



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en Revisión de Programas de Fomento a Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

Bogotá
Abril de 2018

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Proyecto: Identificación de los elementos y requisitos mínimos necesarios para la formulación, estructuración e implementación de un Observatorio de Energía que recopile y analice información que conduzca a oportunidades de innovación para lograr los objetivos del PEN 2050



Informe elaborado para la Unidad de Planeación
Minero Energética - UPME
Bogotá Abril de 2018

PROYECTO IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS Y REQUISITOS MÍNIMOS NECESARIOS PARA LA FORMULACIÓN, ESTRUCTURACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN OBSERVATORIO DE ENERGÍA QUE RECOPILE Y ANALICE INFORMACIÓN QUE CONDUZCA A OPORTUNIDADES DE INNOVACIÓN PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS DEL PEN 2050

REPÚBLICA DE COLOMBIA

Germán Arce Zapata – Ministro de Minas y Energía
Jorge Alberto Valencia Marín – Director Unidad de Planeación Minero Energética UPME
Carlos García - Subdirector de Demanda, Unidad de Planeación Minero Energética UPME

EQUIPO DE TRABAJO DEL PROYECTO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Grupo de Investigación en el sector energético colombiano GRISEC
Modelamiento Y Análisis Energía Ambiente Economía
InTIColombia.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA
Instituto de Prospectiva de la Universidad del Valle

CORPORACIÓN CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS
Director de proyecto: Omar Prias, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

EQUIPO DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DE EJERCICIOS DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA

Grupo de Investigación en el Sector Energético Colombiano GRISEC,
Unversidad Nacional de Colombia

Director: Omar Prias
Asesora Metdológica: Jenny Marcela Sánchez Torres
Coordinación: David Bernardo Rojas Rodríguez
Vigías Tecnológicos: Jair Armando Castañeda Rodríguez, Laura Milena Cruz Moreno, Luis Rafael de la Rosa Ramos Ramos, Sergio Andrés Rodríguez Blanco, Oscar Darío Zambrano.
Apoyo: Laura Marcela Quiroga Calderón

Contenido

Índice de Gráficos	5
Índice de Tablas	6
Presentación	7
1. Resumen Ejecutivo y Conclusiones	9
2. Introducción	12
3. Panorama general del tema	15
3.1. Panorama internacional	16
3.2. Panorama nacional	18
4. Descripción general del tema	20
4.1. Tendencias en almacenamiento de energía para vehículos eléctricos	21
4.1.1. <i>Sistemas de almacenamiento mecánico (MSS)</i>	22
4.1.2. <i>Sistemas de almacenamiento electroquímico (EcSS)</i>	23
4.1.2.1. <i>Baterías de flujo (FB)</i>	24
4.1.2.2. <i>Baterías secundarias (SB)</i>	24
4.1.3. <i>Sistema de almacenamiento químico (CSS)</i>	26
4.1.4. <i>Sistemas de almacenamiento eléctrico (EeSS)</i>	27
4.1.4.1. <i>Ultracapacitores (UC)</i>	27
4.1.4.2. <i>Bobinas superconductoras (SMES)</i>	27
4.1.5. <i>Sistemas de almacenamiento térmico (TSS)</i>	28
4.1.6. <i>Sistemas de almacenamiento híbrido (HSS)</i>	28
4.2. <i>Sistemas de generación de energía</i>	29
4.2.1. <i>Celda fotovoltaica (PV)</i>	29
4.2.2. <i>Generador termoeléctrico (ATEG)</i>	29
4.2.3. <i>Frenado regenerativo</i>	29
4.3. <i>Programas de apoyo e iniciativas para los vehículos eléctricos (revisión internacional)</i>	30
4.3.1. <i>Características de los programas</i>	31
4.3.1.1. <i>Incentivos</i>	32
4.3.1.2. <i>Infraestructura para vehículos eléctricos</i>	34
4.3.1.2.1. <i>Costos de la infraestructura de carga</i>	38
4.3.1.3. <i>Estándares y tipos de cargadores</i>	38
4.3.1.3.1. <i>Regulaciones de códigos de construcciones</i>	39
4.3.1.4. <i>Hábitos de recarga</i>	39
4.4. <i>Impactos en el sector energético</i>	40
4.4.1. <i>Impacto a la red eléctrica</i>	40
4.4.2. <i>Impactos económicos</i>	42
4.4.3. <i>Impacto medio ambiental</i>	43
4.5. <i>Barreras para la implementación de los vehículos eléctricos</i>	43
4.6. <i>Problemas para la implementación de VE en Latinoamérica</i>	43
4.6.1. <i>Costo inicial del VE</i>	44
4.6.2. <i>Costo total de la propiedad</i>	45

4.6.3. Recomendaciones	46
5. Referencias Bibliográficas	48
Anexos	51
Anexo 1. Anexo Metodológico	52
Anexo 2. Ecuaciones de Búsqueda	53
Anexo 3. Marco regulatorio en Colombia	55
A3.1. Barreras encontradas en Colombia	56
A3.1.1. Institucional	56
A3.1.2. Económicas	56
A3.1.3. Tecnológicas	56
A3.1.4. Normativas	56
Anexo 4. Tipos de vehículos	57
A4.1. Vehículos de combustión interna (ICEVs)	57
A4.2. El nuevo vehículo eléctrico (NEV)	58
Anexo 5. Sistemas de recarga para vehículos eléctricos	62
A5.1. Tipos de infraestructuras de carga	62
A5.2. Cargadores	63
A5.3. Estándares	63
A5.4. Gestión de la Información	65
Anexo 6. Barreras identificadas para la implementación de VE	66
Anexo 7. Boletines de Vigilancia tecnológica	69

Índice de Gráficos

- Ilustración 1.** Línea del tiempo de los vehículos eléctricos.
- Ilustración 2.** Evolución del inventario global de vehículos eléctricos.
- Ilustración 3.** Distribución de consumos y emisiones por sectores (2015)
- Ilustración 4.** Distribución del consumo por categoría vehicular – Transporte carretero
- Ilustración 5.** Clasificación de los ESS presentes y en investigación para los VE
- Ilustración 6.** Estructura básica de un FES
- Ilustración 7.** Estructura básica de un SMES
- Ilustración 8.** Sistemas alternos para la generación de energía.
- Ilustración 9.** Inventario de los puntos de recarga a nivel mundial.
- Ilustración 10.** Ventas de VE en el 2016 y cantidad de puntos de recarga por millón de habitantes.
- Ilustración 11.** Costo de la instalación de puntos de carga en los principales mercados de VE.
- Ilustración 12.** Hábitos de carga presentes en los usuarios de VE en Noruega.
- Ilustración 13.** Desarrollo de infraestructura de carga en construcciones con número creciente de VE.
- Ilustración 14.** Comparación del costo total de propiedad para los ICEV, HEV y BEV para Colombia
- Ilustración 15.** Clasificación de los vehículos
- Ilustración 16.** Flujo de energía típico en un vehículo de combustión interna
- Ilustración 17.** Configuraciones electromecánicas de los HEV en: (a) serie, (b) paralelo, (c) serie-paralelo; y de los PHEV en: (a) serie, (b) paralelo, (c) serie-paralelo
- Ilustración 18.** Configuración electromecánica del BEV
- Ilustración 19.** Cargadores AC más populares en el mercado.
- Ilustración 20.** Cargadores DC más populares en el mercado.

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de las características las baterías utilizadas y en investigación de los VE

Tabla 2. Resumen de peso y volumen de diferentes tanques

Tabla 3. Métodos para recuperar energía del frenado

Tabla 4. Resumen de los informes revisados de VE a nivel mundial

Tabla 5. Evaluación cualitativa de las acciones implementadas a nivel mundial para impulsar el mercado de los VE

Tabla 6. Revisión de los incentivos implementados a nivel mundial

Tabla 7. Programas de infraestructura implementados a nivel mundial

Tabla 8. Comparación del precio de venta entre VE y ICEVs (sin impuestos)

Tabla 9. Estructura tributaria para VE en seis países latinoamericanos

Tabla 10. Principales normas para la incorporación de VE

Tabla 11. Resumen de las características de los ICEVs y NEVs

Tabla 12. Clasificación de los niveles de carga para VE

Tabla 13. Barreras para la adquisición del VE

Tabla 14. Barreras para la instalación y utilización de la estación de carga

Tabla 15. Barreras asociadas a los efectos potenciales de la adopción de los VE



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en Revisión de Programas de Fomento a Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

Presentación



Bogotá
Abril de 2018

Presentación

El Plan Energético Nacional 2050 (PEN 2050) se presentó en el 2015, como una base para la implementación de una política energética colombiana a largo plazo. En él se realiza una revisión de los cambios técnicos, de negocios, aumento de la cobertura, garantía del suministro, diversificación de la canasta energética y aumento de la competitividad, como elementos modeladores del futuro energético del país. De igual manera, se hace un análisis de la relación economía – energía en Colombia, se estudian las perspectivas del mercado de los hidrocarburos y se plantea un escenario energético base nacional a 2050 y cuatro escenarios alternativos.

Teniendo como foco este documento, en el marco del proyecto Universidad Nacional - UPME para la “Identificación de los elementos y requisitos mínimos necesarios para la formulación, estructuración e implementación de un Observatorio de Energía, que recopile y analice información que conduzca a oportunidades de innovación para lograr los objetivos del PEN 2050”, se estructuraron un conjunto de ejercicios de vigilancia tecnológica, para identificar las tendencias actuales asociadas a las variables principales que modelan los escenarios energéticos del PEN 2050.

El presente trabajo recoge los resultados del ejercicio de vigilancia tecnológica en la investigación de almacenamiento de energía en vehículos eléctricos en el periodo 2008 – 2018, donde se evidencian sus ventajas, desventajas y características de infraestructura necesarias para la penetración de tecnologías de transporte de bajas y cero emisiones, que puedan orientar las decisiones en materia de políticas energéticas en Colombia a corto, mediano y largo plazo. Este aspecto representa un elemento central del escenario, para identificar las tendencias en investigación para infraestructura de vehículos de bajas y cero emisiones.

Mediante las conclusiones del ejercicio, se espera contar con elementos para facilitar el monitoreo sistemático de los aspectos más relevantes en la dinámica energética del país de cara al 2050. Lo anterior representa una de las funciones principales del Observatorio de Energía que se plantea desde el proyecto, para facilitar la toma de decisiones en materia de política energética.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en Revisión de Programas de Fomento a Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

1. Resumen Ejecutivo

Bogotá
Abril de 2018

1. Resumen Ejecutivo y conclusiones

A continuación, se presenta el resumen ejecutivo y las conclusiones más relevantes, producto del informe de vigilancia tecnológica.

La preocupación mundial sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y su efecto en el cambio climático, ha conducido al logro de acuerdos para alcanzar mejores tasas de descarbonización en todos los sectores de la economía y a la reactivación de la producción del vehículo eléctrico (VE), después de haber desaparecido del mercado en 1935 (**Ilustración 1**). Las acciones regulatorias realizadas que se desprenden de dichos acuerdos han enviado señales al mercado para establecer el ecosistema del VE y se configuran como una de las herramientas que contribuyen a alcanzar dichos objetivos, siempre y cuando utilicen energías renovables para su operación; a través de esto se ha logrado sobrepasar los dos millones de unidades en el 2016 a nivel mundial (**Ilustración 2**).

Colombia cuenta con algunas políticas encaminadas al uso racional y eficiente de la energía, gracias a las cuales se han podido realizar importaciones de VE con exenciones de impuestos. Sin embargo, la discontinuidad de las políticas tomadas a nivel local ha frenado su implementación y generado una gran barrera para poder conocer las conclusiones en el contexto del país.

Distintos tipos de VE se pueden encontrar en el mercado (**Ilustración 15**), siendo las baterías (principalmente de litio) los sistemas de almacenamiento de energía (ESS, por sus siglas en inglés) más usados actualmente. No obstante, aún no satisfacen totalmente los requerimientos técnicos para proporcionar autonomía en grandes distancias a los VE, por lo que todavía se están desarrollando mejoras, desde la investigación en ciencia de materiales hasta la consideración de sistemas híbridos que contemplen otros ESS dentro del VE, para suplir necesidades técnicas específicas.

En los países desarrollados se han implementado programas para estimular el mercado de los VE, por medio de medidas para incentivar sus ventas y lograr una mayor independencia energética, descarbonar el transporte y alcanzar los objetivos con relación al cambio climático. Como parte de estas medidas, la investigación y desarrollo (I+D) junto con la masificación de los VE, han logrado reducir sus costos. Igualmente, el acelerado desarrollo de infraestructura de carga de nivel 1, 2 y DC (rápida) por parte de las organizaciones tanto públicas como privadas, se consideran antecedentes para mejorar la penetración del VE en el mercado (como en el caso de Noruega).

Dentro de los principales hallazgos de los programas, está la necesidad de tener más capacidad de generación para la demanda de energía adicional, de modo que los costos del kW/h no aumenten y la operación del VE no se vea afectada (Yong, Ramachandaramurthy, Tan, & Mithulananthan, 2015). También se encontró que su impacto ambiental (cuantificado en emisiones de GEI) depende directamente de la fuente de energía eléctrica utilizada para su recarga.

El despliegue de los VE mediante el desarrollo de la infraestructura pública (nivel 2 y DC) y diferentes incentivos promovidos por los gobiernos (incentivos financieros, no financieros, regulaciones) son claves para el crecimiento del mercado y pueden ser rentables para la operación de la red eléctrica si las medidas como difusión de información a los usuarios, estrategias de recarga (mejores prácticas), carga coordinada y políticas de tarifas de electricidad

se emplean satisfactoriamente con el objetivo de evitar problemas técnicos y económicos futuros (Yong et al., 2015). Tal es el caso de los cargadores AC monofásicos y el método de carga rápida.

La infraestructura de carga ideal para cada país depende de sus características demográficas, geográficas, culturales y de acceso a los lugares donde están presentes, es decir, no existe una regla única a seguir para instalar un determinado número de puntos de carga residencial, público o de carga rápida (**Ilustración 10**). La aceptación de varios estándares de carga evita que en el futuro continúe creciendo el mercado del VE, debido a problemas de flexibilidad entre regiones en las que el usuario necesita usar su vehículo.

Las normas de construcción deben ser ajustadas prontamente para exigir puntos de conexión para recargar los VE en edificaciones nuevas de tipo residencial, comercial y público. Mediante estas medidas se logra reducir los costos de implementación de puntos de recarga, que pueden generarse por rediseños e instalación de las conexiones eléctricas.

La identificación de las barreras presentes en la implementación de los VE en los programas revisados (ver Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15), permiten que los tomadores de decisiones en la planeación energética, ajusten las medidas que se tomen en el país y en el contexto latinoamericano, teniendo en cuenta que los recursos fiscales son menores comparados con los países desarrollados.


Descriptores: Electric vehicle, EV, new energy vehicle, battery electric vehicle, hybrid electric vehicle, plug-in hybrid electric vehicle, pure electric vehicle, all-electric vehicle, fuel cell vehicle, electricity storage, electrical energy storage system, energy storage, energy storage system, electric vehicle technologies, EV technologies, EV deployments.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en Revisión de Programas de Fomento a Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

2. Introducción



Bogotá
Abril de 2018

2. Introducción

El sector del transporte es uno de los consumidores mayores de energía en Colombia y sus fuentes actuales son principalmente los combustibles fósiles. Las tendencias consignadas en el análisis del PEN2050 pronostican cambios en las fuentes de energía para este sector y en las tecnologías que puedan ser implementadas en Colombia, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de los instrumentos que pueden contribuir al cumplimiento de los objetivos del PEN2050, se encuentran los vehículos eléctricos (VE), los cuales están enfocados en el aprovechamiento de las energías renovables. Sin embargo, un gran desafío que se enfrenta actualmente para su desarrollo y masificación, es encontrar un sistema de almacenamiento de energía (ESS, por sus siglas en inglés) que se adecue a los requerimientos de seguridad, tamaño, costo y gestión.

Por lo tanto, realizar las actividades de vigilancia a las tecnologías emergentes en almacenamiento de energía en vehículos eléctricos resulta de gran ayuda para guiar las decisiones del sector energético colombiano, tanto de las organizaciones estatales de planeación¹, como de las entidades privadas enmarcadas dentro del mapa de ruta para la transición al uso de este tipo de vehículos.

El presente informe está enfocado en la búsqueda, descripción y análisis de las distintas tecnologías emergentes de almacenamiento de energía en vehículos eléctricos, durante el periodo 2008-2018, encaminadas a incrementar su capacidad de energía. Además se revisan los métodos, tecnologías y normas para la carga de energía en los VE, donde se evidencian sus ventajas y desventajas, siendo resultado de un ejercicio de Vigilancia Tecnológica planteado a partir de las siguientes preguntas: **¿cuáles son las tecnologías en investigación para el almacenamiento de energía en VE, sus ventajas y desventajas? y ¿cuáles son las características de los programas (promoción o fomento) que están siendo implementados en países de referencia para dar soporte y apoyo a la recarga de VE?**

La primera parte del documento consiste en una descripción básica del panorama internacional en vehículos eléctricos, con el fin de contextualizar al lector en el propósito de la implementación de esta tecnología, los sucesos más relevantes a través del tiempo y el inventario mundial actual. El panorama nacional también es revisado con el objetivo de presentar las características del territorio colombiano.

Seguido a ello, se presentan las tecnologías emergentes en almacenamiento de energía en VE, así como sus sistemas de generación de energía mediante una descripción general, características intrínsecas, así como sus ventajas y desventajas.

Los componentes del sistema de carga son revisados en tres apartados: cargadores, infraestructura y normas; dichos componentes son esenciales para el adecuado desarrollo, funcionamiento y acople entre los puntos y/o estaciones de carga y los VE. A continuación, se muestra una revisión de los impactos económicos, medioambientales y técnicos (en la red eléctrica) ocasionados por su entrada potencial.

Finalmente se presenta una revisión de los programas de soporte y apoyo a la recarga de vehículos eléctricos a nivel mundial, los cuales contienen los principales avances e implementaciones en infraestructura de los países líderes en este tema.

1. Es el caso de la UPME como entidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía encargada de la planeación integral del sector energético colombiano por medio del cumplimiento de sus funciones, entre las cuales está la producción y divulgación de información requerida para la toma de decisiones y la formulación de política pública.

Tema Principal: Almacenamiento de energía en vehículos eléctricos**Ámbito de Aplicación:****Objetivo principal del informe:**

Identificar características de infraestructura para la penetración de tecnologías de transporte de bajas y cero emisiones, que puedan orientar las decisiones en materia de políticas energéticas en Colombia a corto, mediano y largo plazo.

Objetivos específicos del informe:

- Identificar y caracterizar las tecnologías de almacenamiento de energía en investigación para vehículos eléctricos.
- Identificar y caracterizar los sistemas de generación que se han estudiado para proveer energía a los VE.
- Determinar las características de los programas implementados en países de referencia para dar soporte y apoyo a la recarga de VE.

Metodología²

La vigilancia "es el esfuerzo sistemático y organizado por la empresa de observación, captación, análisis, difusión precisa y recuperación de información sobre los hechos del entorno económico, tecnológico, social o comercial, relevantes para la misma por poder implicar una oportunidad u amenaza para ésta" (Palop & Vicente, 1999) y tal como plantean Sánchez y Palop (Sánchez-Torres & Palop Marro, 2002), es un proceso sostenido en el tiempo de carácter cíclico denominado Ciclo de Vigilancia Tecnológica.

Este ciclo inicia con la fase de identificación de necesidades, fuentes y medios de acceso de información; es decir, determinar cuáles fuentes y qué información se necesita, así como, qué recursos y tecnologías de información y comunicación hay disponibles en la organización (Arango Alzate, Tamayo Giraldo, & Fadul Barbosa, 2012). Para este caso, se realizó, junto con un experto, un estudio de necesidades de inteligencia competitiva, de acuerdo con el modelo de Herring (Herring, 1999), a partir del cual se construyó una ficha de necesidades de vigilancia, que recibió validación por parte de la Unidad de planeación Minero Energética del Ministerio de Minas y Energía (En adelante UPME).

Posteriormente, se realizó la fase de análisis, a partir de la información recolectada en la fase de la búsqueda, se desarrollaron procesos de lectura de primer y segundo nivel, filtrado y categorización de la información, análisis cuantitativo de las publicaciones, mediante el Software Mattheo Analyzer, y organización general de los resultados, que responden a las cuestiones críticas de vigilancia identificadas en la ficha de necesidades.

Finalmente, se realiza la fase de inteligencia, la cual "consiste en el análisis de los impactos que la información, antes recolectada, puede tener sobre la estrategia de la empresa [de UPME para este caso]. Es decir, darle el valor añadido a la información. Esta fase está íntimamente ligada con la etapa de análisis (Sánchez-Torres, 2017). El ciclo debe finalizar con la comunicación de los resultados de vigilancia a los entes decisores, siendo este documento el resultado de esta etapa.

