica que permite el control de velocidad de los motores de alterna y el frenado regenerativo. Esto ha aumentado enormemente la eficiencia de los motores eléctricos, que tienen unas prestaciones y un rendimiento muy superior a los motores de combustión interna, aparte de menor precio y mantenimiento y mayor duración. La eficiencia del motor eléctrico es superior al 90%, mientras que la del motor de combustión interna está en torno al 20%. Debido a todos estos factores, en lo que respecta a los motores, los vehículos eléctricos están a un nivel muy superior a los de combustión interna.

El punto crítico de los vehículos eléctricos en el momento actual es la batería.

Las baterías se suelen clasificar en primarias (que no se pueden recargar) y secundarias (que se pueden recargar haciéndoles pasar una corriente eléctrica en sentido contrario que invierte la reacción electroquímica).

La primera batería la inventó Volta en 1800. Este invento supuso el inicio del desarrollo de la electricidad, pues permitió la experimentación con corrientes eléctricas de forma repetitiva.

La primera batería recargable, de plomo-ácido, se inventó en 1860 por Gastón Pianté. Esta batería se usa todavía en la actualidad en los vehículos con motor de explosión o combustión interna para accionar el motor de arranque y alimentar todos los circuitos eléctricos y electrónicos.

La batería de níquel-cadmio (Ni-Cd) la inventó Waldemar Jungner en 1899. Las baterías más usadas en la actualidad en vehículos eléctricos son la de níquel metal hidruro (NiMH), inventada en 1970, y la de ión litio, que fue inventada por John B. Goodnough en 1980. A lo largo de los siglos XIX y XX se han inventado muchas más baterías, pero las más utilizadas en vehículos eléctricos son las citadas anteriormente.

Los parámetros más importantes de una batería para su uso como fuente de propulsión de un vehículo eléctrico son: Su precio unitario (€/ kWh), su densidad de energía (kWh/kg), la velocidad de carga y descarga (que está limitada por la velocidad de la reacción electroquímica) y el número de recargas que admite.

Los ultracondensadores no son baterías, son condensadores de muy alta capacidad. Su carga y descarga no conlleva una reacción electroquímica, por lo que tienen la ventaja sobre las baterías de que el proceso de carga es muy rápido, pueden dar mucha potencia instantánea al descargarse, y no se degradan. En la actualidad están en su fase inicial de desarrollo. Su capacidad es todavía pequeña y su precio muy elevado, por lo que no son aún aptos para los vehículos eléctricos. Pueden ser la alternativa a las baterías en el futuro.

Se muestran en esta tabla solamente las baterías más utilizadas en la actualidad. Se ha incluido la gasolina solo a efectos de comparación, y los ultracondensadores aunque no sean propiamente baterías.

Tipo de batería	Coste (€/Wh)	Densidad de energía (Wh/Kg)	Ciclos de vida	Temperature range
Plomo-ácido	0.14	41	500	-30-+50
NiMH	0.80	95	800	-40-+50
NiCad	1.20	39	800	-40-+50
Lithium-ion	0.35	128	1,000	-40-+60
Ultracondensadores	50,000	5	500,000	-40-+85
GASOLINA	0.00015	12,700	1	

De la observación de esta tabla se deduce que la batería de iones litio es la que ofrece en este momento mejores propiedades, y es por tanto la que llevan prácticamente todos los vehículos eléctricos.

Al ser la densidad de energía 128 Wh/kg, se deduce que una batería de 16 kWh, que es aproximadamente la que se instala en un vehículo utilitario, pesa unos 140 kg y su precio es de unos 15000 €

El tiempo de carga de la batería es de 5 a 10 horas, dependiendo de la potencia.

Un vehículo de estas características tiene una autonomía de hasta 150 km.

Si comparamos el consumo de electricidad con el consumo de gasolina del vehículo convencional, este consumiría en 150 km aproximadamente 7 litros de gasolina, que equivalen a unos 89 kWh, más de 5 veces el consumo del coche eléctrico. Esto se debe al buen rendimiento del motor eléctrico y al frenado regenerativo.



Se muestra en esta fotografía un vehículo eléctrico fabricado por Mishubishi. Sus características técnicas son:

Precio: 25.000 €

Motor síncrono de imanes permanentes de 49 kW

Par máximo: 180 Nm.

Velocidad máxima: 130 km/h

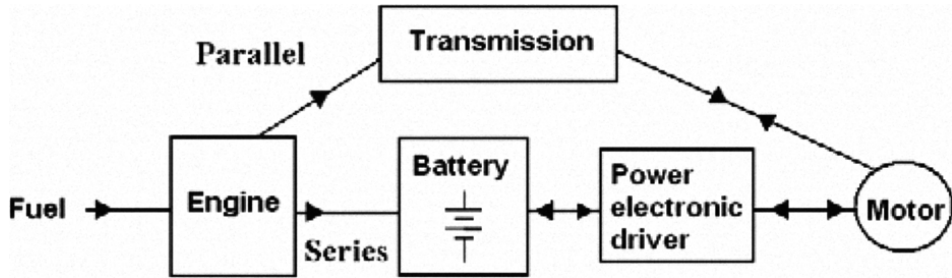
Batería: iones Litio de 16 kWh.

