

# ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS INDIVIDUALES POR CARRETERA

Carlos Andrés Álvarez

## RESUMEN

La preocupación que surge por el cuidado del medio ambiente, específicamente respecto a las emisiones de gases contaminantes generadas por el sector transporte, han llevado a que la comunidad mundial se interese en el desarrollo tecnológico del transporte eléctrico. Estas alternativas de solución propenden a una perspectiva sostenible de la movilidad de pasajeros en las grandes ciudades.

Este artículo presenta la visión de diferentes estudios realizados a nivel mundial sobre la sostenibilidad de los vehículos eléctricos en el sistema de transporte. Se analiza la importancia que posee el transporte eléctrico con las metas de reducción de emisiones de gases contaminantes en países referentes a nivel mundial.

De igual manera, se presentan las diferentes alternativas tecnológicas que se han venido desarrollando en la última década, como consecuencia de la prioridad en la sustitución del motor de combustión interna y los combustibles fósiles: vehículos híbridos enchufables, vehículos eléctricos a batería y el vehículo de célula de combustible de hidrógeno. En este sentido, las políticas públicas son un posibilitador de gran importancia en la implementación de un transporte eléctrico en las ciudades, considerando aspectos como incentivos financieros, bonos a tecnologías verdes, seguridad energética, incentivos para el mejoramiento del ambiente, entre otros.

Finalmente, se analiza la sostenibilidad ambiental de los dos aspectos esenciales en el desarrollo de los vehículos eléctricos: las baterías y la infraestructura de recarga. Estos aspectos se ven como los aceleradores en la evolución económica del mercado de vehículos eléctricos. Las baterías por su alto costo y la relación proporcional entre densidad energética y autonomía de los vehículos, todavía se encuentran en desarrollo estrategias de disposición final. Y la infraestructura de recarga, que posibilita la operación continua y confiable de los vehículos, y por los impactos que representa para los sistemas de distribución de energía eléctrica.

## PALABRAS CLAVE

Vehículo eléctrico, batería, infraestructura de recarga, emisiones de gases de efecto invernadero, desarrollo sostenible.

## I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la preocupación por disminuir el impacto en el cambio climático y construir ciudades sostenibles, ha llevado a que las principales ciudades del mundo tomen acciones para afrontar los desafíos energéticos que se presentan. Algunos de los desafíos que se presentan son el incremento de la demanda energética en el sector transporte, principalmente dado por el uso de combustibles fósiles y gas natural en menor medida.

De acuerdo al último Balance Energético Colombiano 1975 - 2015 publicado por la UPME el 16 de septiembre de 2016, el sector transporte es uno de los principales consumidores de energía en la economía colombiana. En el año 2015, tuvo un consumo de 494.540 TJ, correspondiente a una participación del 41% de la distribución del consumo de energía, proveniente principalmente de productos derivados del petróleo, en una menor proporción gas natural, biocombustibles y electricidad<sup>1</sup>. Esta situación conlleva a que el sector transporte sea el mayor contribuyente de gases de efecto invernadero en Colombia, según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero – GEI del IDEAM, las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte han presentado un crecimiento cercano al 79% entre los años de 1990 y 2012, pasando de aproximadamente 18 Mton equivalentes de CO<sub>2</sub> a 31 Mton; siendo los departamentos de Bogotá, Antioquia y Valle los mayores aportantes a este incremento de emisiones contaminantes<sup>2</sup>.

En consecuencia, el sector transporte se ha convertido en un foco de interés en la búsqueda de tecnologías y fuentes de combustible que sustituyan a los combustibles fósiles, aportando a la mitigación del impacto ambiental y a la reducción de los niveles de emisión de CO<sub>2</sub>. Entre las nuevas tecnologías más limpias propuestas por el Global Fuel Economy Initiative –GFEI para el sector transporte se encuentran los vehículos eléctricos. Estas soluciones se han proliferado en países como Alemania, Noruega, Francia, España, Japón, Estados Unidos, Holanda, Reino Unido, entre otros, en búsqueda de una movilidad sostenible. En gran parte se debe a que el uso de motores eléctricos permite la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación acústica.