2. Para mayor detalle consultar el anexo anexo metodológico

A silver Tesla Model 3 is shown from a high-angle rear perspective, driving on a paved road that curves to the left. The road is lined with green trees and grass. The car's license plate reads 'MODEL 3'.

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en Revisión de Programas de Fomento a Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

3. Panorama general del tema

Bogotá
Abril de 2018

3. Panorama general del tema

3.1. Panorama internacional

Debido al agotamiento de las fuentes y reservas de combustibles fósiles, y a las problemáticas asociadas a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el aumento de la temperatura en el planeta y sus efectos sobre la salud pública, los gobiernos y organizaciones a nivel mundial se encuentran interesados en implementar soluciones que permitan mitigar dichos impactos y promover la descarbonización en las actividades económicas. Esto se sintetiza en el Acuerdo de París, el cual tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático y adaptación a sus efectos adversos, por medio del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2015).

Según la IEA el sector transporte consume cerca del 27% de la energía y emite el 33,7% de las emisiones de GEI en todo el mundo. Adicionalmente, el vehículo de combustión interna (ICE) utiliza entre el 15% al 40% de la energía total en la operación del sistema (Tie & Tan, 2013).

Entre las ideas planteadas para lograr reducir las emisiones de GEI provenientes del sector de transporte, se encuentra el desarrollo de métodos de propulsión más limpios, como el nuevo vehículo eléctrico (NEV), mediante iniciativas, regulaciones, políticas y programas; además para mejorar la seguridad energética, diversificar las fuentes de energía y crear industrias avanzadas (Hannan, Hoque, Mohamed, & Ayob, 2017a; Guizhou Ren, Ma, & Cong, 2015; Yong et al., 2015).

Sin embargo, el reto actual es aminorar los costos de las baterías, debido a que alcanzan a representar una tercera parte del costo del vehículo, y aumentar su capacidad de almacenamiento de energía (Dixon, 2010; Tie & Tan, 2013), la cual es mucho menor a la ofrecida por la gasolina (alrededor de 150 Wh/kg de las baterías frente a 12000 Wh/kg de la gasolina), resultando en grandes barreras para una mayor masificación. Por ello, el desarrollo continuo de las tecnologías de almacenamiento de energía para vehículos eléctricos se considera un factor crucial para mejorar el desempeño del vehículo y su competitividad en el mercado actual.

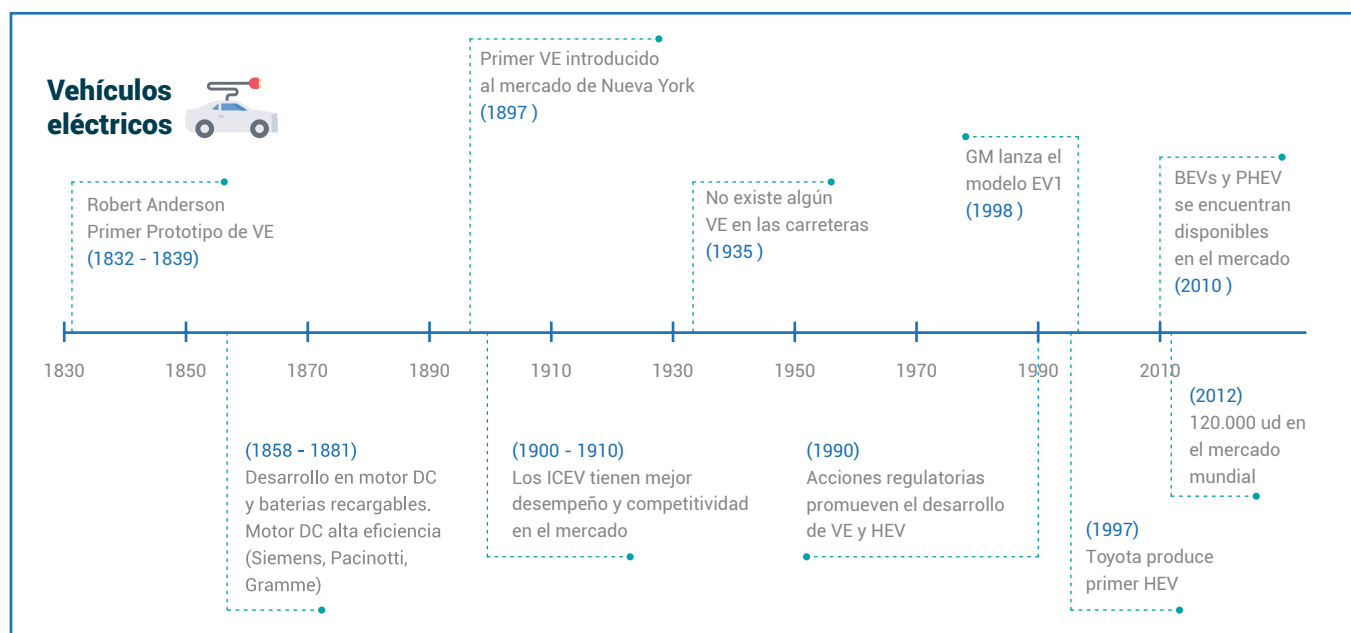
Paralelamente, se han desarrollado nuevos métodos para proveer una carga rápida del sistema, tanto en corriente alterna (AC) como en corriente continua (DC), y ofrecer mayor confiabilidad y flexibilidad a los vehículos eléctricos (Yong et al., 2015).

Si bien, como se puede observar en la Ilustración 1, los primeros prototipos de vehículos eléctricos (VE) fueron desarrollados entre 1832 y 1839, la incursión de los vehículos de motor de combustión interna (ICEVs) a inicios del siglo XX con mejores características de desempeño y autonomía, imposibilitó un mayor desarrollo y masificación de los VE.

Desde la década de los noventa hasta la actualidad, las acciones regulatorias tendientes a reducir las emisiones de GEI y diversificar la canasta de energéticos (no depender de los combustibles fósiles), han incentivado la reaparición e implementación de VE mediante acuerdos intergubernamentales, desarrollo de infraestructura de carga y producción en masa.

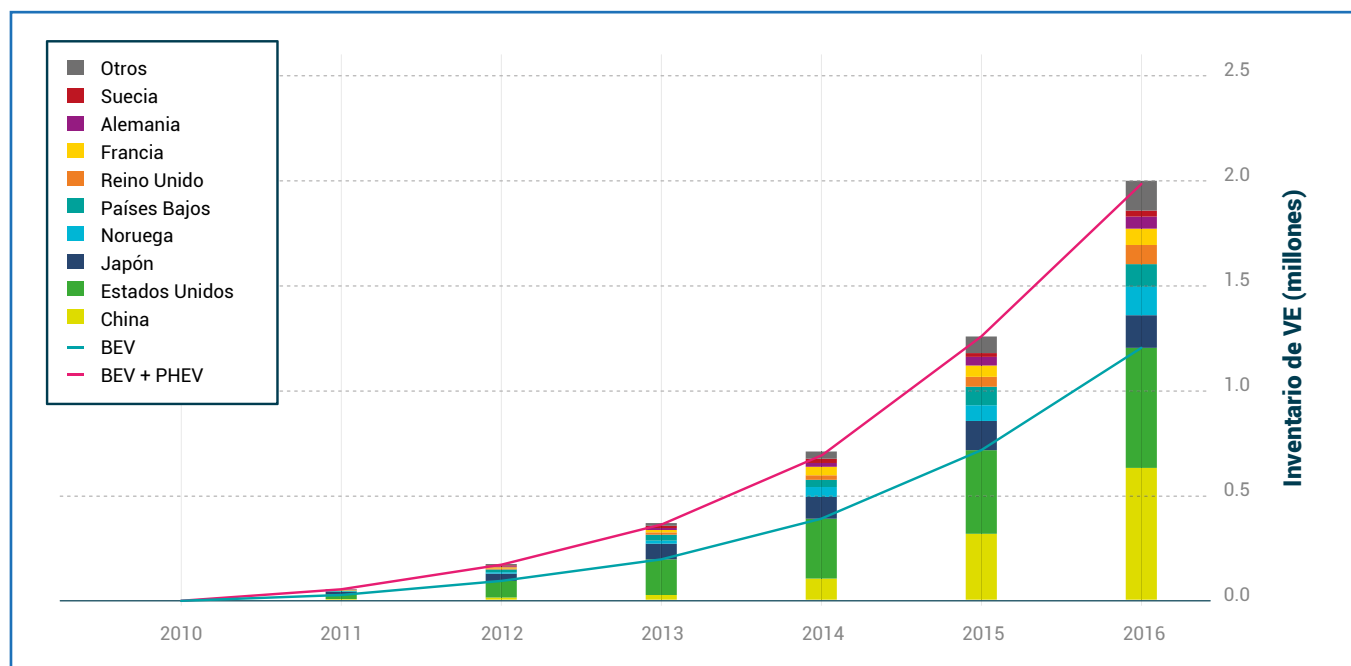
El mercado de vehículos eléctricos pasó, en seis años, de no tener representación en el mercado de vehículos a tener un rápido crecimiento y ser parte importante de éste, debido a las ventajas que ofrece como una mayor eficiencia del sistema y menores costos asociados a pérdidas energéticas (Hall & Lutsey, 2017).

Ilustración 1. Línea del tiempo de los vehículos eléctricos.



Fuente. Elaboración propia basada en (Yong et al., 2015)

A partir de los principales desarrollos industriales realizados desde el 2010, se ha presentado un incremento exponencial de las ventas de los VE. Según la IEA, en el 2016 se presentó un nuevo record de ventas en el mundo, y se logró un inventario total mayor a dos millones de unidades, después de haber sobrepasado el millón en el 2015, siendo China el mercado más grande para este tipo de vehículos. Por su parte, Noruega es el líder en penetración del mercado ya que tiene el 29% del total de sus vehículos en tecnología eléctrica. Este crecimiento ha sido posible gracias al desarrollo paralelo de infraestructura de carga pública y privada, el cual fue del 72% en el 2016 (International Energy Agency, 2017).

Ilustración 2. Evolución del inventario global de vehículos eléctricos

Fuente. (International Energy Agency, 2017)

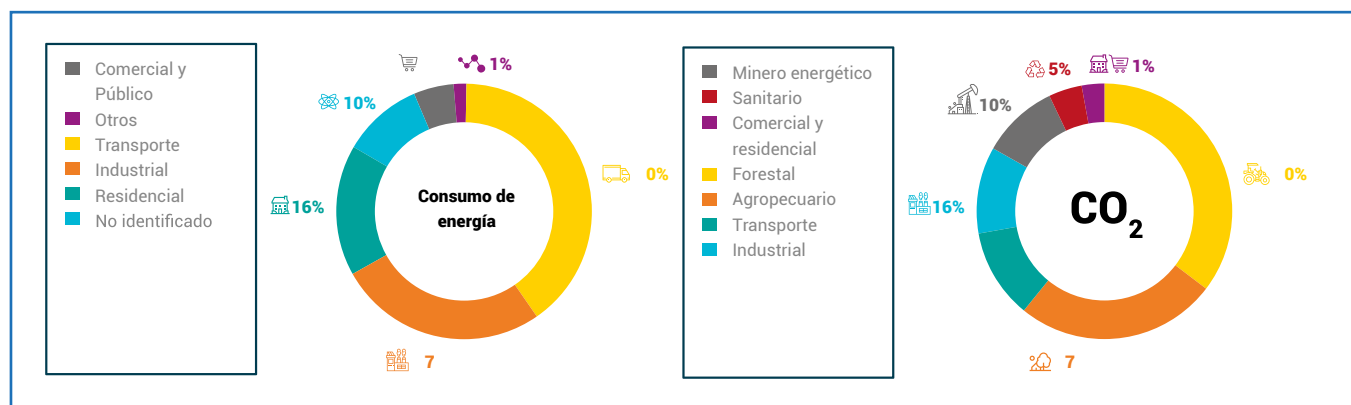
3.2. Panorama nacional

Esta sección presenta el contexto colombiano, sus características geográficas, información relevante y generalidades enmarcadas en el diagnóstico del sector transporte, teniendo como fuente principal el informe de vehículos de bajas y cero emisiones³ realizado por Ernst & Young para la UPME.

Colombia presenta características particulares, como perfiles geográficos muy variados con todos los pisos térmicos, densidad poblacional total baja con respecto a la totalidad del territorio, aunque la mayoría de habitantes se encuentran aglomerados en las grandes ciudades (Bogotá, Medellín, Cali), las cuales están distantes entre sí y se encuentran incrustadas en valles interandinos. Los corredores entre puertos y ciudades presentan accidentes topográficos y distancias considerables (ej: 516 km, Buenaventura-Bogotá).

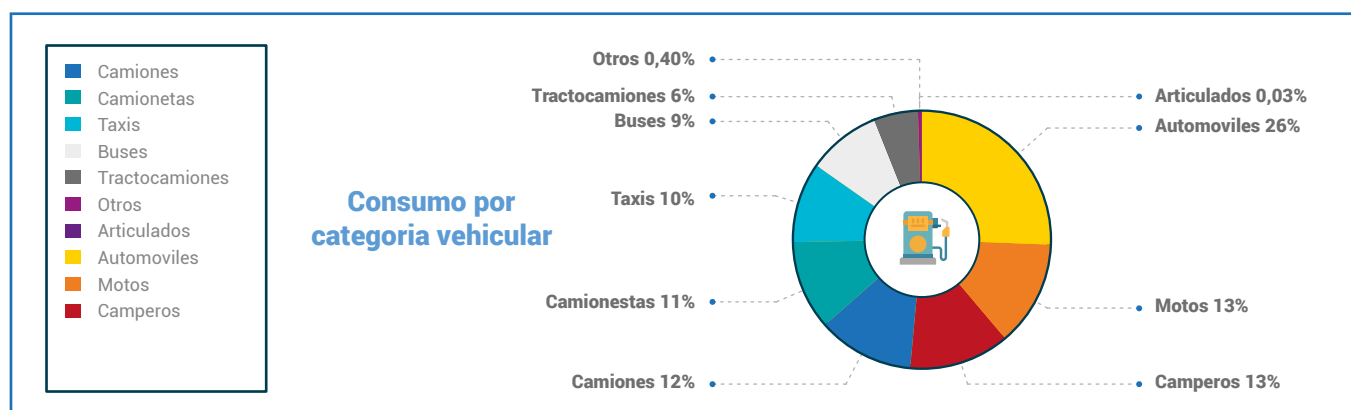
El sector transporte es el mayor consumidor de energía en el país, ya que usa 494.540 TJ (abastecido principalmente por combustibles fósiles), representando el 40% del total del consumo de energía para el 2015 y el 11% de las emisiones GEI en el país, siendo el subsector carretero el que más aporta con un 90% dentro del total del sector. Los vehículos de pasajeros y de carga representaron el 99% del total del parque automotor para el 2015 (12.119.782 de los 12.127.254), en comparación, los vehículos eléctricos en Colombia representaron el 0,01%, es decir 770 vehículos para enero de 2017.

3. Para obtener mayor información, remítase a (EY, 2017).

Ilustración 3. Distribución de consumos y emisiones por sectores (2015)

Fuente: (EY, 2017), informe en construcción

Los automóviles consumen el 26% de la energía en el sector transporte, seguido por las motos y los camperos, ambos con una participación del 13% como se puede observar a continuación.

Ilustración 4. Distribución del consumo por categoría vehicular – Transporte carretero

Fuente: (EY, 2017), informe en construcción

Colombia cuenta con bases regulatorias para la implementación de vehículos eléctricos por medio de políticas de incentivos y planes piloto ejecutadas desde el PROURE⁴, el Plan Energético Nacional, POTs municipales y planes indicativos de la UPME con el objetivo de adoptar esta tecnología en la matriz de consumo energético del país y abogando por el uso racional y eficiente de la energía, y en las que se han identificado varias barreras durante su ejecución (ver Anexo 3. Marco regulatorio en Colombia).

4. Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en
Revisión de Programas de Fomento a
Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

4. Descripción general del tema



Bogotá
Abril de 2018

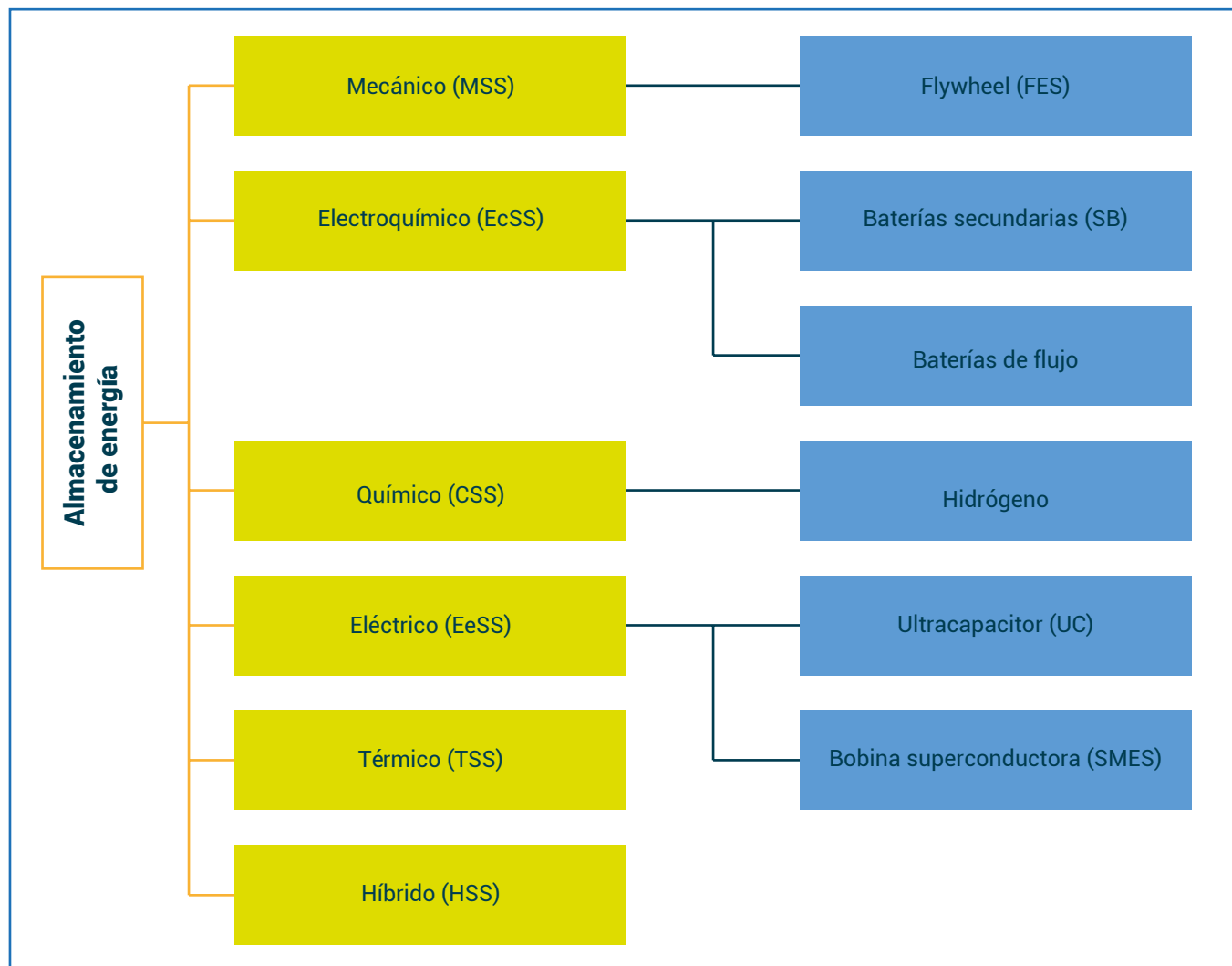
4. Descripción general del tema

Atendiendo a las preguntas de vigilancia planteadas y a las fuentes consultadas para su validación, se desarrolló el ejercicio de vigilancia tecnológica, por medio de la identificación de tres categorías de vehículos: combustible fósil, eléctrico o híbrido, las cuales se diferencian por la fuente de energía que utiliza el vehículo para su funcionamiento (ver Anexo 4. Tipos de vehículos). Seguido a ello, se procedió a caracterizar los distintos tipos de tecnologías para almacenamiento y generación de energía para los vehículos eléctricos, que se están aplicando y/o se encuentran en investigación. Finalmente se revisaron las características de los programas, implementados en países de referencia, para dar soporte y apoyo a la recarga de vehículos eléctricos.

4.1 Tendencias en almacenamiento de energía para vehículos eléctricos

Los sistemas de almacenamiento de energía (ESS, por sus siglas en inglés) son dispositivos que almacenan energía en un tipo específico. Actualmente, resultan de gran importancia para respaldar a la red eléctrica durante horas de congestión, y aprovechar los recursos provenientes de energías renovables para reducir las emisiones de CO₂ (Hannan et al., 2017a). A partir de la revisión de los tipos de vehículos y sus configuraciones electromecánicas, se procedió a encontrar las diferentes clasificaciones de tecnologías utilizadas en vehículos NEV para el almacenamiento de energía.