Autonomía máxima: 150 km.

Las ventajas del vehículo de gasolina en la actualidad van desde el precio (la mitad aproximadamente), la autonomía (cinco veces mayor), el tiempo de recarga (de unos minutos que se tarda en repostar, frente al tiempo de recarga de la batería 5 a 8 horas). Las ventajas del vehículo eléctrico son el precio de la energía, especialmente barata si se carga en tarifa nocturna, y las emisiones de gases, que son nulas. Desde luego, cuando se produce la energía eléctrica en centrales térmicas estas emiten gases de efecto invernadero, pero el promedio de gases emitidos por las centrales eléctricas (hidroeléctricas, térmicas convencionales, nucleares y renovables) es muy inferior al producido por la combustión de la gasolina, aparte del menor consumo del vehículo eléctrico.

Los vehículos híbridos tienen un motor de gasolina y un motor eléctrico, que junto con una pequeña batería permite el frenado regenerativo. Su funcionamiento está optimizado para que el consumo de gasolina sea mínimo. Existen modelos plug-in (enchufables) que permiten un ahorro importante de gasolina.

Se muestra en la figura siguiente un esquema de funcionamiento del vehículo híbrido.



En la fotografía se muestra el Toyota Prius. Sus características son:
Sus características son:

- Motor de gasolina de 57 kW
- Dos motores síncronos trifásicos de imanes permanentes de 18 kW y 33 kW. Cada motor eléctrico necesita un inversor.
- Batería de ion litio de 1.8 kWh.
- 10 km de autonomía como vehículo eléctrico



Toyota Prius 2
Su precio es de 25.000 €

El vehículo híbrido tiene mayor complejidad por la duplicidad en la tracción. Pero al tener una batería muy pequeña su precio es competitivo.

El híbrido enchufable tiene la complejidad del híbrido y la batería del eléctrico, con lo que su precio es mucho mayor (35.000 € o más).

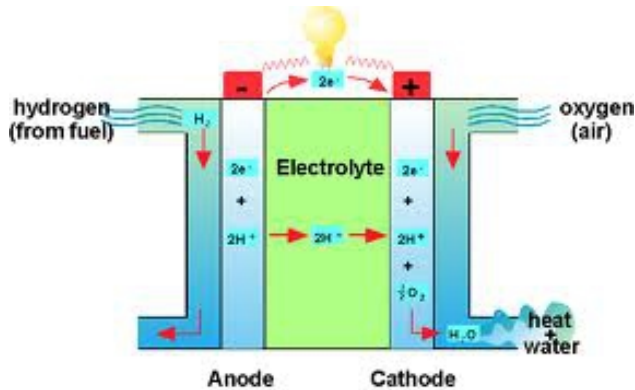
Vehículo eléctrico de célula de combustible (CCEV)

La célula de combustible es una alternativa a la batería como fuente de energía.

En ella se produce la reacción inversa de la electrólisis del agua: a partir del hidrógeno y el oxígeno del aire se produce directamente electricidad más agua.

Esta reacción no produce gases de efecto invernadero.

En la figura siguiente se muestra un esquema de la célula de combustible.



Las reacciones que se producen son: En el ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

En el cátodo: $2e^- + 2H^+ + O_2 \rightarrow H_2O$

Los electrones circulan del ánodo al cátodo, generando una corriente eléctrica.

Esta reacción requiere de un catalizador de platino.

El hidrógeno no es una fuente de energía, es solamente un portador de energía.

El primer problema asociado con las células de combustible es la obtención del hidrógeno.

El hidrógeno es muy abundante en la naturaleza, pero no se encuentra en estado puro, sino combinado en moléculas como el agua y los hidrocarburos.