De otro lado, los vehículos eléctricos poseen una eficiencia superior a los de combustión interna, por ejemplo un automóvil a gasolina consume aproximadamente 244,57 MJ/100 km, un automóvil con funcionamiento a diésel consume en energía

---

1 UPME, "Balance Energético Colombiano 1975 - 2015." 16-Sep-2016.

2 IDEAM, "Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero - Colombia." 2016.

aproximadamente 204,40 MJ/100 km y un automóvil eléctrico tiene un consumo energético de 66,6 MJ/100 km recorridos, por lo que un vehículo eléctrico, a pesar de tener un peso mayor, consume en energía entre 3 y 4 veces menos que un motor diésel y uno de gasolina<sup>3</sup>. De igual manera, los vehículos eléctricos necesitan un número de aproximadamente 11,000 partes en su etapa de fabricación, mientras que un vehículo convencional tiene unas 30,000 partes, lo que resulta en una reducción de los costos del mantenimiento en aproximadamente el 40%<sup>4</sup>.

En Colombia el interés por mejorar la eficiencia y el consumo energético en el sector transporte y evitar las emisiones de gases de efecto invernadero, han llevado a que se adopten estrategias y se adelanten proyectos en busca de promover una movilidad sostenible. Un ejemplo de esto, ha sido la adopción, en el año 2012, de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), la cual forma parte del Plan Nacional de Desarrollo.

Por lo tanto, el este artículo presenta aspectos relevantes sobre la sostenibilidad en el sector transporte, y las alternativas que han adelantado otros países para contribuir con un transporte sostenible. Además indica los aspectos relevantes de sostenibilidad con las tecnologías disponibles en el mercado, el impacto y modelos de reutilización de las baterías, la importancia de las políticas públicas, y las dimensiones sociales, ambientales y económicas asociadas con la infraestructura de recarga para el suministro de energía eléctrica a los vehículos.

## II. ROL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN EL TRANSPORTE SOSTENIBLE

La Federación Europea de Transportes y Medio Ambiente definió el desarrollo sostenible del transporte como aquel que satisface las necesidades de movilidad de las personas, al mismo tiempo que protege la condición del medio ambiente, las condiciones de vida y las oportunidades de desarrollo económico de las generaciones futuras. De igual manera, la Asociación Internacional de Transporte Público, menciona que para implementar los principios de desarrollo sostenible con referencia al transporte y la habitabilidad de las ciudades, el transporte debe implementar tecnologías con baja huella de



3 Motor Pasión Futuro, "Eficiencia: vehículo de combustión vs vehículo eléctrico," Enero de-2012

4 Hincio, "Cadenas de Valor de la Tecnologías Climáticas para el Sector Automotriz." Mar-2017.

carbono, e intentar convertirse en un sistema interconectado e inteligente<sup>5</sup>.

En este sentido, los vehículos eléctricos son vistos con gran potencial para el desarrollo de un sistema de transporte sostenible. Por ejemplo, en el sureste de Suecia, se planea con la visión de que el “sector transporte identificará y aprovechará plenamente el potencial de los vehículos eléctricos para apoyar a una sociedad eficiente, y sostenible para los ciudadanos y las empresas”. En vista que los vehículos eléctricos (VE) desempeñan un papel fundamental para el desarrollo hacia el transporte por carretera sin fósiles en Suecia, debido a su mayor eficiencia y su posible independencia de fuentes de energía insostenibles.

En igual sentido, surge la posibilidad de ser alimentados con electricidad a partir de fuentes de energía renovable y gestionada de manera sostenible. Adicionalmente los vehículos eléctricos también pueden desempeñar un papel importante junto con las tecnologías avanzadas de la información para promover soluciones de sistemas integrados en beneficio del transporte sostenible y los sistemas energéticos<sup>6</sup>.

Sin embargo, en la implementación de tecnologías sostenibles surgen barreras de penetración en el mercado, ya que desafían las prácticas comerciales predominantes que dependen en gran medida del uso de combustibles fósiles, especialmente en los sectores de petróleo y gas, electricidad y transporte. También se enfrentan al desafío de crear beneficios adicionales para los clientes, en particular para compensar la mayor inversión inicial en comparación con los vehículos convencionales. Por esta razón, para Bohnsack, Pinkse y Kolk, los VEs podrían crear tales beneficios a través de la habilitación de soluciones de movilidad más completas, pasando así de los modelos de negocio basados en productos a los basados en los servicios; sirviendo como almacenamiento de energía en los llamados sistemas de energía inteligente, generando nuevas fuentes de ingresos desde la liberación de la batería o reutilizándola para aplicaciones de segundo uso<sup>7</sup>.

---

5 M. KADLUBEK, “Examples of Sustainable Development in the Area of Transport,” *Procedia Econ. Finance*, vol. 27, pp. 494–500, 2015.