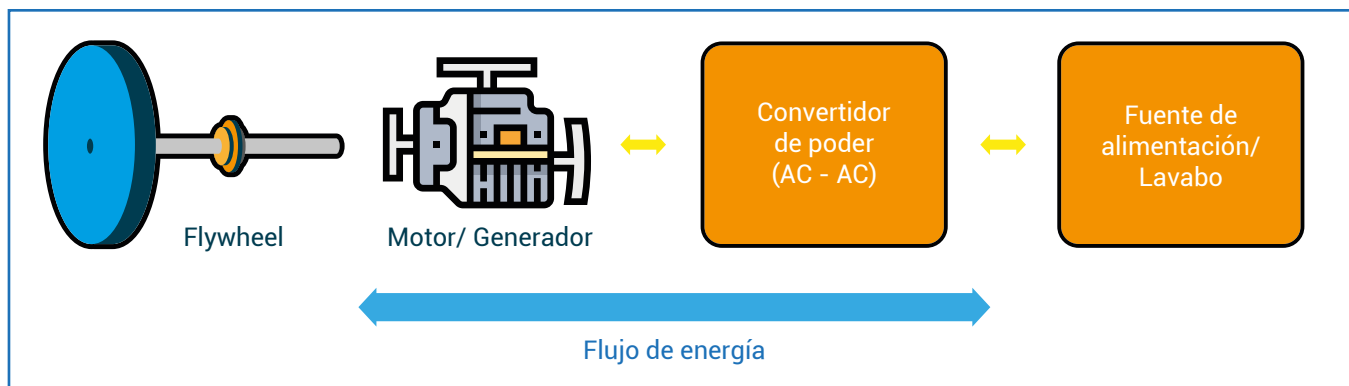
De acuerdo a Hannan et al. (2017), los ESS pueden ser, de acuerdo con la energía procesada, de carácter mecánico, electroquímico, químico, eléctrico, térmico e híbrido. La Ilustración 5 presenta la clasificación de ESS en detalle, donde los más comunes para la aplicación de vehículos eléctricos son los volantes de inercia (FES), las baterías electroquímicas secundarias (BES), las celdas de combustible (FC), los ultracapacitores (UCES), las bobinas magnéticas superconductoras (SMES) y los sistemas híbridos (HES).

Ilustración 5. Clasificación de los ESS presentes y en investigación para los VE

Fuente: Elaboración propia a partir de (Hannan et al., 2017a)

4.1.1. Sistemas de almacenamiento mecánico (MSS)

El almacenamiento de energía por medio del volante de inercia, más conocido como FES (Flywheel Energy Storage), es un tipo de MSS que se encuentra entre los dispositivos más investigados para los vehículos eléctricos. Los FES son dispositivos que almacenan energía cinética por medio de un rotor a gran velocidad, que luego se utiliza o transforma directamente en energía eléctrica, a medida que la velocidad del FES disminuye (Dixon, 2010; Guizhou Ren et al., 2015; Tie & Tan, 2013). El volante comprende un cuerpo cilíndrico giratorio en una cámara, y un dispositivo de transmisión de energía, es decir, un generador (o motor) en un eje común (Hannan et al., 2017a). La energía del FES se aplica a través de una transmisión especial para alimentar parcial o totalmente el vehículo. Este tipo de sistema puede ofrecer hasta una reducción del 25% en el consumo de combustible, como lo comprobó Volvo en el 2013, al aplicar esta tecnología a su sedan S60 (Guizhou Ren et al., 2015).

Ilustración 6. Estructura básica de un FES

Fuente: (Hannan et al., 2017a)

Entre las principales ventajas de los sistemas FES se pueden enumerar su alta densidad de energía y potencia, eficiencia mayor al 90%, carga y descarga rápidas con ciclos teóricamente infinitos, bajo costo y mantenimiento, largo ciclo de vida, no produce emisiones de GEI y sin efecto de descarga profunda (DOD). Si el sistema FES es utilizado para transformar energía desde el frenado regenerativo, la eficiencia supera el 70% (el doble de eficiencia del sistema frenado regenerativo-energía eléctrica-FES). Entre las desventajas están sus características de auto descarga debido al viento, pérdidas por fricción, condiciones inseguras de funcionamiento y la fuerza giroscópica (Guizhou Ren et al., 2015; Tie & Tan, 2013). Actualmente los sistemas FES se aplican durante largos períodos de servicio en combinación híbrida para la aplicación de almacenamiento de energía de los VE (Dixon, 2010; Hannan et al., 2017a; Tie & Tan, 2013).

Investigaciones recientes trabajan en el mejoramiento del sistema, y han llevado a cabo el desarrollo del volante de inercia de ultra-alta velocidad (UHSFES), que presenta mejores características de densidad de energía (100-130 Wh/kg) y potencia.

4.1.2. Sistemas de almacenamiento electroquímico (EcSS)

Los EcSS se encuentran representados en las baterías, siendo los dispositivos más importantes para el almacenamiento de energía en la actualidad. Se componen de una o más celdas que transforman la energía química en eléctrica y viceversa. El problema de este proceso es la reducción del ciclo de vida y la capacidad de almacenamiento (Dixon, 2010; Hannan et al., 2017a; Tie & Tan, 2013). Por ello, en el corto plazo se considera que las baterías serán los dispositivos más importantes para el desarrollo de vehículos eléctricos HEV, PHEV y BEV (Guizhou Ren et al., 2015). Sin embargo, existen algunas restricciones presentes en la tecnología, que se traducen en grandes barreras para la adopción a gran escala del VE como lo son sus costos, el corto ciclo de vida y la baja densidad de energía, comparado con la energía almacenada en el combustible fósil del ICEV (Yong et al., 2015).

Hannan et al. (2017) muestra una clasificación de las baterías de acuerdo a sus propiedades químicas: las baterías de flujo (FB) y las baterías secundarias.

4.1.2.1. Baterías de flujo (FB)

En las FB la energía se almacena en especies electroactivas, las cuales se disuelven en un electrolito líquido en tanques, que se bombea a través de una celda electroquímica para convertir la energía química en energía eléctrica. Las FB tienen una expectativa de vida de 15 a 20 años, un rango de descarga de 4 a 10 h y una eficacia del 60 al 70%. La batería de flujo redox (RFB) es una FB y muestra una alta estabilidad en el ciclo de vida, alta eficiencia, flexibilidad en potencia y demanda de capacidad, lo que hace que las RFB sean una buena opción para los vehículos eléctricos. Otro tipo de FB es la batería de flujo híbrido (HFB) la cual se compone de una batería secundaria (SB) y una RFB; su capacidad se define por el tamaño de la celda electroquímica.

4.1.2.2. Baterías secundarias (SB)

Las SB son los principales dispositivos encontrados en el mercado para la aplicación en los VE, debido a sus características de alta densidad de energía y de potencia, perfil de descarga plana, efecto memoria despreciable y amplio rango de temperatura de operación. Su principal desventaja radica en la utilización de materiales tóxicos para su fabricación.

En la Tabla 1 se muestran los seis tipos de baterías que se encuentran comúnmente en los ICEVs y VE según Dixon (2010) y Tie & Tan (2013):

Tabla 1. Resumen de las características las baterías utilizadas y en investigación de los VE

Batería	Ventajas	Desventajas
Plomo-ácido	Tecnología madura Bajo costo	Baja densidad de energía Requiere Inspección de electrodos Contiene componentes tóxicos que causan daños medioambientales Corto ciclo de vida Gran peso
A base de níquel	Tecnología madura Alta densidad de energía comparada con la de plomo-ácido Bajo daño medioambiental	Baja eficiencia de carga y descarga Alta tasa de autodescarga Corto ciclo de vida Gran peso Alto costo de mantenimiento Presenta efecto memoria Mal desempeño a bajas temperaturas.
ZEBRA (zero emission battery research activity)	Alta densidad de energía Alta densidad de potencia Largo ciclo de vida Bajo costo Operación segura Robusta	Pérdidas de energía debido a autodescargas Requiere medidas de seguridad debido a su alta temperatura de operación (300 a 350 °C) Gran peso
Litio	Alta densidad de energía Alta densidad de potencia Peso ligero No presentan efecto memoria No contiene componentes tóxicos Tecnología en constante desarrollo Se pueden recargar rápidamente	Alto costo Un mal funcionamiento de la batería puede causar incendio o explosión Requiere protecciones circuitales para obtener una operación segura
Litio-Sulfuro	Alta densidad de energía Alta densidad de potencia No es costosa	Alta tasa de descarga Corto ciclo de vida Aún no está disponible para aplicaciones en VE
Zinc-Aire	Alta densidad de energía Se pueden recorrer grandes distancias con una sola recarga.	Baja densidad de potencia Corto ciclo de vida Se encuentra en etapa de investigación Aún no está disponible para aplicaciones en VE Requiere infraestructura específica para la recarga (cambio de ánodos)

Fuente: (Dixon, 2010; G Ren, Ma, & Cong, 2015; Tie & Tan, 2013; Yong et al., 2015)

En el Anexo 7 se muestran todas las baterías secundarias disponibles para los vehículos eléctricos, con sus respectivas características de energía específica, densidad de energía potencia específica, eficiencia energética, ciclo de vida, rango de temperatura de operación, costo por unidad de energía y propiedades.

Teniendo en cuenta que se hace necesario el rápido desarrollo de infraestructura de carga rápida y de tecnología Wireless para las baterías de los vehículos eléctricos, que puedan proveer cambios de baterías en 10 segundos y una carga rápida de 10 minutos, se observa que las baterías de litio son los dispositivos más adecuados para aplicaciones en vehículos eléctricos, y que la investigación sobre estos dispositivos ha avanzado en la reducción de los costos de fabricación (Hannan et al., 2017a).

4.1.3. Sistema de almacenamiento químico (CSS)

Los CSS almacenan y liberan energía mediante reacciones químicas, producidas por varios compuestos. La celda de combustible (FC) es un dispositivo de almacenamiento y conversión de energía química a eléctrica, por medio de un proceso electrolítico en el que quedan como residuos calor y agua. La FC más popular utiliza el hidrógeno y el oxígeno y su eficiencia varía del 40 al 85%, no produce ruido y emite baja cantidad de GEI. Sin embargo, sus principales problemas se encuentran en el almacenamiento del gas del vehículo, debido a la baja densidad de energía por unidad de volumen, alto costo, bajo ciclo de vida y funcionamiento complejo (Dixon, 2010; Hannan et al., 2017a; Tie & Tan, 2013).

Como ejemplo del difícil almacenamiento del hidrógeno, se presenta el caso del hidrógeno a temperatura y presión ambiente, para el que se necesitaría un tanque de volumen 800 veces más grande que el encontrado en los ICEVs para el combustible fósil. En la Tabla 2 se hace una comparación del volumen requerido para almacenar gasolina e hidrógeno (a diferentes condiciones), para recorrer la misma distancia en el mismo modelo de vehículo (Dixon, 2010; Tie & Tan, 2013).

Tabla 2. Resumen de peso y volumen de diferentes tanques

Vehículos en el mismo perfil de distancia recorrida	Masa (Kg.)	Volumen (L)
Gasolina/ICE	50	70
Hidrógeno comprimido (350bar)/FCs	90	320
Hidrógeno comprimido (700bar)/FCs	100	180
Hidrógeno líquido/FCs	45	190
Hidrógeno en hidruro de metal/FCs	200-600	180

Fuente: (Tie & Tan, 2013)

4.1.4. Sistemas de almacenamiento eléctrico (EeSS)

Estos dispositivos almacenan directamente la energía eléctrica por medio de campo eléctrico (ultracapacitores) y campo magnético (bobinas superconductoras).

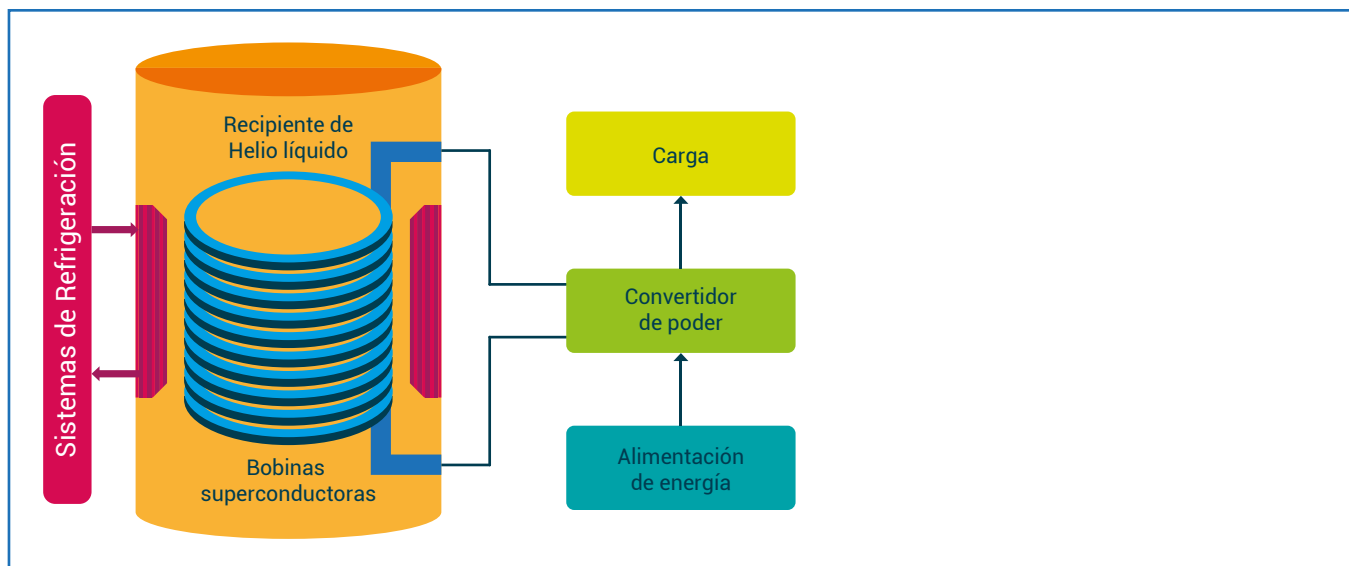
4.1.4.1. Ultracapacitores (UC)

Los ultracapacitores son dispositivos que almacenan energía por medio de campo eléctrico, y sus ciclos de carga y descarga son relativamente rápidos. Los UC actuales presentan altas capacitancias, eficiencias del 95%, densidades de energía de alrededor del 10% y densidad de potencia es 10 o 100 veces más alta (1000-2000 W/kg), comparadas con las capacidades de las baterías convencionales, y un tiempo de vida de cerca de 40 años, además no requieren mantenimiento. A partir de investigaciones recientes, se están desarrollando UC de litio (LIC), mejorando la densidad de energía considerablemente. Muchas aplicaciones en vehículos eléctricos han remplazado las baterías por UC en el sistema de frenado regenerativo, obteniendo reducciones de combustibles de cerca del 10%; además los UC han respondido favorablemente a la aceleración requerida en terrenos montañosos (Hannan et al., 2017a; Guizhou Ren et al., 2015).

4.1.4.2. Bobinas superconductoras (SMES)

Las bobinas superconductoras son dispositivos que almacenan energía por medio de un campo magnético, y tienen la capacidad de entregar la energía instantáneamente a la carga. Sus principales características son alta densidad de potencia, largo ciclo de vida (100000) y eficiencia del 97% (Hannan et al., 2017a; Guizhou Ren et al., 2015).

Sin embargo, el alto costo del dispositivo (205-340 \$/kW), restringe su masificación y uso, como alternativa a otros sistemas de almacenamiento de energía. La **Ilustración 7**. Estructura básica de un SMES muestra la estructura de una SMES, la cual está compuesta por una bobina superconductora, un sistema de refrigeración y un convertidor que transfiere la potencia a la carga. Sus aplicaciones actuales se encuentran en vehículos eléctricos híbridos en el sistema de baterías.

Ilustración 7. Estructura básica de un SMES

Fuente: (Hannan et al., 2017a)

4.1.5. Sistemas de almacenamiento térmico (TSS)

Los TSS almacenan energía en forma de calor en un depósito aislado de un calentador solar o eléctrico, para su posterior uso en plantas de generación de electricidad o diferentes propósitos de calefacción. En los vehículos eléctricos el sistema de generación termoeléctrico automático se puede optimizar para mejorar la eficiencia general y el costo del combustible (Hannan et al., 2017a).

4.1.6. Sistemas de almacenamiento híbrido (HSS)

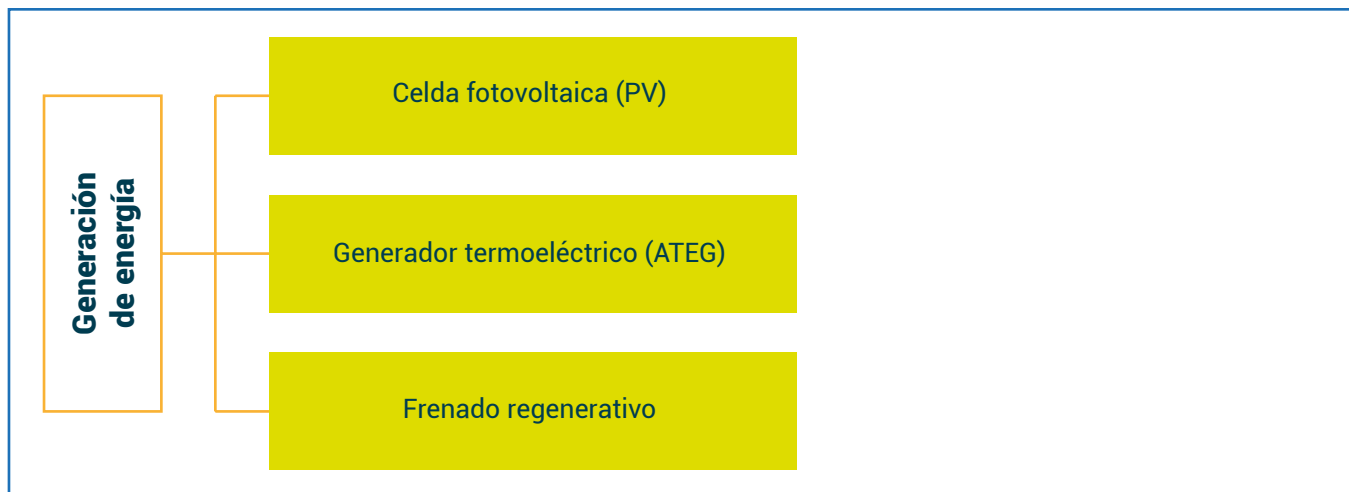
Los sistemas revisados anteriormente, de manera individual resultan incapaces de brindar todas las características necesarias para un buen funcionamiento del vehículo eléctrico, como lo son la densidad de energía y de potencia, tasas de carga y descarga, ciclo de vida y costo. El HSS es una combinación de uno o más tipos de almacenamiento de energía en el sistema (Tie & Tan, 2013). Una posible solución es contar con un sistema que combine dos o más tecnologías y aproveche sus características, potencializando las ventajas intrínsecas de cada uno, y así minimizar sus desventajas. Para lograrlo se deben desarrollar métodos y tecnologías nuevas para recargar, almacenar y obtener un sistema confiable desde la limitación del costo del HSS y la investigación en la electrónica de potencia.

Según Hannan et al. (2017), los HSS aplicados a vehículos eléctricos se clasifican en sistemas que contienen: a) batería y batería (de distinto tipo), b) batería y ultracondensador, c) celda de combustible y batería, d) batería y bobina superconductora, e) celda de combustible y ultracondensador, g) volante de ultra alta velocidad y celda de combustible.

4.2. Sistemas de generación de energía

A parte de los ESS, en los vehículos eléctricos se pueden añadir otros dispositivos que conviertan algún tipo de energía en energía eléctrica para proporcionar un funcionamiento más extenso. Los principales son la celda fotovoltaica, el generador termoeléctrico y el sistema de frenado regenerativo.

Ilustración 8. Sistemas alternos para la generación de energía.



Fuente: Elaboración propia a partir de (Tie & Tan, 2013)

4.2.1. Celda fotovoltaica (PV)

La aplicación principal de las PV en los vehículos eléctricos, es como soporte al sistema de ventilación. Su factibilidad se ha aumentado debido a la disminución de su precio, gracias a los desarrollos de la industria china (Tie & Tan, 2013). Entre sus desventajas se encuentra el limitado espacio y la baja generación de energía en el vehículo.

4.2.2. Generador termoeléctrico (ATEG)

El ATEG es un dispositivo que transforma la energía térmica en electricidad. Ha sido utilizado para mejorar la eficiencia en vehículos ICE y eléctricos, tiene un tiempo de vida de 10 a 20 años, no requiere mantenimientos y un bajo precio por capacidad de potencia instalado (Tie & Tan, 2013).