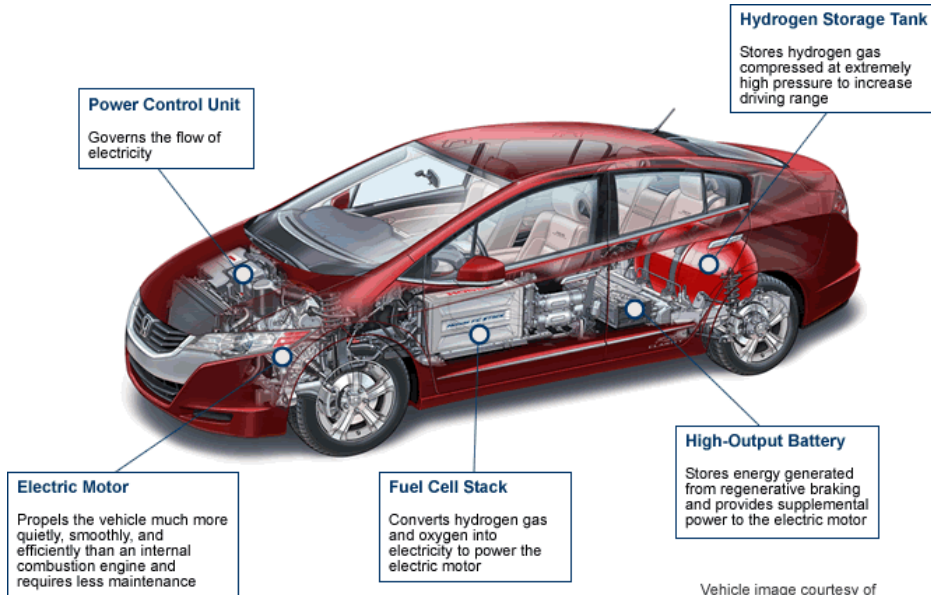
Puede obtenerse a partir de los combustibles fósiles mediante un proceso llamado “reforming”, o a partir del agua mediante electrólisis.

Ambos procesos requieren de gran cantidad de energía.

Otro problema es el almacenamiento del hidrógeno, que requiere de recipientes de alta presión.

Un problema añadido es el elevado coste del platino para los catalizadores.

En la siguiente figura se muestra un esquema de un vehículo de este tipo.



Una batería permite el frenado regenerativo, aumentando la eficiencia energética.

La tecnología de los vehículos de célula de combustible está en desarrollo. La mayoría de los fabricantes de coches tienen en la actualidad prototipos de vehículos de célula de combustible. Se muestra en la siguiente fotografía un modelo fabricado por Honda



Política de incentivos

Desde el punto de vista del usuario, los vehículos eléctricos no presentan grandes ventajas, pues son caros, tienen poca autonomía y grandes tiempos de carga. Los beneficios que ofrecen no van directamente al usuario,

sino a la sociedad, pues están relacionados con la emisión de gases invernadero y contaminantes principalmente.

Los gobiernos, tanto estatales como municipales, deben establecer políticas de incentivos para este tipo de vehículos:

Subvenciones para la compra del vehículo

Reducciones o eliminación de impuestos.

Facilidades de aparcamiento.

Puntos de recarga gratuitos

Acceso a los centros de las ciudades.

Tarifas eléctricas especiales para la recarga nocturna.

Etc.

Algunos ejemplos de políticas de incentivos se muestran a continuación.

Country	Targets
Austria	2020: 100,000 EVs deployed ¹
Australia	2012: first cars on road, 2018: mass deployment, 2050: up to 65% of car stock ²
Canada	2018: 500,000 EVs deployed ³
China	2011: 500000 annual production of EVs ⁴
Denmark	2020:200,000 EVs ⁵
France	2020: 2,000,000 EVs ⁶
Germany	2020: 1,000,000 EVs deployed ⁷
Ireland	2020: 10% EV market share ⁸
Israel	2011: 40,000 EVs, 2012: 40,000 to 100,000 EVs annually ⁹
Japan	2020: 50% market share of next generation vehicles ¹⁰
New Zealand	2020: 5% market share, 2040: 60% market share ¹¹
Spain	2014: 1,000,000 EVs deployed ¹²
Sweden	2020: 600,000 EVs deployed ¹³
United Kingdom	No target figures, but policy to support EVs ¹⁴
USA	2015: 1,000,000 PHEV stock ¹⁵

En Málaga (España) se ha desarrollado el programa ZEM2ALL (Zero emissions to all) desde el año 2013 en colaboración del Ayuntamiento de Málaga, Telefónica I+D, Endesa, NEDO, Mitshubishi y otras compañías. El objetivo es la implantación del vehículo eléctrico en Málaga.

Conclusion

La implantación del vehículo eléctrico es necesaria para limitar la emisión de gases de efecto invernadero. La tecnología está muy desarrollada en los motores eléctricos y el control electrónico. El principal reto en el siglo XXI es el desarrollo de un sistema de almacenamiento de energía eficiente y competitivo, que dote al vehículo eléctrico de autonomía.

En el momento actual son necesarias políticas de incentivos que ayuden a su implantación.

References:

C. C. Chan and K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*. London, U.K.: Oxford Univ., 2001.

C. C. Chan, “An overview of electric vehicle technology,” *Proc. IEEE*, vol. 81, pp. 1202–1213, Sept. 1993.

“El transporte ecológico en el siglo 21 mediante vehículos eléctricos” (En chino). Beijing, China: Tsing Hua Univ. Press, 2000, National Key Book Series.

E. H. Wakefield, *History of the Electric Automobile: Battery-Only Powered Cars*. Warrendale, PA: Soc. Automotive Engineers, 1994.

History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles. Warrendale, PA: Soc. Automotive Engineers, 1998.

C. C. Chan. *The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles*. IEEE Press. 2012