6 S. BORÉN, L. NURHADI, H. NY, K.-H. ROBÉRT, G. BROMAN, AND L. TRYGG, “A strategic approach to sustainable transport system development—Part 2: the case of a vision for electric vehicle systems in southeast Sweden,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 62–71, 2017.

7 R. BOHNSACK, J. PINKSE, AND A. KOLK, “Business models for sustainable technologies: Exploring business model evolution in the case of electric vehicles,” *Res. Policy*, vol. 43, no. 2, pp. 284–300, 2014

En cuanto a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI), el sector transporte es el que se visualiza con mayor potencial de reducción. Ejemplo de esto es el caso de California, que en el año 2002 se propuso como meta la reducción de estas emisiones en un 40% para el 2016, y en el 2011 la meta se incrementó en un 5% para el año 2017, de acuerdo con el Departamento de Transporte, la Agencia de Protección Medioambiental y la Asociación de Recursos del Aire de California. La clave principal para la reducción de gases de efecto invernadero es la comercialización de vehículos cero emisiones, dentro de los que se encuentran los vehículos eléctricos. Por esta razón, el gobierno federal ha llevado a cabo políticas de apoyo a vehículos cero emisiones, ofreciendo créditos fiscales para la adquisición de vehículos y miles de millones de dólares en préstamos y créditos a fabricantes de vehículos eléctricos y baterías<sup>8</sup>.

***La clave principal para la reducción de gases de efecto invernadero es la comercialización de vehículos cero emisiones.***

Amela Ajanovic y Haas analizan el rol que han tenido los vehículos eléctricos en el cumplimiento de metas de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, en Europa, Estados Unidos y China. En Europa debido al incremento de las emisiones contaminantes asociadas con el sector transporte, varios países implementaron un portafolio de políticas y medidas que soportan el uso de vehículos amigables con el medio ambiente, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las medidas tienen impacto, tanto en los usuarios finales de los vehículos como en los fabricantes. Se proveen beneficios en impuestos, créditos y subsidios para fabricantes.

En Estados Unidos se diseñaron políticas y legislaciones para la promoción de los vehículos eléctricos. En las principales ciudades de Estados Unidos (San Francisco, Atlanta, Los Ángeles, San Diego, Portland, entre otras) adoptaron el programa de Vehículos Cero Emisiones de California. Otro ejemplo, es Portland, que de acuerdo con su plan de acción de reducción de emisiones contaminantes en un 30% al 2030, respecto a los niveles de 1990, los vehículos eléctricos juegan un papel fundamental en la reducción de GEI, así como el uso masivo de transporte público. Finalmente, la ciudad de Nueva York soporta las medidas de mejora de la calidad del aire en la transición hacia el uso de vehículos eléctricos, ya que alrededor del 44% de los hogares poseen vehículo propio.

Comparado con otras ciudades de Estados Unidos, Nueva York posee menos infraestructura de recarga y menos subsidios del estado, sin embargo, la disponibilidad de vehículos eléctricos es alta. La tabla 1 presenta un resumen de las principales

8 D. SPERLING AND A. EGGERT, "California's climate and energy policy for transportation," Energy Strategy Rev., vol. 5, pp. 88–94, 2014.

medidas implementadas por Estados Unidos y Europa en la promoción de los VEs.

Las políticas y el apoyo financiero en China se centran principalmente en la industrialización de vehículos nuevos (Vehículos Híbridos Enchufables –PHEVs, Vehículos Eléctricos a Batería –BEVs y vehículos con celdas de combustible –FCVs). El gobierno chino proporciona subsidios nacionales para PHEVs y EVs puros. La ciudad de Shanghai ofrece subsidios adicionales a nivel local para estos vehículos. Los vehículos de servicio público, como camiones comerciales y autobuses de servicio ligero, también reciben subsidios. Estos incentivos hacen parte de un esfuerzo mayor para fomentar la adopción de vehículos eléctricos<sup>9</sup>.

A nivel mundial se han realizado varios trabajos dedicados a estudiar la operación sostenible del transporte eléctrico, como los trabajos de Kleindorfer, Singhal y Wassenhove (2005) y Tang y Zhou (2012), con la finalidad de analizar el impacto de los vehículos eléctricos en la cadena de suministro asociada y los impactos medioambientales al final de la vida útil y en la etapa de fabricación. Estos estudios han sido enfocados en validar el impacto de la integración de los VEs en el sistema eléctrico de potencia, y la sostenibilidad en el tiempo cuando se aplican incentivos para promover su competitividad con respecto a los automóviles convencionales<sup>10</sup>.