4.2.3. Frenado regenerativo

El frenado regenerativo utiliza la energía cinética generada entre los modos de freno y navegación para generar electricidad. Los métodos de almacenamiento de energía para este dispositivo pueden ser eléctrico, gas comprimido, flywheel y energía gravitacional (Tie & Tan, 2013). Actualmente, la energía producida por medio del frenado regenerativo está únicamente disponible para vehículos HEV y AEV con alta capacidad en el ESS. En la Tabla 3 se resumen las características y aplicaciones de cada mecanismo.

Tabla 3. Métodos para recuperar energía del frenado

Mecanismo de almacenamiento de energía	Convertidor de energía	Energía recuperada del frenado	Ejemplo de aplicación
Energía Eléctrica	Motor/generador eléctrico	50%	HEV, AEV
Gas Comprimido	Motor hidráulico	>70%	Heavy-duty delivery
FES	Energía rotacional y cinética	>70%	F1
Energía Gravitacional	Sistemas de almacenamiento de muelles		Tren

Fuente: (Tie & Tan, 2013)

4.3. Programas de apoyo e iniciativas para los vehículos eléctricos (revisión internacional)

En esta sección se revisan tres informes que analizan y resumen los programas e iniciativas, realizados a nivel mundial, para promover y dar apoyo a la infraestructura de los vehículos eléctricos, y los cuales están encaminados a contribuir a la movilidad eléctrica y diversificación energética en los países y regiones que fomentan el uso del VE.

En primer lugar, se presenta la Iniciativa de Vehículos Eléctricos (EVI, por sus siglas en inglés), realizada a través de políticas gubernamentales, donde colaboran los 10 países⁵ con mayor participación en el mercado de VE a nivel mundial, con un total del 95% de ventas. El programa de cooperación internacional es promovido por el Ministerio de la Energía Limpia (CEM, por sus siglas en inglés), con el propósito de brindar una plataforma efectiva para intercambiar información, acción y comunicación acerca de tecnología, políticas y regulaciones de los VE (International Energy Agency, 2017). Además de los países nombrados anteriormente, otros más como Islandia, India, Corea, Lichtenstein, Suiza y Turquía, han contribuido también al desarrollo de este informe (Global EV Outlook 2017).

Por otra parte, Hall & Lutsey (2017) realizaron un informe dentro del marco de la ZEV Alliance⁶, inscrito dentro del Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés). El programa es consciente de la reducción potencial de las emisiones de GEI mediante la adopción de los VE, y también del continuo decrecimiento de los costos que aumentan la factibilidad de la transición energética. Por ello, este informe ofrece información oportuna encaminada a acelerar la adopción de VE en los países miembros y el resto del mundo mediante una evaluación global de las prácticas de implementación de infraestructura de carga, los desafíos y las mejores prácticas emergentes en los principales mercados de vehículos eléctricos, con énfasis en las instalaciones de carga pública.

5. Canadá, China, Francia, Alemania, Japón, Holanda, Noruega, Suecia, Reino Unido y Estados Unidos.

6. Por sus siglas en inglés, la Alianza Internacional de Vehículos de Cero Emisiones es una colaboración de gobiernos nacionales y subnacionales compuesta por los gobiernos de California, Colombia Británica, Connecticut, Québec, Alemania, Maryland, Massachusetts, Países Bajos, Nueva York, Oregon, Rhode Island, Reino Unido, y Vermont, que trabajan juntos para acelerar la adopción de ZEV. Los participantes establecen objetivos ambiciosos y alcanzables para el despliegue de ZEV, toman medidas para alcanzar esos objetivos según corresponda en cada jurisdicción, actuar juntos para alcanzar objetivos individuales y colectivos, y alentar y apoyar a otras jurisdicciones para establecer y alcanzar ambiciosos objetivos ZEV (Washington et al., 2016).

Finalmente, se revisa la guía para las lecciones aprendidas de la comunidad de ciudades limpias y los proyectos de preparación de vehículos eléctricos, desarrollada por Frades (2014), la cual resume las actividades, productos y lecciones aprendidas de proyectos realizados desde el 2011, para el crecimiento de VE en el mercado, desde el Departamento de Energía de los EE. UU. (DOE).

Tabla 4. Resumen de los informes revisados de VE a nivel mundial

Informe	Iniciativa/ promotor	Países/gobiernos participantes	Objetivo
Global EV Outlook 2017	EVI	Canadá, China, Francia, Alemania, Japón, Holanda, Noruega, Suecia, Reino Unido y Estados Unidos. En menor medida: Islandia, India, Corea, Liechtenstein, Suiza y Turquía.	Brindar una plataforma efectiva para intercambiar información, acción y comunicación acerca de tecnología, políticas y regulaciones de los VE.
Mejores prácticas emergentes para la infraestructura de carga de vehículos eléctricos	<i>ZEV Alliance</i>	California, Colombia Británica, Connecticut, Québec, Alemania, Maryland, Massachusetts, Países bajos, Nueva York, Oregon, Rhode Island, Reino Unido, y Vermont.	Ofrece información oportuna de prácticas de implementación, desafíos y mejores prácticas emergentes, encaminadas a acelerar la adopción de VE en los países miembros y el resto del mundo.
Una guía para las lecciones aprendidas de la comunidad de ciudades limpias y los proyectos de preparación de vehículos eléctricos	DOE	Estados Unidos	Soportar acciones locales para implementar los vehículos eléctricos y reducir el uso del petróleo en el transporte.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Frades, 2014; Hall, Moulta, & Lutsey, 2017; International Energy Agency, 2017).

4.3.1. Características de los programas

Las medidas regulatorias que caracterizan los programas mencionados en la Tabla 4 se encuentran desarrolladas para que el VE pueda competir con los ICEVs, con más de un siglo de presencia en el mercado (International Energy Agency, 2017). Además, están enmarcadas dentro de amplias acciones y políticas, como lo son la implementación de incentivos, investigación y desarrollo tecnológico, infraestructura de carga (doméstica, comercial y pública), facilidades para la obtención de parque automotor, beneficios de tránsito y campañas de promoción dirigidas a usuarios finales y organizaciones públicas y privadas, donde integración Universidad-Estado-Empresa

es vital para que estas medidas sean eficaces.

La Tabla 5 muestra un resumen de las medidas regulatorias tomadas en cada una de las ciudades revisadas. Se califican según el grado de acción que cada ciudad haya desarrollado, para la categoría respectiva, con un espacio en blanco que indica que no hay política o acción conocida, + alguna acción, y ++ acción extensa (Hall et al., 2017).

Tabla 5. Evaluación cualitativa de las acciones implementadas a nivel mundial para impulsar el mercado de los VE

País	Ciudad	Incentivos financieros	Incentivos no financieros	Infraestructura de carga	Campañas e investigación	Tránsito y flotas
China	Shanghai	++	+	+	+	++
	Shenzhen	++	++	+		++
	Beijing	++	+	+	++	+
	Copenhague	+	+	++	++	++
	Paris	++	+	+	+	+
	Amsterdam	++	++	++	+	++
	Utrecht	++	++	++	++	+
Europa	Oslo	++	++	++	+	++
	Stockholm	+	+	+	+	+
	Zürich	+		++	+	+
	Londres	+	++	+	++	++
	San José	++	++	++	+	+
Estados Unidos	San Francisco	++	++	++	+	++
	Los Angeles	++	++	+	+	++

Fuente: (Hall et al., 2017)

4.3.1.1. Incentivos

Los incentivos provenientes de los gobiernos son importantes para impulsar el mercado del VE, por lo que los países miembros de los programas han estudiado e implementado incentivos financieros para reducir la brecha de costos entre el VE y el ICEV (ver Tabla 6). Entre dichas medidas se encuentran reembolsos, desgravaciones o exenciones tributarias e impuestos a las emisiones de GEI, además de subsidios para la instalación de puntos de recarga. Otros tipos de incentivos (de tipo no financiero) se han diseñado para mejorar la propuesta de valor de los VE, los cuales ofrecen ventajas como tarifas reducidas, beneficios exclusivos y ahorro de tiempo a los conductores de automóviles eléctricos; de acuerdo a las condiciones locales de movilidad urbana, como exenciones de limitaciones a la disponibilidad de placas,

acceso a áreas restringidas o libre tránsito en días de restricción para los ICEVs en áreas urbanas, exenciones de tarifas de parqueo y peajes, parqueaderos públicos exclusivos, acceso a infraestructura de carga pública y acceso a carriles exclusivos (Hall & Lutsey, 2017; Hall et al., 2017; International Energy Agency, 2017).

Tabla 6. Revisión de los incentivos implementados a nivel mundial

Incentivo	China	Noruega	Japón	Holanda	Suecia	Dinamarca	Francia	Reino unido
Exención impuesto de adquisición	x	x				x		
Eliminación de impuestos	x			x				
Esquemas de subsidios	x		x		x	x		
Instalación de puntos de recarga público	x	x		x	x			x
Instalación de puntos de recarga privados	x						x	x
Exención de disponibilidad de placas	x							
Exenciones de tarifas de peajes		x						
Parqueadero gratis		x						
Impuesto a las emisiones de CO ₂				x				
Flota empresarial o pública					x	x		
Beneficios adicionales					x			

Fuente: Elaboración propia a partir de (Frades, 2014; Hall, Moulta, & Lutsey, 2017; International Energy Agency, 2017).

Los incentivos financieros serán cada vez menos necesarios a medida que se reduzcan los costos de PEV y de infraestructura, a través de la innovación tecnológica, la escala de producción, el aprendizaje práctico y de la adopción por parte de gran parte de la población. No obstante, de acuerdo a la IEA continúan siendo necesarios ya que los VE continúan siendo más costosos que los ICEVs, debido a los costos de las baterías y de su infraestructura de carga (International Energy Agency, 2017). Si bien los incentivos pueden proporcionar un soporte crítico para el desarrollo temprano del mercado, solo pueden ser efectivos si los consumidores, los operadores de flotas, las empresas y los concesionarios conocen su disponibilidad.

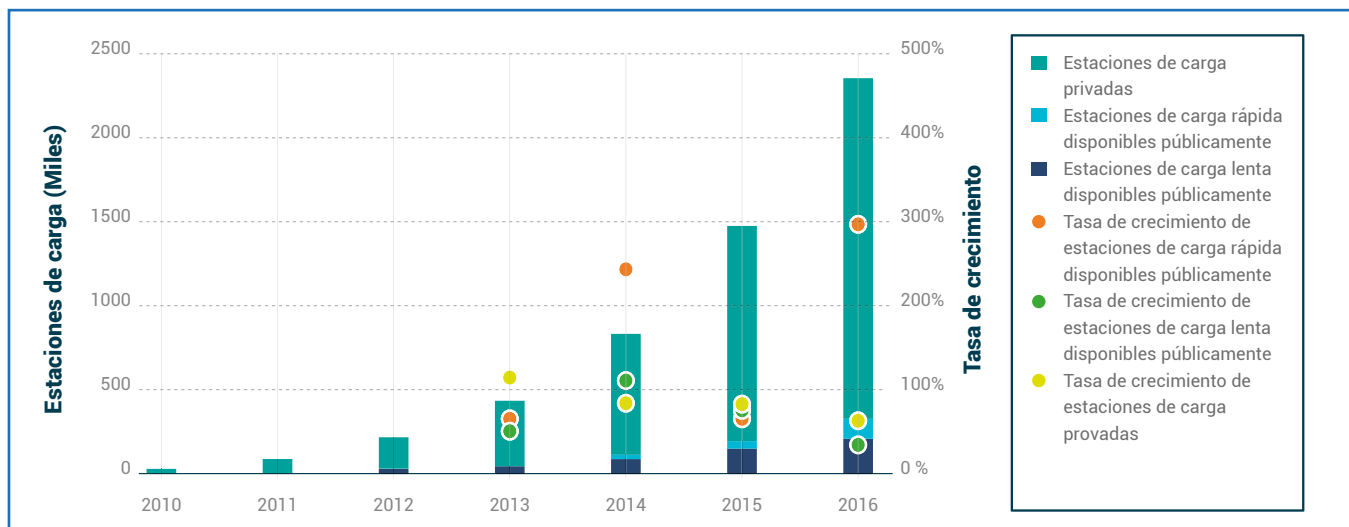
En el 2017, el EVI lanzó la campaña EV30@30, como punto de partida para lograr que, en el 2030, el 30% del mercado de vehículos sea de tecnología eléctrica, mediante la implementación de acciones para dar soporte al desarrollo de cargadores, moldear los compromisos del sector público y privado para adoptar los vehículos eléctricos en sus flotas, intercambiar información y experiencias, desarrollar capacidades, investigar y analizar las políticas y su eficacia, y establecer el programa Global EV Pilot City. Este último, es un programa cooperativo global destinado a facilitar el intercambio de experiencias y la reproducción de las mejores prácticas, para la promoción de los VE en las ciudades. Esta campaña ha contribuido en el proceso de formulación de políticas para brindar soporte a la investigación, ya que se considera un área clave para reducir los costos y mejorar los desempeños de las tecnologías, de modo que se puedan producir a gran escala y lograr una mayor masificación (International Energy Agency, 2017).

4.3.1.2. Infraestructura para vehículos eléctricos

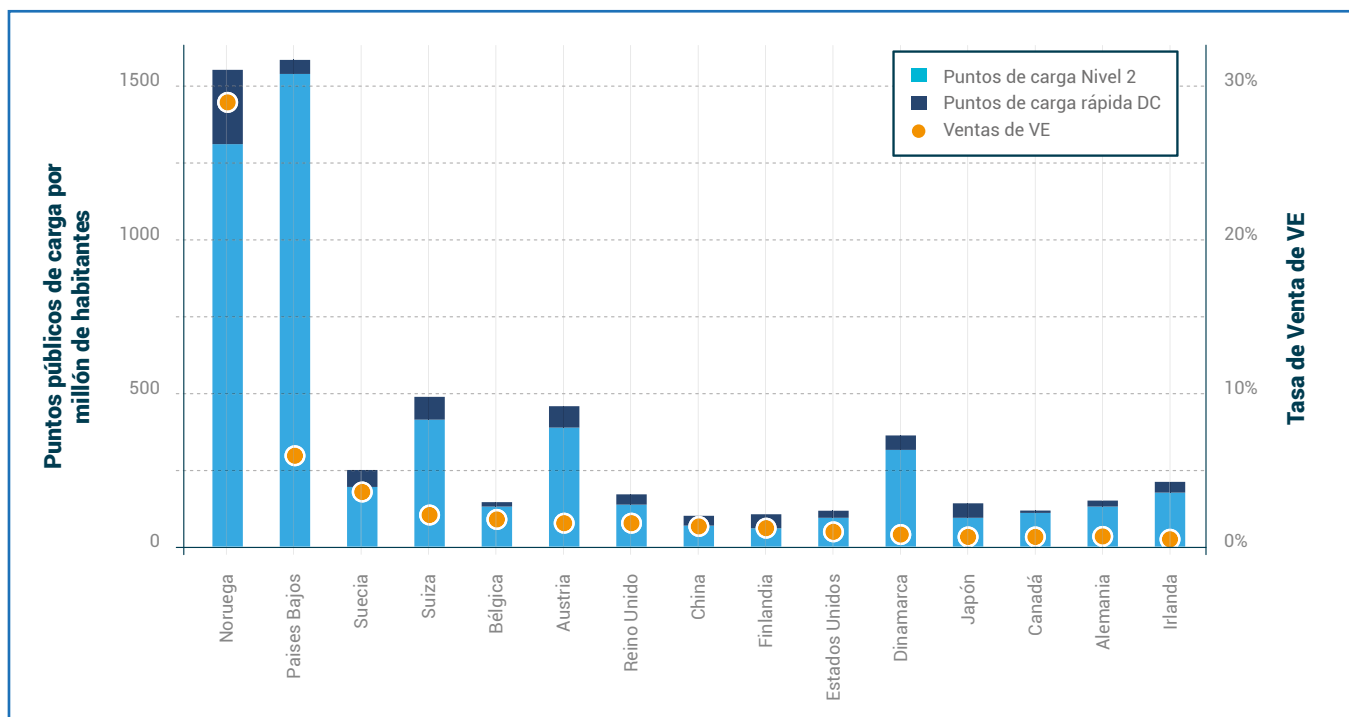
Los puntos de recarga se consideran un prerrequisito para la adopción rápida de los VE, especialmente los cargadores públicos de carga rápida. La **Ilustración 9** muestra la cantidad de cargadores instalados a nivel mundial. Se resalta que la mayoría de los cargadores instalados en el mundo son privados (ubicados en el sector residencial principalmente). Los sistemas de recarga para vehículos eléctricos requieren integrar las tecnologías de cargadores para las baterías, la infraestructura disponible en cuanto a puntos y estaciones de carga y las normas de estandarización del sistema (ver Anexo 5).

La **Ilustración 9** muestra la cantidad de puntos de recarga públicos disponibles por millón de habitantes, y el porcentaje que representaron los VE⁷ en el total de ventas para 2016, a nivel nacional. Noruega y Holanda tienen el índice de infraestructura de carga pública per cápita mucho mayor que otros países, lo que les ha permitido tener una alta penetración en el mercado. China posee la mayor cantidad de puntos de recarga a nivel mundial (100,000 puntos de carga de nivel 2 y 38,000 de DC), estando relacionado directamente con su primera posición en el mercado de VE en el mundo.

7. Incluidos BEVs y PHEVs.

Ilustración 9. Inventario de los puntos de recarga a nivel mundial.

Fuente: (International Energy Agency, 2017)

Ilustración 10. Ventas de VE en el 2016 y cantidad de puntos de recarga por millón de habitantes.

Fuente: (Hall & Lutsey, 2017)

El promedio de vehículos eléctricos por punto de carga a nivel mundial es de 7, aunque esto no representa una regla general, debido a las distintas condiciones presentes en cada país. Entre estas, el fácil acceso a puntos de carga en el hogar y en el lugar de trabajo, lo que determina que puedan existir mayor o menor número de puntos de carga pública (Hall & Lutsey, 2017).

Una de las medidas que ha tenido mayor éxito a nivel mundial, es la construcción de estaciones de carga en la acera, en viviendas de unidades múltiples y de carga rápida interurbana. Los gobiernos locales cumplen un rol crítico en proveer la infraestructura necesaria como zonas de parqueo, así como, reducir los requerimientos burocráticos y mejorar los códigos eléctricos de construcción. Por ejemplo, un problema al que se debe dar manejo desde el sector público, es el que presentarían los usuarios que habitan en las viviendas multifamiliares, por la imposibilidad de instalar sus propios puntos de carga, por lo que requerirían más puntos en el trabajo o de programas que apoyen la instalación en las edificaciones multifamiliares (Frades, 2014; Hall & Lutsey, 2017).

Trazar objetivos de infraestructura de carga ayuda a fijar metas y utilizar instrumentos para lograrlos. China pretende tener 4.3 millones de puntos privados, 0.5 millones de puntos públicos y 850 estaciones de carga rápida para el 2020. Francia planea tener 7 millones de puntos al 2030. El objetivo de Corea está en tener 3000 estaciones de carga para el 2020. Tanto gobiernos como empresas privadas, han implementado puntos de recarga rápida en el mundo, como por ejemplo, la compañía Fastned ha instalado más de 60 estaciones de carga rápida en Holanda, 14 en Alemania y otras más en Reino Unido. Los estados de Washington, Oregon y California desarrollaron una red de estaciones de carga rápida DC cada 40 a 80 km (International Energy Agency, 2017).

Los programas de gobierno se deben centrar, preferiblemente, en una forma de infraestructura de carga que satisfaga una necesidad definida, de acuerdo a su contexto político, geográfico y demográfico (por ejemplo, carga rápida interurbana de CC o carga residencial en la acera), para abarcar zonas geográficas amplias (Hall & Lutsey, 2017). Varios programas gubernamentales subsidian parte de la infraestructura para instalar puntos de carga en el hogar. Los gobiernos han diseñado varios subsidios para apoyar los costos derivados de la instalación; en Reino Unido y Oklahoma los subsidios representan el 75%, en Delaware 50%, en Maryland el 40%, en Luisiana el 36%, en Oregon el 25%, en Québec son hasta de \$600 y en Washington D.C. hasta US \$1.000.

La Tabla 7 resume algunos de los principales programas de infraestructura de carga a nivel mundial. Entre los principales mercados de vehículos eléctricos promovidos por los gobiernos, se destacan los gobiernos de Estados Unidos y los Países Bajos.