A pesar de esto, en un escenario al 2030 realizado por Gunther, Kannegiesser y Autenrieb, se muestra la relación entre costos de inversión y emisiones anuales, donde las emisiones anuales totales y los costos de inversión relacionados con los vehículos eléctricos caen continuamente de 4.789 kg CO<sub>2</sub>e y 3.313 EUR por vehículo en el año 2012 a 3.512 kg CO<sub>2</sub>e y 2.907 EUR por vehículo en el año 2030, respectivamente. Ver gráfico 1.

La tabla 1 presenta un resumen de las principales medidas implementadas por Estados Unidos y Europa en la promoción de los VEs.

**Tabla 1:** Medidas locales y nacionales para la promoción de VEs en Europa y Estados Unidos.

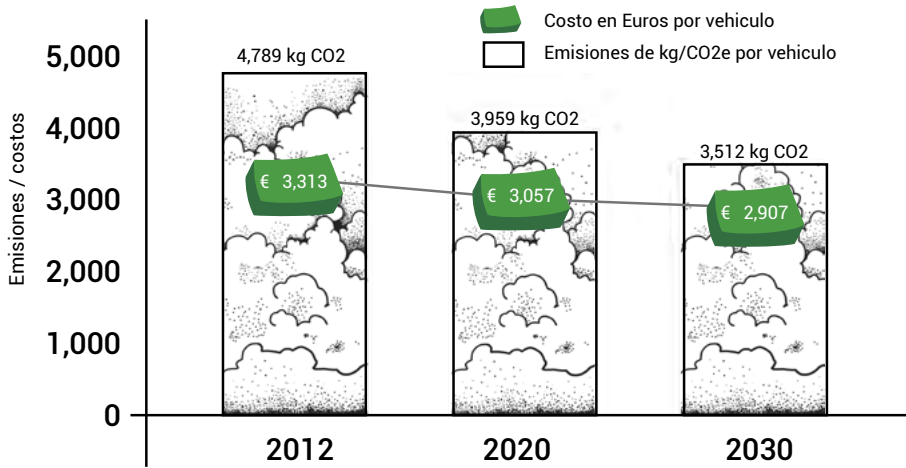
9 A. AJANOVIC AND R. HAAS, "Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success," *Energy*, vol. 115, pp. 1451–1458, 2016.

10 S. KUPPUSAMY, M. J. MAGAZINE, AND U. RAO, "Electric vehicle adoption decisions in a fleet environment," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 262, no. 1, pp. 123–135, 2017

País/Ciudad	Medidas Nacionales	Medidas Locales
<b>Alemania</b> <b>Berlín</b>	VEs exentos del impuesto de circulación anual por diez años a partir de la fecha de su primera matriculación.	Plan maestro de noviembre de 2011 para la promoción de la adquisición de VEs en la flota de transporte público. Instalación de puntos de recarga en edificios. Temáticas de movilidad sostenible en los procesos de licitación.
<b>España</b> <b>Barcelona</b>	Medidas focalizadas en proveer financiamiento directo para la adquisición de VEs. Incentivos en el impuesto de matrícula. Parqueaderos gratuitos en estacionamientos controlados.	Beneficios fiscales (impuesto de matriculación más bajo). Recarga gratuita para VEs en todos los puntos municipales de las vías públicas (hasta finales de 2012). Parqueadero gratuito en zonas reguladas y nuevos parqueaderos públicos con 2% de los espacios reservados para VEs y futura inclusión de puntos de recarga en el resto de espacios.
<b>Suecia</b> <b>Estocolmo</b>	Exenciones fiscales en los primeros 5 años a partir de la matrícula del VEs. Reducción del impuesto de automóviles para las empresas que utilicen VEs. Prima para la compra de vehículos nuevos con emisiones de CO2 de máximo 50 g/km. Para un máximo de 5,000 VEs de particulares o empresascon.	Estocolmo renueva su flota de transporte con un aproximado de 20 VEs anuales y está impulsando más incentivos nacionales.
<b>Reino Unido</b> <b>Nordeste</b>	Prima del 25% del valor de un automóvil (hasta 5,000 £) para la compra de VEs y vehículos híbridos enchufables con emisiones de CO2 inferiores a 75 g/km VEs exentos del impuesto anual de circulación. Subsidio del 100% de la depreciación del primer año de VEs o de emisiones menos a 95 g/km de CO2.	En el Nordeste de Inglaterra se fabrican y desarrollan baterías; se realiza investigación y desarrollo en baterías y VEs; se proveen habilidades y capacitación, convirtiéndolo en el lugar ideal para el desarrollo de vehículos de bajo carbono.
<b>Estados Unidos</b>	Programa de vehículos cero emisiones. Subsidios para la adquisición de vehículos a batería e híbridos. Incentivos para la instalación de puntos de carga residencial y públicos. Insentivos para la fabricación de VEs. Acceso a carriles exclusivos (más rápidos) y parqueaderos exclusivos o gratis en zonas reguladas.	