Tabla 7. Programas de infraestructura implementados a nivel mundial

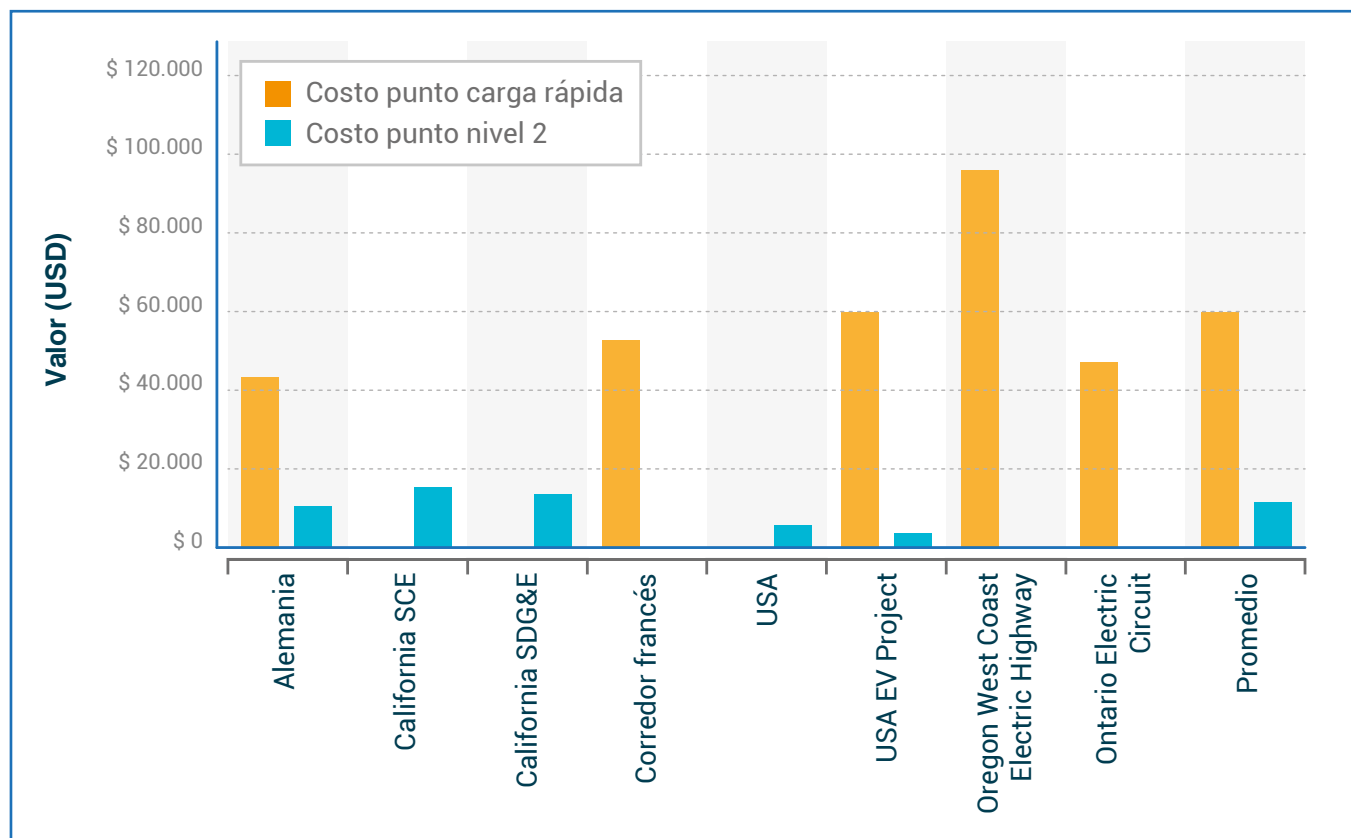
País	Programa	Presupuesto	Mecanismo de soporte
China	<ul style="list-style-type: none"> • Corredores nacionales de carga rápida • Inversiones regionales de fabricantes de automóviles • Construcción financiada por el gobierno en ciudades piloto 		<ul style="list-style-type: none"> • Programas de utilidad pública • Asociación público-privada • Subvenciones a los gobiernos locales
Francia	<ul style="list-style-type: none"> • Financiamiento dado a 3.000 ciudades por 12,000 puntos de carga • Compañía eléctrica EDF construye una red de carga rápida de DC en todo el país 		<ul style="list-style-type: none"> • Los gobiernos locales aplican a subvenciones
Alemania	<ul style="list-style-type: none"> • € 300 millones para 10,000 estaciones de carga rápida de Nivel 2 y 5,000 DC 	€300 millones (USD\$285)	<ul style="list-style-type: none"> • Subsidios para el 60% de los costos para todas las empresas elegibles
Japón	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecto de promoción de despliegue de infraestructura de carga de vehículo de próxima generación • Asociación gobierno-fabricantes de automóviles de Nippon Charge Service 	Más de ¥100 billion (USD\$1 billón)	<ul style="list-style-type: none"> • Subvenciones a gobiernos locales y operadores de carreteras • Asociación público-privada
Países bajos	<ul style="list-style-type: none"> • "Green Deal" (cargadores en la acera a pedido) 	€33 millones (USD \$31 millones)	<ul style="list-style-type: none"> • Contratos ofrecidos a las empresas proyecto por proyecto
Noruega	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de subvenciones Enova desde 2009 en adelante 		<ul style="list-style-type: none"> • Convocatorias trimestrales de propuestas para proyectos específicos
Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> • Estaciones de acera para áreas residenciales • Highways England construye estaciones de carga rápida de DC a lo largo de las principales carreteras de Inglaterra 	£2.5 millones (USD \$2 millones) £15 millones (USD \$12 millones)	<ul style="list-style-type: none"> • Los municipios solicitan subvenciones; instaladores reembolsados • Subvenciones y licitaciones administradas por organismos públicos
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> • Subvenciones para financiar estaciones de carga públicas a través de la Ley de Recuperación y Reinversión de los Estados Unidos. 	USD \$15 million	<ul style="list-style-type: none"> • Subvenciones igualadas para gobiernos locales

Fuente: (Hall & Lutsey, 2017)

4.3.1.2.1. Costos de la infraestructura de carga

La **Ilustración 11** muestra los costos asociados a la instalación de infraestructura de carga en los programas gubernamentales más grandes en el mundo, donde se incluyen costos de administración, instalación y ubicación.

Ilustración 11. Costo de la instalación de puntos de carga en los principales mercados de VE.



Fuente: (Hall & Lutsey, 2017)

Existen varias formas de reducir los costos de la construcción de la infraestructura de carga, como usar dos conectores en lugar de uno, construir varias estaciones en la misma área, implementar puntos en muros en lugar de postes e incluir en el código eléctrico requerimientos especiales de puntos de carga para áreas residenciales, lugares de trabajo y estaciones de carga pública. Los gobiernos y las entidades privadas también pueden implementar estaciones básicas de carga con menor costo inicial, pero se corre el riesgo de que éstas se vuelvan obsoletas en el futuro.

4.3.1.3. Estándares y tipos de cargadores

De acuerdo a Yong et al. (2015), son pocas las normas existentes para establecer estándares internacionales de carga (ver Anexo 5), las cuales, son promovidas por los países con mayor número de inventario de VE. A pesar de ello, la escasez en la planeación sistemática en los países (Unión Europea), ocasiona que los gobiernos

y el sector privado realicen esfuerzos no coordinados para la adopción de esta tecnología e implementen estándares diferentes. Esto genera problemas al usuario al momento de recargar su vehículo (diferentes tipos de cargadores, niveles de carga, distancia entre estaciones), obligándolos a utilizar diferentes accesorios para la recarga de sus vehículos. A largo plazo, esto ocasiona que se frene el crecimiento del mercado debido a la falta flexibilidad de la infraestructura, relegando el funcionamiento del VE a las zonas conocidas por el usuario. Por ello, los planeadores del sistema eléctrico deben establecer un único estándar y protocolos de comunicación específicos para facilitar la interoperabilidad y las transacciones de pago de la energía (Hall & Lutsey, 2017).

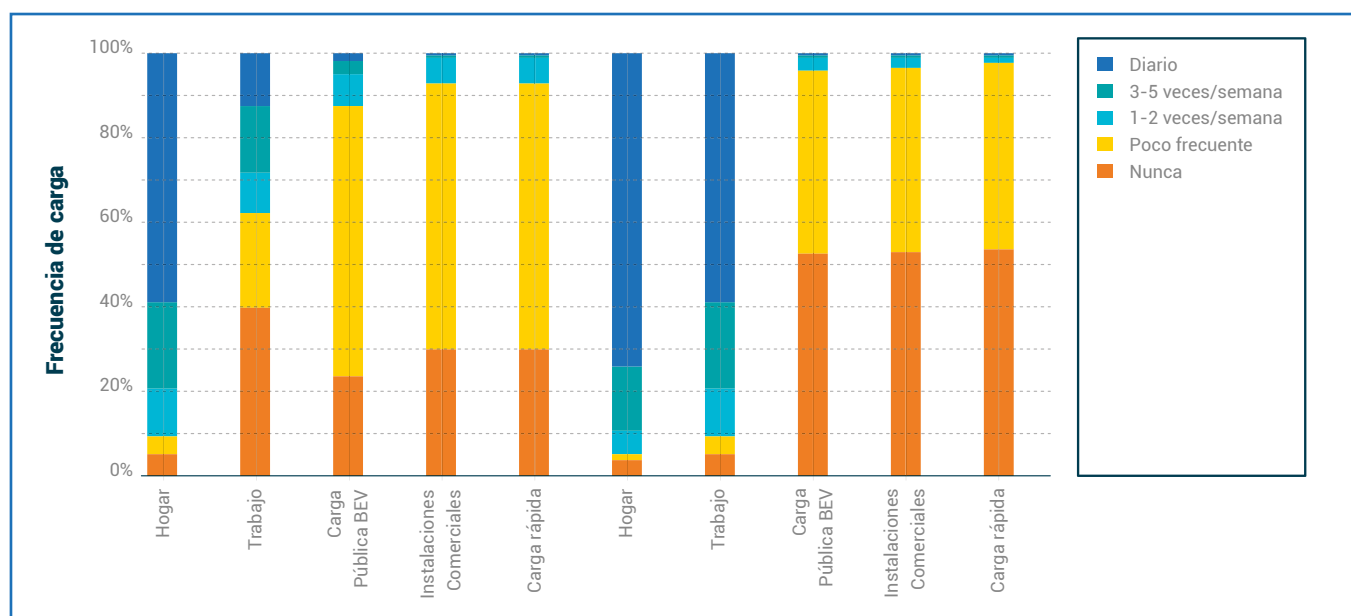
4.3.1.3.1. Regulaciones de códigos de construcciones

Los requerimientos de potencia para la carga de vehículos eléctricos son muy exigentes en cuanto a su robustez y seguridad eléctrica. La readaptación de las instalaciones existentes, resultan altamente costosas comparados con las instalaciones diseñadas desde el principio para tal fin. Casos de éxito han sido el Código de Normas de Construcción Ecológica de California y acciones implementadas en Europa, como exigencias de puntos de carga en parqueaderos y edificaciones residenciales. Los puntos de cargas en los lugares de trabajo serán cada vez más importantes a medida que la transición energética hacia la electromovilidad continúe creciendo, especialmente al medio día cuando se genere la mayor parte de energía eléctrica desde los paneles solares y para los usuarios que no tienen acceso a puntos en sus hogares (Hall & Lutsey, 2017).

En cuanto a los lugares para la recarga de los vehículos eléctricos, se han expedido normas para exigir sitios especiales en edificios residenciales. Este es el caso de Francia donde se realizaron leyes tendientes a exigir que entre el 50% al 75% de los lugares de parqueo residencial y el 5 al 10% de los lugares de parqueo comercial tuvieran puntos eléctricos para instalar sistemas de recarga (International Energy Agency, 2017).

4.3.1.4. Hábitos de recarga

Los estudios realizados en Noruega (país con la más alta penetración de VE), indican que los hábitos de recarga para los VE son muy diferentes a los hábitos de abastecimiento de combustible para los ICEVs. La recarga en los hogares, lugares de trabajo y puntos públicos son los más frecuentes y se utilizan cargadores de carga lenta. Los puntos de recarga rápida son utilizados en paradas planeadas para viajes largos. La disponibilidad de infraestructura de carga es importante para que los usuarios adecúen su perfil de carga de acuerdo a sus necesidades de transporte (International Energy Agency, 2017).

Ilustración 12. Hábitos de carga presentes en los usuarios de VE en Noruega.

Fuente: (International Energy Agency, 2017)

4.4. Impactos en el sector energético

La transición energética y la incursión de la demanda de energía en los VE implican cambios en el actual sistema eléctrico, tanto a nivel técnico como medioambiental y, en el modelo de negocio controlado actualmente por el sector petrolero, incidiendo directamente en la forma en que se abarcan dichos fenómenos. En esta sección se pretende revisar y dar aviso de los impactos potenciales, y reseñar algunos métodos encontrados para mitigarlos o tratarlos (Yong et al., 2015).

4.4.1. Impacto a la red eléctrica

Los entes de planeación del sistema eléctrico en cada país deben pronosticar la entrada de los VE, para garantizar la adecuación de las redes y la calidad del servicio, ya que su penetración incide en el flujo de carga de las redes de distribución para los sectores residenciales y comerciales, de acuerdo al patrón de recarga diario (International Energy Agency, 2017). En vista de lo anterior, el ingreso de VE tiene impacto directo a nivel de:

- Generación de energía, donde una mayor demanda puede incrementar los precios del kW/h.
- Transmisión, donde se presentan más pérdidas por el mayor flujo de energía.
- Distribución, donde se podrían presentar sobrecargas en los componentes del sistema y caídas de voltaje.

La introducción de vehículos eléctricos a la red puede producir efectos, tales como armónicos, pérdidas técnicas, caídas de tensión, desbalance de fase, aumentar la demanda de energía no deseada, sobrecargar los activos de la red y generar problemas

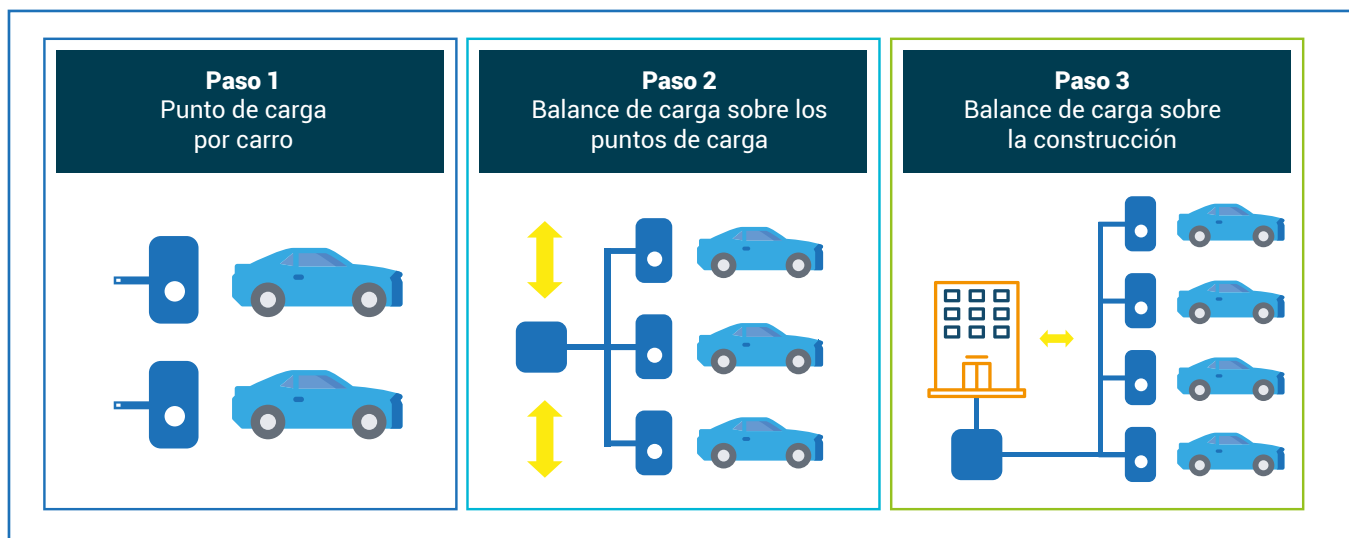
de estabilidad (Yong et al., 2015). El perfil diario de carga de la red se vería afectado si la mayoría de los usuarios cargan los VE en los momentos en que vuelven del trabajo hacia sus casas (Hall & Lutsey, 2017), debido a que incrementarían los picos de la curva de demanda y pondrían en riesgo la operabilidad del sistema eléctrico. Para mitigar estos efectos negativos se ha planteado construir infraestructura de carga en lugares comerciales donde exista una mayor disponibilidad de la red y una alta tasa de uso del sistema (International Energy Agency, 2017). Conectar este tipo de infraestructura en el sector residencial requiere que el propietario solicite mayor disponibilidad de red, traduciéndose en un costo más elevado. Las prácticas inteligentes de carga están siendo estudiadas por los gobiernos mediante proyectos pilotos y revisión de políticas, por ejemplo, soluciones planteadas están dirigidas a permitir la recarga en los horarios de mayor generación eléctrica mediante energía solar o a utilizar los horarios de menor uso de la red eléctrica (y de menor costo de energía) (Hall & Lutsey, 2017).

Un mayor flujo de energía incrementará las pérdidas técnicas y podría sobrecargar los componentes de la red, como transformadores y cables, causándoles daños o reduciendo su vida útil. Por ello, una buena previsión y planeación de la red eléctrica contribuirá a su funcionamiento óptimo, mediante la carga coordinada de los vehículos eléctricos. Igualmente, se debe revisar que los puntos de carga AC monofásicos (especialmente en la carga residencial) no provoquen desbalance a la red (Yong et al., 2015). Los sistemas de carga rápida DC requieren de gran cantidad de potencia en cortos periodos de tiempo a la red de distribución y se puede intensificar a medida que se construyen más estaciones, incidiendo en el aumento de costos de operación de la red. Estos efectos colaterales se pueden reducir si se analiza la factibilidad técnica, donde exista alta capacidad de respuesta de la red eléctrica. Se resaltan los esfuerzos de The California utility Pacific Gas & Electric para desarrollar un mapa de la red eléctrica, donde se puedan consultar los lugares con mayor disponibilidad de red. Igualmente, sistemas de respaldo por medio de almacenamiento de energía en baterías estacionarias (inclusive utilizando un segundo ciclo de vida de las baterías de los vehículos eléctricos) están siendo estudiados para mitigar los efectos en la red y coordinar el almacenamiento de energía renovable (Hall & Lutsey, 2017).

Los armónicos introducidos a la red, debido al uso de componentes electrónicos en los VE y fuentes renovables, pueden provocar problemas de calidad en la energía eléctrica, por lo que se necesitarían dispositivos de filtrado para eliminarlos (Yong et al., 2015). Mediante la implementación de la generación distribuida y de la Smart Grid, se puede realizar una comunicación bidireccional entre la red y el vehículo, conocida como Vehículo-to-Grid (V2G). Esta permite administrar e intercambiar energía entre ambos en ciertas horas del día, es decir, se considera utilizar las baterías de los vehículos como un sistema de almacenamiento dinámico para aumentar la estabilidad y confiabilidad de la red por medio de la regulación de potencia activa y reactiva, filtrado de armónicos y el soporte a las fuentes de energía renovable.

Otra de las soluciones propuestas ha sido incentivar al usuario para que recargue su vehículo mediante paneles solares instalados en sus casas directamente, o también mejorar el marco regulatorio para permitir la conexión sin costos adicionales del VE en cualquier punto de la red, en el momento que los paneles solares de su casa estén suministrando energía a la red. La tercera opción está encaminada a realizar infraestructura de recarga en tres fases como se observa en la Ilustración 13, las cuales avanzarán de acuerdo a la masificación de los VE. En la primera fase se plantea desarrollar puntos de recarga, principalmente en áreas urbanas; la segunda fase comprende el uso de lugares de parqueo, para permitir la recarga simultánea de varias unidades de vehículos y facilitar el balance de la carga en la red de distribución; la tercera fase requiere desarrollar la infraestructura de carga en edificaciones residenciales (International Energy Agency, 2017).

Ilustración 13. Desarrollo de infraestructura de carga en construcciones con número creciente de VE.



Fuente: (International Energy Agency, 2017)

A medida que el mercado de los VE continúe evolucionando, se espera que el sector privado juegue un papel importante en la oferta de tarifas de energía eléctrica, mediante la competición con sus pares en el mercado, conllevando al fortalecimiento de la infraestructura de carga y la innovación (Hall & Lutsey, 2017).

4.4.2. Impactos económicos

Los costos del sistema y las pérdidas asociadas crecen debido al aumento de la carga, aunque la carga controlada y la participación de energías renovables puede ayudar a mitigarlos hasta el 60%. Los usuarios de los vehículos eléctricos pueden recargarlos a bajo costo, sin embargo, el valor de adquisición del vehículo se considera una gran barrera debido a los sistemas de almacenamiento (baterías). La masificación de los VE, mejores políticas de transacción energética y la implementación de estrategias de carga, contribuyen a reducir sus costos (Yong et al., 2015). Las estaciones de carga también deben estar ubicadas en lugares que garanticen el máximo retorno posible

sobre la inversión y amplia capacidad de la red, estos aspectos deben ser revisados tanto por el gobierno como por los stakeholders del proyecto. En el caso de un parqueadero, se debe procurar que el punto sea visible y accesible a varios vehículos eléctricos a la vez, por ejemplo, en la mitad, donde 6 vehículos se pueden conectar en lugar de una esquina donde estaría disponible para 2 o 3 vehículos únicamente (Hall & Lutsey, 2017).

Los gobiernos nacionales han basado su política tributaria en tasas impuestas a los combustibles fósiles, por ejemplo, en el caso de Colombia este ítem representa el 32,7% del precio de la gasolina y el 21.7% del diesel, por ello a medida que la implementación de los VE en Colombia reemplace cada vez más a los ICEVs, los incentivos que pudieran ser aplicados en el país, como se reseñó anteriormente, serán más reducidos y las tasas impositivas se irán trasladando a los VE para continuar con la política fiscal del estado.

4.4.3. Impacto medio ambiental

Las emisiones de GEI producidas por los VE bajo el concepto de “wheels-to-wheels” indican que a lo largo de su vida útil presenta las emisiones más bajas frente al ICEV, siempre y cuando las fuentes que le suministran energía eléctrica sean renovables y no operan por medio de combustibles fósiles (Frades, 2014; Yong et al., 2015).

4.5. Barreras para la implementación de los vehículos eléctricos

De acuerdo con la revisión de los programas mencionados en la Tabla 7, las principales barreras identificadas para el aumento del uso de vehículos eléctricos en el mundo, son la ausencia y necesidad de información y acuerdos sobre política pública, efectos potenciales de la adopción de los VE en la red eléctrica, problemas financieros, falta de desarrollo de infraestructura de carga y la adopción de un único estándar (ver Anexo 6), por lo que su competidor directo (ICEV), al estar más tiempo en el mercado, tiene una gran ventaja, que está representada en el número de estaciones de combustible en el mundo y mayor conocimiento generalizado de su funcionamiento. El desarrollo de una red robusta de carga es un requisito clave para la transición hacia la electromovilidad a gran escala.

Según Losada (2015), para superar dichas barreras se requieren compromisos con los gobiernos nacionales y locales para la contratación de flotas públicas y puntos de carga, con el propósito de mostrar un verdadero interés por promover la movilidad con cero emisiones, asimismo, es necesario realizar campañas de promoción para que los usuarios se familiaricen con esta tecnología y se aumente su interés por el VE.

4.6. Problemas para la implementación de VE en Latinoamérica

Los países desarrollados estudiados previamente, han implementado por medio de programas una serie de medidas para estimular las ventas de VE, y así lograr una mayor independencia energética, descarbonar el transporte y alcanzar los objetivos con relación al cambio climático. Sin embargo, en Latinoamérica es poco probable que se puedan implementar varias de estas medidas, en primer lugar, porque no está

claro si se deben replicar estas acciones, en parte por la gran cantidad de recursos fiscales que se necesitan para igualar los beneficios entre los VE y los ICEV como costos y rango de operación, y por otro lado muchos argumentos apuntan a que los programas gubernamentales en Latinoamérica deben estar dirigidos a mejorar la calidad del transporte público. Sin embargo, si se hace necesario empezar a dictar medidas para enfrentar el posible despliegue del VE en la región, acelerar la transición hacia la electromovilidad, sin gastar gran cantidad de recursos públicos y privados (Washington et al., 2016). Esta sección se desarrolla a partir de la revisión del informe denominado “El panorama de la incorporación de los vehículos eléctricos en américa latina”, realizado por Washington et al. (2016) y describe los principales retos en el mercado que enfrentan los VE en su introducción al contexto latinoamericano.

4.6.1. Costo inicial del VE

Los costos de fabricación del VE son más altos que los ICEVs y por consiguiente su precio final también lo es. En la siguiente tabla se hace una comparación de precios entre vehículos eléctricos y de motor de combustión interna, en la que también se puede observar que los recargos a los precios oscilan entre 10% y 30% para los vehículos híbridos eléctricos, y entre 50% a 80% para los vehículos eléctricos de baterías.

Tabla 8. Comparación del precio de venta entre VE y ICEVs (sin impuestos)

CLASE DE EV	VEHÍCULO ELÉCTRICO			VEHÍCULO DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA			RECARGO DEL PRECIO
	FABRICANTE	MODELO	PRECIO DE VENTA [USD]	FABRICANTE	MODELO	PRECIO DE VENTA [USD]	
HEV	Toyota	Avalon Hybrid	\$ 36.470	Toyota	Avalon	\$ 32.285	12,90%
	BMW	Active Hybrid 5	\$ 61.650	BMW	528i	\$ 49.750	23,90%
	Honda	Accord Hybrid	\$ 29.155	Honda	Accord	\$ 21.955	32,80%
	Chevrolet	Volt	\$ 34.170	Chevrolet	Malibu	\$ 22.340	52,90%
PHEV	Honda	Accord Plug-in Hybrid	\$ 39.780	Honda	Accord	\$ 21.955	81,20%
	Mitsubishi	i-MiEV	\$ 22.995	Mitsubishi	Mirage	\$ 12.995	76,90%
	Chevrolet	Spark EV	\$ 26.670	Chevrolet	Spark	\$ 12.270	117,30%
BEV	Nissan	Leaf	\$ 29.010	Nissan	Versa	\$ 11.990	141,90%

Fuente: (Washington et al., 2016)

Otro de los problemas encontrados es la imposición de tasas que se aplicarían en los países latinoamericanos para la importación de VE, lo que incrementaría su valor comercial (como el IVA) y los impuestos anuales a la propiedad, los cuales dependen directamente del precio del vehículo, es decir, en el marco regulatorio actual, los usuarios de VE tendrían que pagar una tasa más alta anualmente.

Tabla 9. Estructura tributaria para VE en seis países latinoamericanos

IMPUESTO	ARGENTINA		BRASIL		CHILE		COLOMBIA		MÉXICO		PERÚ	
	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV
IMPUESTO AL IMPORTE	0,5% ²	35,5% ³	0%	35% ⁵	6%	6%	35%	35% ⁸	0%	0%	9%	9%
VALOR AGREGADO	41%	41%	43% ⁶	43% ⁶	19%	19%	16%	16%	16%	16%	17%	17%
OTRO	8,5%	58,5% ⁴	11,6% ⁷	11,6% ⁷	0%	0%	8% ⁹	0%	4% ¹⁰	0%	37% ¹¹	37% ¹¹
TOTAL (SUMA) ¹	50%	135%	54,6%	89,6%	25%	25%	59%	51%	20%	16%	63%	63%

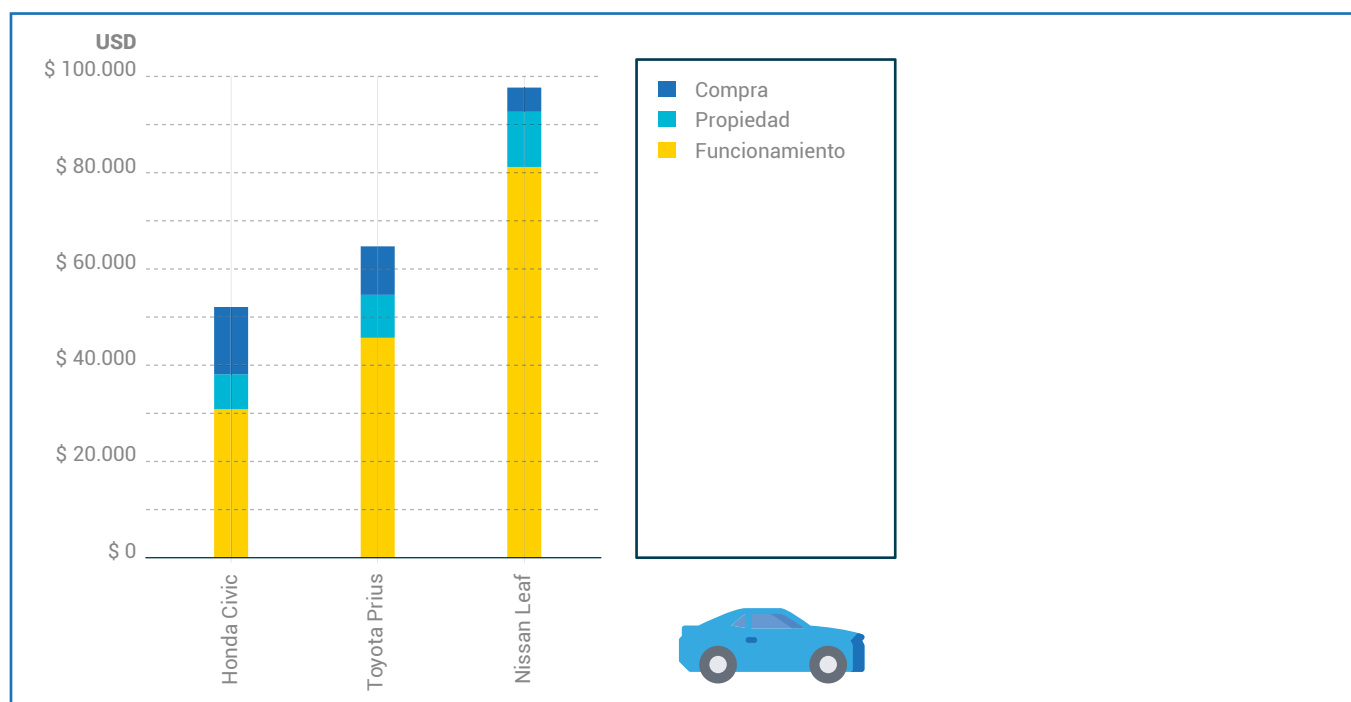
Fuente: (Washington et al., 2016)¹⁰

4.6.2. Costo total de la propiedad

Para este análisis se realizaron una serie de suposiciones¹¹ (los modelos estudiados no están presentes en todos los mercados estudiados), para comparar los precios de infraestructura de carga, compra y operación normal del VE en varios países latinoamericanos, para los modelos Honda Civic (ICEV), Toyota Prius (HEV) y Nissan Leaf (vehículo híbrido de batería BEV).

¹⁰ Para mayor información de cada impuesto, consultar los subíndices en Washington et al. (2016) p. 13

¹¹ Revisar Washington et al. (2016) p. 14

Ilustración 14. Comparación del costo total de propiedad para los ICEV, HEV y BEV para Colombia

Fuente: (Washington et al., 2016)

4.6.3. Recomendaciones

Teniendo en cuenta que aún los beneficios asociados a la implementación de VE resultan insuficientes respecto a las inversiones realizadas, los gobiernos latinoamericanos pueden actuar temprano y permitir una transición más rápida y menos traumática para los VE en las siguientes décadas, mediante la ejecución de acciones de bajo costo como:

- Exigir un porcentaje mínimo de plazas para estacionamientos en nuevos establecimientos con infraestructura eléctrica para incrementar la disponibilidad de puntos de carga en los hogares y lugares de trabajo.
- Establecer regulaciones claras para facilitar el desarrollo de servicios de carga, en empresas que prestan otros servicios como hoteles, tiendas o centros comerciales.
- Apoyar la armonización de los estándares y la interoperabilidad de los sistemas de carga.
- Introducir la tarifa horaria de la energía para incentivar la carga de los VE fuera de las horas pico, lo que reduciría la necesidad de expandir el sistema eléctrico actual.
- Promocionar iniciativas que incrementen la conciencia social de las tecnologías de los VE, como los proyectos piloto de taxis eléctricos, las compras públicas de flotas eléctricas y esquemas de etiquetado.
- Apoyar las inversiones de capital privado, actividades de investigación y desarrollo para expandir o crear industrias de valor agregado en los mercados de VE y de baterías.
- Implementar estándares más estrictos para contaminantes locales y emisiones de GEI para vehículos de pasajeros.

A medida que el mercado de VE promueva la reducción de costos de adquisición, infraestructura y mantenimiento, los países latinoamericanos deberán implementar medidas como incentivos financieros y no financieros, y desarrollar una infraestructura de carga apropiada a sus condiciones geográficas, demográficas y socioeconómicas.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en Revisión de Programas de Fomento a Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

5. Referencias Bibliográficas

Bogotá
Abril de 2018

5. Referencias Bibliográficas

Arango Alzate, B., Tamayo Giraldo, L., & Fadul Barbosa, A. (2012). Vigilancia tecnológica: metodologías y aplicaciones. *Gestión de las Personas y Tecnología*, (13), 154–161.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2015). Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Cop21, 21930, 18. Recuperado a partir de http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf%5Cnhttps://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf

Dixon, J. (2010). Energy storage for electric vehicles. 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology, 20–26. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2010.5472647>

EY. (2017). Estructurar el mapa de ruta para vehículos de bajas y cero emisiones, Producto 3 - Diagnóstico de Colombia. UPME.

Frades, M. (2014). A Guide to the Lessons Learned from the Clean Cities Community Electric Vehicle Readiness Projects, (January), 1–61. Recuperado a partir de http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/guide_ev_projects.pdf

Hall, D., & Lutsey, N. (2017). Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure, (October). Recuperado a partir de http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EV-charging-best-practices_ICCT-white-paper_04102017_vF.pdf

Hall, D., Moultak, M., & Lutsey, N. (2017). Electric vehicle capitals of the world, (March), 57.

Hannan, M. A., Hoque, M. M., Mohamed, A., & Ayob, A. (2017a). Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(August 2016), 771–789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.171>

Herring, J. P. (1999). Key intelligence topics: A process to identify and define intelligence needs. *Competitive Intelligence Review*, 10(2), 4–14. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6386\(199932\)10:2<4::AID-CIR3>3.3.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6386(199932)10:2<4::AID-CIR3>3.3.CO;2-3)

International Energy Agency. (2017). Global EV Outlook 2017: Two million and counting. IEA Publications, 1–71. <https://doi.org/10.1787/9789264278882-en>

Losada, S. (2015). Análisis del mercado del vehículo eléctrico, 18. Recuperado a partir de <http://www.fenercom.com/forovehiculoelectrico/ponencias/05-Analisis-del-mercado-del-vehiculo-elctrico-AEDIVE-Fenercom.pdf>

Palop, F., & Vicente, J. M. (1999). Vigilancia Tecnológica E Inteligencia Competitiva. Su Potencial Para La Empresa Española. ... *Gestión de las Persona y ...*, 116.

Ren, G., Ma, G., & Cong, N. (2015). Review of electrical energy storage system for vehicular applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.003>

Sánchez-Torres, J. M. (2017). Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva. Guía de aplicación Vigilancia Tecnológica, Inteligencia Competitiva y Prospectiva. Versión Preliminar. (Vol. 1). Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Sánchez-Torres, J. M., & Palop Marro, F. (2002). Herramientas de Software especializadas para Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva. Triz XXI, 1, 1–15.

Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>

Washington, D. C., Washington, D. C., Kaul, V., Francisco, S., Isla, L., & Kaul, V. (2016). La Incorporación De Los Vehículos Eléctricos En América Latina.

Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulanathan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130>



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en Revisión de Programas de Fomento a Vehículos Eléctricos a Nivel Mundial

Anexos

Bogotá
Abril de 2018

Anexo 1. Anexo Metodológico

DEFINICIÓN DE NECESIDADES DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA			
POR QUÉ	El sector del transporte es uno de los consumidores mayores de energía en Colombia y sus fuentes actuales son principalmente los combustibles fósiles. Las tendencias consignadas en el análisis del PEN2050 pronostican cambios en las fuentes de energía para este sector y tecnologías que puedan ser implementadas en Colombia con bajas o cero emisiones.		
PARA QUÉ	Identificar características de infraestructura para la penetración de tecnologías de		
Factores críticos de vigilancia	Cuestión Crítica a Vigilar (preguntas de vigilancia)	Descriptores (KW, Sintagmas)	Restrictor (delimitación geográfica, años, etc.)
Tendencias en investigación para infraestructura de vehículos de bajas y cero emisiones	CCV 1.1: ¿Cuáles son características, ventajas y desventajas de aquellas tecnologías en investigación para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos?	Electric vehicle, EV, new energy vehicle, battery electric vehicle, hybrid electric vehicle, plug-in hybrid electric vehicle, pure electric vehicle, all-electric vehicle, fuel cell vehicle Electricity storage, electrical energy storage system, Energy storage, energy storage system Electric vehicle technologies, EV technologies, EV deployments	Estados Unidos, Unión Europea, China, Brasil 2008-2018
	CCV 1.2: ¿Cuáles son las características de los programas de fomento que están siendo implementados a nivel mundial para dar soporte y apoyo a la recarga de vehículos eléctricos?	Electric vehicle charge program	Mundial 2008-2018
Experto(s) de consulta			

Anexo 2. Ecuaciones de Búsqueda

BITÁCORA ECUACIONES DE BÚSQUEDA		
Preguntas de Vigilancia tecnológica	Sintagmas y Palabras Clave	
¿Cuáles son las tecnologías en investigación para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos, sus ventajas y desventajas?	Electric vehicle, energy storage, review, advantages and disadvantages.	
Fecha	Ecuación de búsqueda	Base de Datos
Feb. 26 2018	TITLE-ABS-KEY ("electric vehicle") AND ("energy storage" OR "energies storage" OR "energy storage systems") AND PUBYEAR > 2008	Scopus
Feb. 26 2018	TITLE-ABS-KEY ("electric vehicle") AND (review OR outlook OR challenge* OR overview OR trends) AND ("energy storage" OR "energies storage" OR "energy storage systems") AND PUBYEAR > 2008	Scopus
Feb. 26 2018	TITLE-ABS-KEY ("electric vehicle") AND (advantag* OR disadvant*) AND (review OR outlook OR challenge* OR overview OR trends) AND ("energy storage" OR "energies storage" OR "energy storage systems") AND PUBYEAR > 2008	Scopus
Feb. 26 2018	TITLE-ABS-KEY ("electric vehicle" OR "EV systems" OR "EV applications" OR "new energy vehicle" OR "battery electric vehicle" OR "hybrid electric vehicle" OR "plug-ion hybrid electric vehicle" OR "pure electric vehicle" OR "all-electric vehicle" OR "fuel cell vehicle" OR "photovoltaic electric vehicle") AND (advantag* OR disadvant*) AND (review OR outlook OR challenge* OR overview OR trends) AND ("energy storage" OR "energies storage" OR "energy storage systems" OR "mechanical storage systems" OR "electrochemical storage systems" OR "chemical storage systems" OR "electrical storage systems" OR "thermal storage" OR "hybrid storage systems") AND PUBYEAR > 2008	Scopus
Feb. 26 2018	TITLE-ABS-KEY ("electric vehicle" OR "EV systems" OR "EV applications" OR "new energy vehicle" OR "battery electric vehicle" OR "hybrid electric vehicle" OR "plug-ion hybrid electric vehicle" OR "pure electric vehicle" OR "all-electric vehicle" OR "fuel cell vehicle" OR "photovoltaic electric vehicle") AND (advantag* OR disadvant*) AND (review OR outlook OR challenge* OR overview OR trends) AND ("energy storage" OR "energies storage" OR "energy storage systems" OR "mechanical storage systems" OR "electrochemical storage systems" OR "chemical storage systems" OR "electrical storage systems" OR "thermal storage" OR "hybrid storage systems") AND PUBYEAR > 2008 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE,"Spanish"))	Scopus

TITLE-ABS-KEY (("electric vehicle" OR "EV systems" OR "EV applications" OR "new energy vehicle" OR "battery electric vehicle" OR "hybrid electric vehicle" OR "plug-ion hybrid electric vehicle" OR "pure electric vehicle" OR "all-electric vehicle" OR "fuel cell vehicle" OR "photovoltaic electric vehicle") AND ("energy storage" OR "energies storage" OR "energy storage systems" OR "mechanical storage systems" OR "electrochemical storage systems" OR "chemical storage systems" OR "electrical storage systems" OR "thermal storage" OR "hybrid storage systems")) AND (advantag* OR disadvant*) AND (review OR outlook OR challenge* OR overview OR trends) AND PUBYEAR > 2008 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Spanish"))	Scopus
--	--------

Mediante varias búsquedas iniciales no estructuradas se pudieron reconocer algunas palabras clave para el propósito del ejercicio, como lo son: electric vehicle, energy storage, review, advantages and disadvantages.

Seguido a ello, se procedió a crear la ecuación para las búsquedas estructuradas en la base de datos Scopus teniendo en cuenta restricciones de año (desde el 2008) y de idioma (sólo inglés y español). A medida que se encontraban artículos de interés se refinaba la ecuación hasta obtener un resultado satisfactorio de 271 artículos, el cual se utilizó para avanzar a la etapa de análisis del ejercicio de VT.

El archivo.ris descargado se encuentra organizado del artículo con mayor a menor número de citaciones.

Posteriormente, se eliminaron artículos que contienen información principalmente de:

- Estrategias para la carga de vehículos eléctricos.
- Análisis de los impactos técnicos que se presentarían al ingresar vehículos eléctricos masivamente al mercado.
- Estudios de ciencias de materiales para mejorar tecnologías de almacenamiento
- Arquitecturas y tecnologías eléctricos adaptadas para la recarga de energía de vehículos eléctricos.
- Métodos computacionales, algoritmos y simulaciones para mejorar la eficiencia de la recarga de vehículos eléctricos.