Fuente: A. AJANOVIC AND R. HAAS, "Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success," Energy, vol. 115, pp. 1451–1458, 2016.

**Gráfico 1:** Evolución de costos y emisiones de los vehículos eléctricos



Fuente: H.-O. GÜNTHER, M. KANNEGIESSER, AND N. AUTENRIEB, "The role of electric vehicles for supply chain sustainability in the automotive industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 90, pp. 220–233, 2015.

### III. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Para promover un transporte dirigido hacia la electromovilidad en las áreas urbanas se debe realizar inversiones significativas en redes eléctricas. Al mismo tiempo, se deben desarrollar nuevos modelos de negocio enfocados con la recarga de vehículos eléctricos y el suministro de baterías, con el fin de satisfacer la demanda y superar las barreras existentes, tales como: altos costos de las baterías y la infraestructura de carga para vehículos<sup>11</sup>.

Se han venido presentando soluciones tecnológicas orientadas a lograr un sistema de movilidad sostenible. A continuación, se describen las tres principales tecnologías desarrolladas:

- a) El Vehículo Eléctrico de Batería (BEV, por sus siglas en inglés), se trata de un vehículo propulsado por uno o más motores eléctricos usando energía almacenada en baterías recargables.
- b) Los Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufable (PHEV, por sus siglas en inglés) utilizan un motor eléctrico y un

<sup>11</sup> M. KAD\LUBEK, "Examples of Sustainable Development in the Area of Transport," *Procedia Econ. Finance*, vol. 27, pp. 494–500, 2015



motor de combustión interna para su funcionamiento. Adicionalmente comprenden un paquete de baterías, que se pueden conectar a las estaciones de recarga o a la red eléctrica.

- c) El Vehículo de Célula de Combustible de Hidrógeno (HFCV, por sus siglas en inglés) utiliza hidrógeno como principal componente para su funcionamiento. Es considerado un vehículo cero emisiones porque es el único subproducto del hidrógeno mezclado con oxígeno.

Estas tecnologías presentan una alternativa eficiente y amigable con el medioambiente, respecto a los automóviles convencionales de combustión interna. Estas soluciones se han implementado cada vez más alrededor del mundo, atrayendo la atención de la mayoría de países e impulsando a que se realicen investigaciones en la búsqueda de bajar costos y aumentar la competitividad<sup>12</sup>.

Un ejemplo de aplicación fue un estudio realizado en la ciudad de Lisboa, donde evaluaron la adecuación del BEV en la movilidad de la ciudad, en comparación con un vehículo de combustión interna. Durante el funcionamiento normal del vehículo de motor de combustión interna y del BEV (durante 7 y 3 meses respectivamente) se recogieron datos segundo a segundo de los vehículos. Los resultados demuestran que el BEV permite mantener los mismos patrones de operación, considerando el número de kilómetros recorridos por día (60 km), el tiempo de recarga (6 h) y la velocidad del vehículo (velocidad media de 16 km/h para ICEV y 19 km/h Para BEV). Al comparar los impactos energéticos del desplazamiento del vehículo de combustión interna al de movilidad eléctrica, el BEV permitió reducir el consumo de energía del vehículo en un 76%. El desempeño de las operaciones logísticas no se vio afectado por el cambio tecnológico del vehículo, ya que se mantuvieron los requerimientos operacionales del servicio y no se observaron problemas de autonomía eléctrica y recarga, lo que confirma la idoneidad de esta tecnología para aplicaciones urbanas específicas. Adicionalmente, en términos de emisiones contaminantes, se presentó una reducción de 267 g de CO<sub>2</sub>/km y 0,364 g de NO<sub>x</sub>/km, respecto al vehículo de combustión interna, ya que este usa combustibles fósiles para su funcionamiento, mientras que el vehículo eléctrico a Batería opera con energía eléctrica<sup>13</sup>.