Realizado este paso fueron seleccionados un total de 44 artículos para el desarrollo de un análisis profundo.

Anexo 3. Marco regulatorio en Colombia

El PROURE¹², el Plan Energético Nacional, POTs municipales y los planes indicativos de la UPME, son las principales bases regulatorias para la implementación de vehículos eléctricos por medio de políticas de incentivos y planes piloto, con el objetivo de adoptar esta tecnología en la matriz de consumo energético del país (EY, 2017).

En la siguiente tabla se presentan las principales normas que se han emitido para la incorporación de vehículos eléctricos.

Tabla 10. Principales normas para la incorporación de VE

Leyes o normas	Disposiciones
Ley 697 de 2001	Se crea el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de Energía no Convencionales "Proure", en desarrollo del cual el Gobierno Nacional establecerá incentivos de conformidad con las normas legales vigentes.
Resolución 18-0919 de 2010 (Min Minas)	Se adopta el Plan de Acción indicativo 2010 - 2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Fuentes no Convencionales de Energía, Proure, se definen sus objetivos, subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto
Decreto 2909 de 2013	Establecer un contingente anual de importación de 750 unidades con gravamen arancelario del cero por ciento (0%), para la importación de vehículos con motor eléctrico, clasificables por las subpartidas arancelarias 8702.90.91.40, 8704.90.00.11, 8702.90.99.40, 8703.90.00.10 y 8704.90.00.93.
Resolución 186 de 2012 (Min Ambiente)	Se refiere a que en las normas tributarias queda explícito que serán beneficiarias de exclusión de IVA y deducción de renta por inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente, los bienes, elementos, equipos y maquinaria destinados a proyectos, programas o actividades de reducción en el consumo de energía y/o eficiencia energética siempre y cuando correspondan a la implementación o logro de metas ambientales concertada con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 - 2022	Objetivo general: Definir las acciones estratégicas y sectoriales que permitan alcanzar las metas en materia de eficiencia energética; de manera que se contribuya a la seguridad energética y al cumplimiento de compromisos internacionales en temas ambientales; generando impactos positivos en la competitividad del país y en el incremento de la calidad de vida de los colombianos.

Fuente: (EY, 2017) informe en construcción

En el 2011 se realizó un convenio Codensa – Emgesa – Estado para importar 50 taxis eléctricos y realizar pruebas piloto en Bogotá, Medellín y Cali. Luego, en el 2013 mediante el decreto 2909 se autoriza el ingreso de 750 vehículos eléctricos e híbridos cada año, exentos de intereses aduaneros para carros (incluido cargador) de costo menor a los US\$52.000. En el 2017, por medio del decreto 1116 se establece una reducción temporal del 0% de gravamen para vehículos eléctricos y 5% para vehículos híbridos. Actualmente, Codensa lidera la operación del primer piloto operativo en Transmilenio, de un bus articulado 18 metros y está participando en el desarrollo de proyectos como el tranvía, Metro y BRT's eléctricos, y la instalación de sistemas de recarga para vehículos

¹² Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales

eléctricos. En el 2015 se expidió el Decreto 600, que propone que las nuevas reposiciones de taxis de combustión interna sean por vehículos de bajas y cero emisiones, y además estarán exentos de restricciones de circulación. Los decretos 677 de 2011 y 376 de 2015, adoptan y adaptan un plan piloto para taxis a 10 años. Sin embargo, este decreto se derogó bajo la actual administración.

Una de las principales actividades desarrollada por EPM, fue la realización de un proyecto piloto con 10 vehículos y 12 motos, en el 2012. Para el año 2015, adoptaron como medida política la decisión de que EPM fuera el eje del sistema de movilidad eléctrica en la ciudad, y en el 2016 se ponen en marcha proyectos de instalación de infraestructura de carga pública e interna, y de incentivos tributarios para la adquisición de vehículos eléctricos.

A3.1. Barreras encontradas en Colombia

La implementación de transporte eléctrico encuentra las siguientes barreras:

A3.1.1. Institucional

A nivel institucional se evidencian barreras en cuanto a la falta de un gremio para la industria de vehículos eléctricos, que aporten ideas al desarrollo de políticas públicas mediante la exposición de sus intereses. Así mismo, la industria automotriz no cuenta con incentivos claros para la producción de vehículos eléctricos, ni alianzas sólidas para el desarrollo de I+D+i con el sector académico. Finalmente, no existen métodos que permitan cuantificar costos, del uso de combustibles fósiles, en la salud pública de los colombianos debido a la contaminación que generan.

A3.1.2. Económicas

La inversión inicial para adquirir un vehículo eléctrico es alta, solamente el ahorro en el costo del combustible, justifica su uso a largo plazo. Por lo anterior se requieren nuevos agentes, incentivos, economías de escala y reducción del costo de los vehículos eléctricos, para que su masificación sea mayor. En cuanto a los taxis, el valor del cupo y el costo del vehículo no hace viable el uso de esta tecnología; es necesario encontrar métodos que permitan una más rápida incorporación, pues el incremento de cupos hace que su valor decaiga (oferta-demanda), yendo en contravía de los intereses del gremio.

La transferencia de tecnología se puede ver afectada por variaciones de la moneda, ya que ponen en riesgo la viabilidad de los vehículos eléctricos en Colombia (tecnología importada).

A3.1.3. Tecnológicas

El alto costo inicial de las baterías y su corta vida útil, aumentan las limitaciones para la incorporación de los vehículos eléctricos a Colombia. Un posible cambio de baterías antes de tiempo representa un riesgo muy alto para el propietario del vehículo (Universidad Nacional de Colombia, 2014). Así mismo, en cuanto a infraestructura se hace necesario adecuar sistemas eléctricos residenciales y estaciones de recarga rápida.

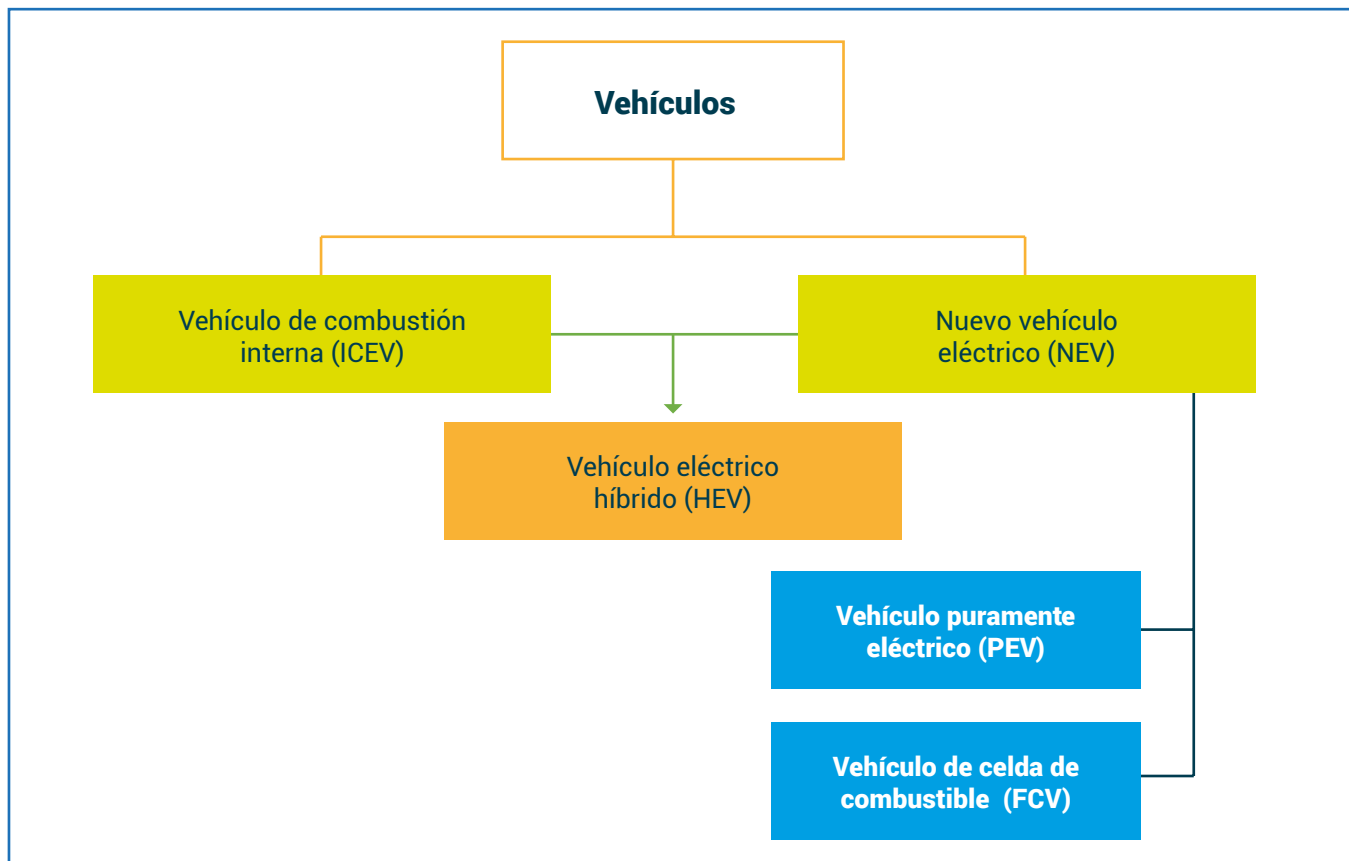
A3.1.4. Normativas

Debido a los continuos avances mundiales en I+D+i para vehículos eléctricos, no se pueden realizar normas para los sistemas de recarga para su aplicación en Colombia. Sin embargo, se debe estar atento al vacío que se están generando en este tema, como por ejemplo en la certificación para este tipo de vehículos, la tarifa horaria de la energía, disposición de residuos y en la adecuación de espacios en edificios para poder promover leyes que impulsen su incorporación.

Anexo 4. Tipos de vehículos

Los vehículos existentes se pueden dividir en tres categorías, de acuerdo a la fuente de energía que utilizan para su funcionamiento: combustible fósil, eléctrica o híbrido (Tie & Tan, 2013).

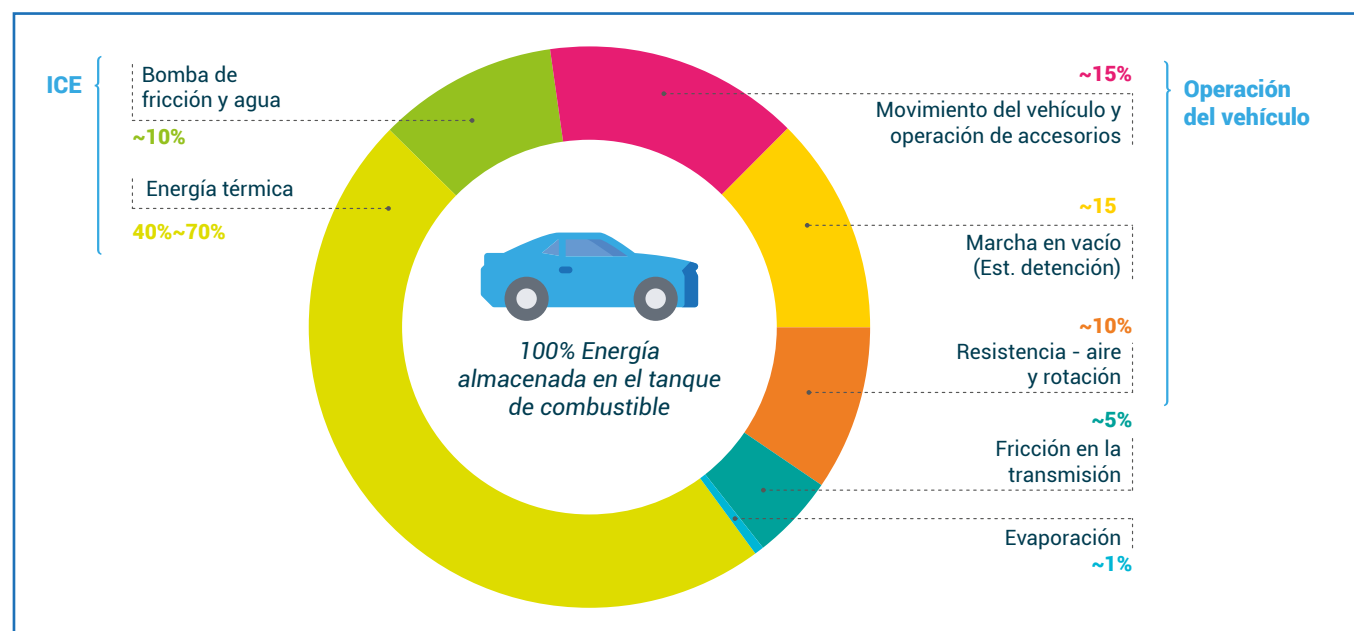
Ilustración 15. Clasificación de los vehículos



Fuente: Elaboración propia a partir de (Tie & Tan, 2013)

A4.1. Vehículos de combustión interna (ICEVs)

Los ICEVs tienen una cámara de combustión que transforma la energía química en calórica y cinética para propulsar el vehículo. Dos clases de ICEVs se pueden hallar de acuerdo a la presencia de un motor eléctrico (ME): 1) sin ME y 2) el microhíbrido (micro – HEV), el cual presenta un motor de potencia menor a 5 kW para reiniciarlo después de algún estado de detención (Tie & Tan, 2013).

Ilustración 16. Flujo de energía típico en un vehículo de combustión interna

Fuente: Traducción libre, (Tie & Tan, 2013)

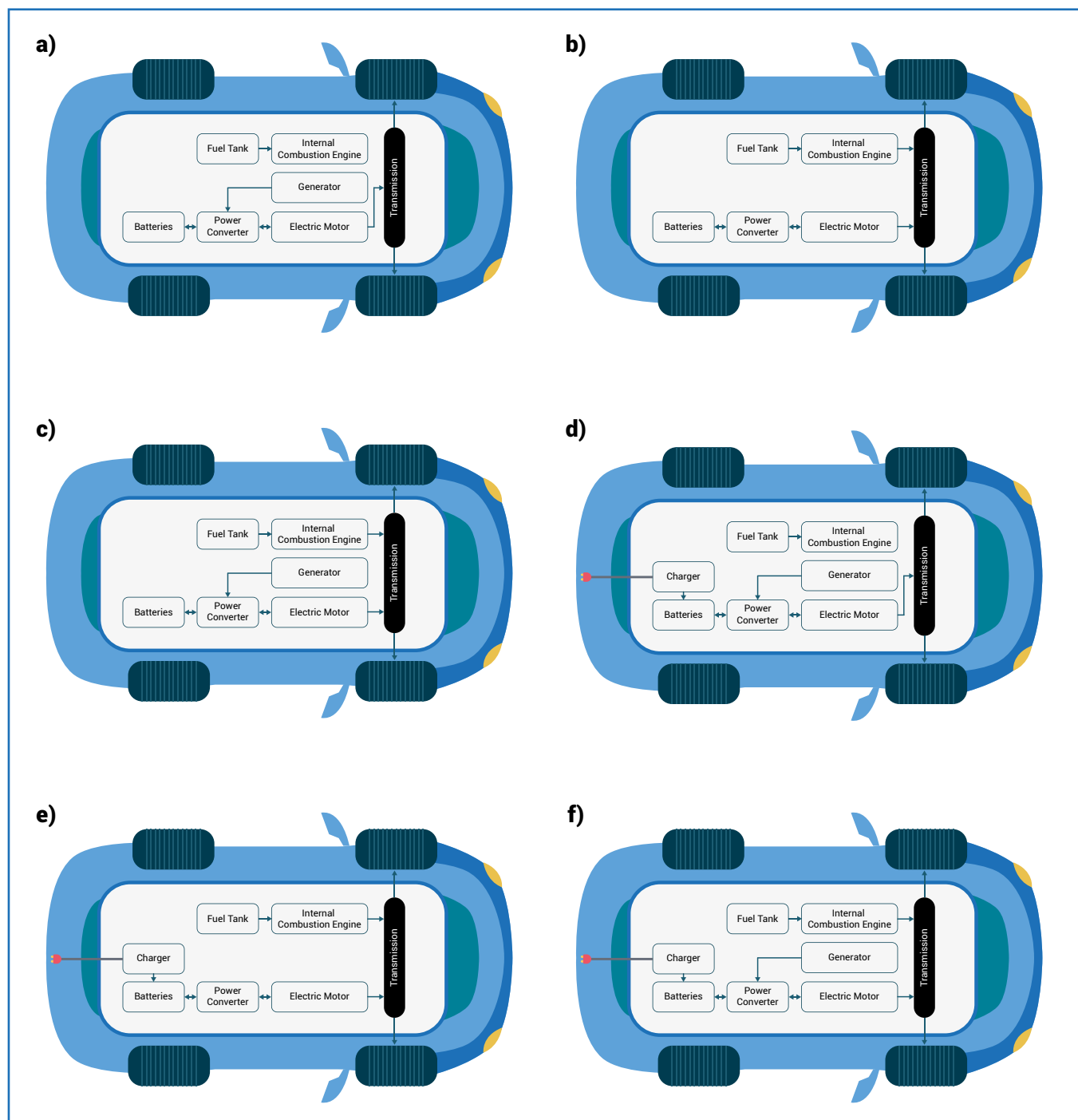
Como se puede observar en la ilustración 3, los ICEVs pueden presentar pérdidas de energía del 40% al 70% en el proceso de combustión, representado en energía térmica, reduciendo su eficiencia notablemente.

A4.2. El nuevo vehículo eléctrico (NEV)

El NEV se define como un vehículo que opera por medio de electricidad generada de fuentes renovables o combustibles alternativos y la energía se encuentra almacenada en baterías, celdas de combustible y/o ultracondensadores (Guizhou Ren et al., 2015). Las principales características, que los diferencia de los vehículos de combustión interna, son la mayor eficiencia energética, resistencia, confiabilidad, la regeneración de energía y el alto par de torsión (Dixon, 2010).

Existen distintos tipos de vehículos eléctricos en investigación y en el mercado, entre los más importantes están los vehículos eléctricos híbridos (HEV), los vehículos eléctricos a batería (BEV), los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV), los vehículos eléctricos fotovoltaicos y los vehículos eléctricos con celda de combustible (Hannan et al., 2017a; Yong et al., 2015). Aunque se pueden agrupar en tres categorías: híbridos, puramente eléctricos y de celda de combustible como se observa en la Ilustración 17. La principal diferencia existente entre un HEV y un PHEV es la imposibilidad del primero de conectarse a la red de energía para recargarse (Yong et al., 2015).

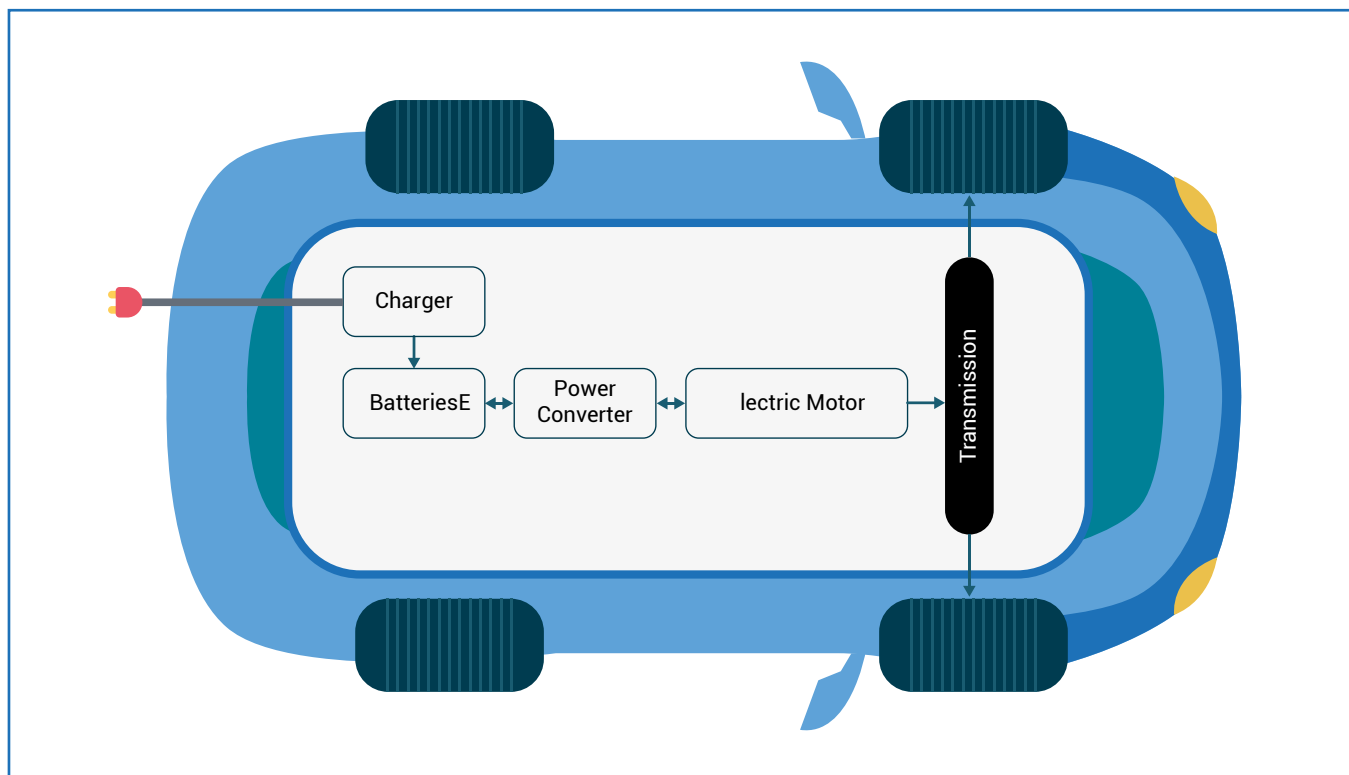
Ilustración 17. Configuraciones electromecánicas de los HEV en: (a) serie, (b) paralelo, (c) serie-paralelo; y de los PHEV en: (a) serie, (b) paralelo, (c) serie-paralelo



Fuente: (Tie & Tan, 2013)

Los BEV son propulsados totalmente por la energía almacenada en las baterías y la distancia recorrida depende directamente de su capacidad de almacenamiento.

Ilustración 18. Configuración electromecánica del BEV



Fuente: (Tie & Tan, 2013)

Tabla 11. Resumen de las características de los ICEVs y NEVs

Tipo de vehículo	Energía utilizada	Clases	Características	Ventajas	Desventajas
ICEV	Combustible fósil	Sin motor eléctrico	-	-	Pérdidas asociadas a la combustión (energía térmica)
		Micro híbrido	Motor eléctrico de 5 kW o menos	Menor consumo de energía en estados de detención	
NEV	Combustible fósil	HEV	Baterías para almacenar la energía proveniente del motor (eléctrico o ICE)	Mayor eficiencia energética Confiabilidad del sistema Regeneración de energía Alto par de torsión	No se puede conectar a la red eléctrica para recargarse
	Energía eléctrica	PHEV	Baterías para almacenar la energía proveniente del motor (eléctrico o ICE) y de la red eléctrica	- Se puede conectar a la red eléctrica para recargarse	Requiere mayor espacio para el sistema de carga
	Energía eléctrica	BEV	Baterías para almacenar la energía proveniente de la red eléctrica	Emisiones de GEI mínimas	La distancia del recorrido depende únicamente de la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías
	Hidrógeno (Energía química) Energía eléctrica	FCEV	Celda de combustible como convertidor de energía química en eléctrica	Emisiones de GEI mínimas	Tecnología en investigación Dificultades técnicas para el almacenamiento de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia basado en (Dixon, 2010; G Ren et al., 2015; Tie & Tan, 2013; Yong et al., 2015)

Anexo 5. Sistemas de recarga para vehículos eléctricos

Los sistemas de recarga para vehículos eléctricos requieren integrar las tecnologías de cargadores para las baterías, la infraestructura disponible en cuanto a puntos y estaciones de carga y las normas de estandarización del sistema. En esta sección se muestra la revisión de los artículos y programas alrededor de este tema.

Los puntos de carga se configuran como otro de los desafíos a enfrentar, ya que complementan el funcionamiento de las baterías de los VE, debido a sus restricciones de capacidad de almacenamiento, aunque actualmente no se encuentran ampliamente disponibles y accesibles a los usuarios. La siguiente tabla resume la clasificación y las tecnologías disponibles para los puntos de carga de los VE, en el que la potencia eléctrica de cada nivel, determina el tiempo requerido para recargar su sistema de almacenamiento de energía.

A5.1. Tipos de infraestructuras de carga

Las infraestructuras de carga pueden estar presentes en el sector residencial, comercial o público y en estaciones de carga ultrarrápida (Tie & Tan, 2013). No obstante, muchos de los VE actuales no ofrecen la posibilidad de recargarse a través de alguno de los tres niveles debido, a restricciones de acoplamiento eléctrico, tal es el caso del modelo PHEV Chevrolet Volt limitado a 3.6 kW y del BEV Nissan Leaf a 6.6 kW.

Tabla 12. Clasificación de los niveles de carga para VE

Clasificación	Método On-board Residencia1/Nivel1				Desventajas	Desventajas
	Modo 1		Modo2		Modo 3	Modo 4
Característica eléctrica	Monofásico 120/240Vac 16A 3.3kw	Trifásico 400Vac 16A 10kw	Monofásico 240Vac 32A 7kw	Trifásico 400Vac 32A 24kw	Trifásico 400Vac 63A 43kw	Corriente directa 50-700Vac 100-125A, 50-300kw
Periodo de carga	6-8h	2-3h	3-4h	1-2h	20-30min	< 20min
Protección	Protección de circuito contra sobrecarga		Protección básica con dispositivo de protección en el cable		Protección básica con sistema de control	Protección básica con sistema de control
Estándar enchufe	Local NF-C-15100 Toma corriente común		IEC 61851-1 IEC 60309 Toma corriente doméstica		IEC 61851-1 Toma corriente especial	IEC 62196 IEC 61851-1 Toma corriente DC

Fuente: (Tie & Tan, 2013)

A5.2. Cargadores

Los cargadores más comunes son los que rectifican la corriente alterna (AC) de la red a corriente continua (DC) para cargar la batería, y se transportan dentro del vehículo (on-board). Entre sus principales características están, el largo tiempo de carga (8 a 10 horas) y su pequeño tamaño, que reduce el peso del vehículo. No obstante, otro tipo de cargador es el que se encuentra en las estaciones de carga rápida (off-board), debido al gran tamaño del sistema, el cual utiliza un convertidor DC /DC y permite entregar energía eléctrica a las baterías del VE en un tiempo muy corto (10 a 30 minutos) (Yong et al., 2015).

Existen dos tipos de cargadores, denominados de acople inductivo (magnético) y acople conductivo (convencional). Los cargadores conductivos requieren conexión física entre el vehículo y la fuente de energía, mientras que los cargadores inductivos no la requieren debido a que funcionan por medio de acoplamiento magnético y brindan ventajas de seguridad y durabilidad, sin embargo requiere más desarrollo para mejorar su eficiencia (Yong et al., 2015). Dependiendo de la región y velocidad de carga, la forma física del cargador es diferente debido a las aplicaciones específicas definidas por el fabricante.

A5.3. Estándares

Las principales normas existentes son las expedidas por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) en Estados Unidos, la Comisión de Electromecánica Internacional (IEC) en la Unión Europea y la norma CHAdeMO EV en Japón. También existen otras expedidas por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), la Administración de Normalización de China (SAC) y CharIN Global a la que pertenece Tesla desde el 2016 (International Energy Agency, 2017; Yong et al., 2015).

El estándar de carga SAE EV clasifica los niveles de carga en el nivel 1, el nivel 2 y el nivel 3 tanto para CA como para CC. La carga de CA se realiza utilizando el cargador on-board del VE, mientras que la carga de CC se realiza a través del cargador off-board en la estación de carga.

El estándar IEC EV usa "tipos" y "modos" para la estandarización de carga. La IEC 62196-2 clasifica los sistemas de conexión EV en algunos tipos. Además, a través de IEC 61851-1 se introducen cuatro modos de carga EV, tres modos para CA y el tiempo estimado de carga entre tres y diez horas, y un cuarto modo para la carga de CC y su tiempo estimado de carga de diez minutos desde la red eléctrica externa.

La norma CHAdeMO, publicada en el 2012, designa los métodos de carga rápida para VE modernos para almacenar el 80% de la capacidad de las baterías en 30 minutos o menos mediante estaciones de carga rápida. Esta norma sirvió como insumo a la norma IEC en el 2014.

Ilustración 19. Cargadores AC más populares en el mercado.

SAE J1772	Tipo 2 (Mennekes)	Tesla (US)
		
Norte América y Japón	Europa y China	Vehículos Tesla en Norte América

Fuente: (Hall & Lutsey, 2017)

Ilustración 20. Cargadores DC más populares en el mercado.

CHAdeMO	CCS (Norte América)	CCS (Europa)
		
Nissan, Mitsubishi, Kia, Citroën, Peugeot	BMW, Daimler, Ford, Fiat Chrysler, General Motors, Honda, Hyundai, Volkswagen	

Fuente: (Hall & Lutsey, 2017)

A5.4. Gestión de la Información

Los gobiernos nacionales se deben encargar de definir los métodos para la recolección de información técnica sobre duración de carga y zonas de alta afluencia de usuarios, para tomar decisiones de mejora. Un sistema de información en tiempo real de lugares de carga, donde se pueda registrar y consultar información como la ubicación, el tipo, el estado operativo y el uso de la estación de carga, en mapas para consulta de los usuarios y operadores del servicio, resulta crucial para brindar información oportuna de la disponibilidad de los puntos, problemas técnicos y dirigir la toma de decisiones para realizar mantenimientos y financiar este tipo de proyectos (Frades, 2014; Hall & Lutsey, 2017).

Anexo 6. Barreras identificadas para la implementación de VE

A continuación se presentan las barreras identificadas en la compra, puntos de carga y efectos potenciales de la adopción de VE reseñadas en (Frades, 2014).

Tabla 13. Barreras para la adquisición del VE

<i>Financieras</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Costo inicial alto del VE debido a: <ul style="list-style-type: none"> o Es una nueva tecnología o La producción aún no ha alcanzado volúmenes manejados en economías de escala o Potencial incierto para la futura reducción del costo de las baterías • Los consumidores se fijan más en el precio inicial de los VE que en el costo total, lo que incluye ahorros potenciales de combustible y mantenimiento
<i>De información y coordinación</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Los usuarios potenciales no están familiarizados con los VE <ul style="list-style-type: none"> o Los usuarios no conocen los modelos disponibles, sus atributos (seguridad, eficiencia, ahorros de mantenimiento y combustible) y los incentivos otorgados por el gobierno o Los usuarios presentan preocupación por la degradación de las baterías y el costo de su remplazo • Los usuarios presentan ansiedad por: <ul style="list-style-type: none"> o Desconocer el amplio rango de recorrido de los HEV. o Sobreestimar el rango diario necesario para transportarse o No conocer las estaciones de carga disponibles en sus ciudades o Observar un número insuficiente de puntos de carga pública en su ciudad y en los corredores entre regiones. o Los rangos de los BEV que no satisfacen sus necesidades ocasionales para los recorridos de largas distancias • Los concesionarios no promocionan los VE debido a falta de capacitación y motivación • Los centros de servicio automotriz no están capacitados para revisar los VE • Los tomadores de decisiones políticas no están familiarizados con los VE y: <ul style="list-style-type: none"> o Desconocen los beneficios ambientales y económicos de los VE o Desconocen el marco regulatorio y las barreras presentadas para la preparación del mercado y adopción de los VE • No existe una estrategia de comunicación y coordinación entre socios potenciales y los usuarios finales.
<i>Políticas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Incentivos gubernamentales mal diseñados o inadecuados proporcionados para apoyar el desarrollo rápido del mercado • Indisponibilidad de tarifa horaria para los consumidores con lo que podrían ahorrar al recargar su vehículo en la noche • Opciones de VE limitadas y / o desactualizadas incluidas en las listas de ofertas estatales para flotas públicas • Barreras políticas a la instalación y utilización de la estación de carga (ver Tabla 12)

Fuente: (Frades, 2014), Traducción propia

Tabla 14. Barreras para la instalación y utilización de la estación de carga

<i>Financieras</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de carga doméstica a menudo no vendido o financiado con la compra de VE en el concesionario • Costo adicional del equipo de carga doméstica, instalación y permisos • Dificultad para establecer un caso comercial rentable para las estaciones de carga: <ul style="list-style-type: none"> o Las estaciones de carga experimentan bajas tasas de utilización durante el desarrollo temprano del mercado de PEV o Bajos márgenes en las ventas de electricidad en relación con los costos iniciales y los costos de mantenimiento de las estaciones de carga o Cargos por demanda de servicios eléctricos para carga rápida, especialmente en áreas menos pobladas o Dificultad para establecer los términos bajo los cuales los proveedores pueden ofrecer servicios en mercados regulados • Falta de fondos públicos o privados establecidos para la compra y / o mantenimiento de la infraestructura de cobro
<i>De información y coordinación</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad para proporcionar estaciones de carga en sitios residenciales, de trabajo y otros sitios de estacionamiento compartidos de unidades múltiples (es decir, costos, equidad, propiedad, asuntos administrativos y legales) • Los consumidores desconocen las estaciones de carga públicas existentes • Las cargas largas son un inconveniente para los conductores, especialmente cuando las estaciones de carga públicas son muy utilizadas y los conductores pueden tener que esperar a que otros finalicen. • Incertidumbre entre los planificadores públicos y los inversores privados sobre la intensidad futura y la ubicación de la demanda de estaciones de carga públicas • Incertidumbre sobre el nivel óptimo de energía de carga para instalar en estaciones públicas dadas las compensaciones entre la velocidad de carga y el costo de la estación, así como la incertidumbre sobre la demanda de VE (mayores necesidades de energía) versus PHEV (menores necesidades de energía) • Falta de compatibilidad entre los métodos de pago de la estación de carga, las comunicaciones y los estándares de carga rápida • Incertidumbre sobre las mejores prácticas para planificar sitios de estacionamiento con estaciones de carga públicas, incluido el cumplimiento de la Ley de Estadounidenses con Discapacidades (ADA) • Los esfuerzos para apoyar la instalación de la estación de carga no se aprovecharon completamente debido a la falta de comunicación y coordinación entre los socios potenciales

<i>Políticas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización insuficiente que dirige a los conductores de PEV a las estaciones de carga y a la señalización de la estación de carga no uniforme. • Procedimientos de permisos e inspección caros, complejos, prolongados y / o no uniformes para la instalación de estaciones de carga residenciales y de lugares de trabajo • Las reglas de zonificación locales no son claras para la ubicación de la estación de carga • El uso único para los espacios de carga públicos no puede hacerse sin nuevas ordenanzas
------------------	--

Fuente: (Frades, 2014), Traducción propia

Tabla 15. Barreras asociadas a los efectos potenciales de la adopción de los VE

<i>Efectos en la red eléctrica</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Incertidumbre sobre la demanda potencial de electricidad de alta potencia, particularmente en vecindarios residenciales o en ubicaciones de carga rápida. • Las empresas de electricidad desconocen, o no están seguros, sobre el número y la ubicación de los futuros propietarios de VE • Desafío de la planificación, el desarrollo y el despliegue de la tecnología y la infraestructura necesarias para habilitar los beneficios de vehículo a edificio (V2B) y de vehículo a red (V2G) de los VE
<i>Efectos de financiación e infraestructura de transporte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Preocupación a largo plazo sobre la disminución de la efectividad de los impuestos a la gasolina como fuente de financiación de la infraestructura de transporte debido a la adopción del VE • Idea errónea de que los VE contribuirán sustancialmente a la reducción de los ingresos tributarios de la gasolina en el corto plazo.
<i>Preocupación de equidad</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Preocupación de que los subsidios financieros públicos y otros incentivos, incluido el acceso al carril HOV y espacios de estacionamiento dedicados para PEV, se utilizarán desproporcionadamente por personas y hogares con mayores ingresos.

Fuente: (Frades, 2014), Traducción propia

Anexo 7. Características típicas de las baterías para vehículos eléctricos

A continuación, se muestran todas las baterías secundarias disponibles para los vehículos eléctricos, con sus respectivas características de energía específica, densidad de energía potencia específica, eficiencia energética, ciclo de vida, rango de temperatura de operación, costo por unidad de energía y propiedades.

Tabla 16. Características típicas de las baterías de los vehículos eléctricos

Tipo de batería	Energía ^a [W h/kg]	Densidad de energía ^a [W h/L]	Potencia específica ^b [W/kg]	Eficiencia energética [%]	Ciclo de vida (no. de ciclos)	Temperatura de operación [°C]	Costo [US \$/kWh]	Propiedades
Plomo ácido	30-50	60-100	200-400	70-90	2000 - 4500	-20-60	120-150	V-Bajo costo, tecnología madura, alta potencia específica;
								D-Baja energía específica, corta vida útil, requiere mucho mantenimiento
Ni-Fe	30-55	60-110	25-110	75	1200 - 4000	-10-45	150-200	V-Muy resistente, puede soportar el abuso físico y eléctrico, larga vida útil;
								D-baja energía específica, baja potencia y densidad de energía; alta autodescarga; alto costo y alto costo de mantenimiento
Ni-Zn	60-65	120-130	150-300	76	100 - 300	-10-50	100-200	V-Alta energía específica, sin degradación para carga / descarga profunda, alta potencia máxima;
								D- Alto costo, la vida se acorta por el rápido crecimiento de las dendritas
Ni-Cd	40-50	80-100	150-350	60-90	2000 - 3000	-40-60	300-350	V- Alta energía específica, sin degradación para carga / descarga;
								D- Toxicidad de cadmio de alto costo, problemas de reciclaje
Ni-MH	50-70	100-140	150-300	50-80	500 - 3000	-40-50	150-200	V-Alta energía específica, amplios rangos de temperatura, seguridad, larga vida útil;
								D- Alto costo, alta autodescarga, efecto de memoria

Ni-H ₂	60-70	100-120	150-350	80-90	6000 – 40000	-20-60	300-400	V- Alta tasa de buena capacidad. ciclo de vida extremadamente largo y tolerancia a la sobrecarga o sobredescarga sin daños; D- Costosa, autodescarga proporcional a la presión de H ₂ , baja densidad de energía volumétrica;
Zn-Cl ₂	65	90	60		200		-	V-Alta densidad de energía; D-Baja potencia específica; mantenimiento continuo;
Zn-Br ₂	65-75	60-70	90-110		300		150	V- Alta energía específica; carga rápida y bajo costo de material; D-baja potencia específica; alta reactividad de bromo; gran tamaño para circulación de electrolitos y control de temperatura;
Al-Air	190	190	16		50-80	-c	-	V-Alta energía específica; alto voltaje de terminal y alta capacidad de amperio hora; alta eficiencia coulombica; opera en un amplio rango de densidad de corriente; bajo costo de materiales; D-Pérdida debido al consumo de agua durante la descarga; es necesario reemplazar el ánodo de aluminio después de cada descarga;
Zn-Air	230	269	105		60	-c	90-120	V-Alta energía específica; técnicamente viable; la velocidad de reacción se controla variando el flujo de aire; mejor ciclo de vida; bajo costo; D-Dificultad en el diseño; reemplazo necesario del ánodo de zinc; problema de corto circuito;

Na-S	100	150	120	80	2500 – 4500	300–350	250–500	V-Alta densidad de energía y potencia, eficiencia relativamente alta, larga vida útil del ciclo; D- Relativamente costosa, la alta temperatura produce problemas de seguridad únicos
Na-NiCl ₂	86	149	150	80	2500 – 3000	250–350	160–300	V-Alta densidad de energía, menos corrosivo, intrínsecamente más seguro, buena tolerancia a la sobrecarga y sobredescarga que Na-S, alto ciclo de vida, menor costo que cualquier otra batería. D-baja potencia específica, gestión térmica, problema de autodescarga.
LiAl-FeS	130	220	240	80	> 1000	375–500	110	V-Alta potencia y densidades de energía tolerantes al abuso de congelación-descongelación, sobre-descarga y sobrecarga; bajo peso; D-Requiere sistema de gestión térmica; consume algo de energía almacenada para mantener la temperatura; bajo ciclo de vida.
LiAl-FeS ₂	180	350	400		> 1000	375–500	–	V-Alta potencia y densidades de energía tolerantes al abuso de congelación-descongelación, sobre-descarga y sobrecarga; bajo peso; D-Requiere sistema de gestión térmica; consume algo de energía almacenada para mantener la temperatura; bajo ciclo de vida.

Li-Polímero	155	200	315	70	> 1200	-20-60	> 125	V-Alta densidad de energía y energía específica, diseño delgado; operación de alto voltaje; factor de forma de alta relación de aspecto; sin efecto de memoria; tolerante al estado sobrecargado sin explosión; alta eficiencia energética; baja autodescarga; ciclo de larga vida; D- Alto costo, baja conductividad y densidad de potencia;
Li-Ion	120-140	240-280	200-300	70-85	1500 - 4500	-20-60	150-1300	V-Alta densidad de energía y energía específica, operación de alto voltaje; sin efecto de memoria; más ligero y más pequeño; alta eficiencia energética; baja autodescarga; ciclo de larga vida; D- Alto costo, vida acortada por DOD, afectada por la temperatura, frágil; necesita protección por sobrecarga y exceso de descarga;

Fuente: (Frades, 2014), Traducción propia