12 J. H. WESSELING, J. FABER, AND M. P. HEKKERT, "How competitive forces sustain electric vehicle development," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 81, pp. 154–164, 2014.

13 G. DUARTE, C. ROLIM, AND P. BAPTISTA, "How battery electric vehicles can contribute to sustainable urban logistics: A real-world application in Lisbon, Portugal," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 15, pp. 71–78, 2016.

El estudio realizado en la ciudad de Lisboa, arroja resultados satisfactorios desde el punto de vista operacional, ya que el vehículo eléctrico propaló emisiones netas cero de escape, lo que ayuda a combatir la contaminación localizada, un hecho especialmente importante en las concentraciones urbanas. Sin embargo, esto no significa que los VEs no tengan cargas ambientales en absoluto. La mayor carga ambiental de estos vehículos se da en la fabricación, siendo la producción de baterías uno de los principales contribuyentes en las emisiones de GEI de la fase de producción. De forma similar, la electricidad consumida durante la fase de uso para cargar el VE proviene principalmente de la red eléctrica existente, con la carga ambiental que le precede<sup>14</sup>.

Con el fin de disminuir la carga ambiental asociada a la carga de los vehículos eléctricos, se debe impulsar el aumento de la participación en las energías renovables en las estaciones de recarga y en la diversificación de una matriz energética, con el fin de preceder a la penetración de los VEs, a fin de garantizar la reducción de las emisiones netas de GEI producidas por el sector de la electricidad y el transporte<sup>15</sup>.

*Con el fin de disminuir la carga ambiental asociada a la carga de los vehículos eléctricos, se debe impulsar el aumento de la participación de las energías renovables en las estaciones de recarga.*

#### IV. POLÍTICAS PÚBLICAS

La transición hacia vehículos eléctricos plantea varios retos para las políticas públicas, la incertidumbre asociada, y las interdependencias regionales, nacionales e internacionales. Para una adecuada planeación de políticas públicas, se deben evaluar las implicaciones que tendrían los siguientes aspectos<sup>16</sup>:

- **Financiamiento neto a vehículos y combustibles**, inducidas por regulación o pagadas directamente a través de bonificaciones o incentivos fiscales. Los beneficios de los subsidios para vehículos y combustibles se reflejan en el cambio de la dinámica de los consumidores.
- **Bonos a las tecnologías verdes**, que eviten emisiones de gases de efecto invernadero.

14 L. C. CASALS, E. MARTINEZ-LASERNA, B. A. GARCÍA, AND N. NIETO, "Sustainability analysis of the electric vehicle use in Europe for CO2 emissions reduction," J. Clean. Prod., vol. 127, pp. 425–437, 2016.

15 L. C. CASALS, E. MARTINEZ-LASERNA, B. A. GARCÍA, AND N. NIETO, "Sustainability analysis of the electric vehicle use in Europe for CO2 emissions reduction," J. Clean. Prod., vol. 127, pp. 425–437, 2016.

16 D. L. GREENE, S. PARK, AND C. LIU, "Public policy and the transition to electric drive vehicles in the US: The role of the zero emission vehicles mandates," Energy Strategy Rev., vol. 5, pp. 66–77, 2014.

- **Seguridad energética**, por el uso intensivo de las redes de energía eléctrica y la mayor demanda de electricidad.
- **Incentivos a la mejora de la calidad del aire**, estimado como un valor por tonelada de emisión de contaminantes evitada.
- **Satisfacción general de los consumidores en la adquisición de vehículos nuevos**. Mayores opciones económicas disponibles (Combustión interna, híbrido enchufable, eléctrico a batería, celda de combustible de hidrógeno, entre otros).
- **Percepción en el ahorro energético**, combustibles y energía eléctrica.

Los beneficios y costos de la transición hacia vehículos eléctricos, dependen en gran medida del momento y la intensidad de las intervenciones de las políticas públicas<sup>17</sup>.

## V. USO DE BATERÍAS EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El análisis de sostenibilidad ambiental de los vehículos eléctricos depende, en gran medida de los avances en la tecnología de baterías. Con desarrollos tecnológicos en baterías, es probable que todo el modelo de negocio del mercado de vehículos eléctricos cambie sustancialmente. Por ejemplo, las baterías de primera generación son las tradicionales baterías de iones de litio; las de segunda generación utilizan silicio, permitiéndole alcanzar una densidad de energía alrededor de 180 Wh/L. Sin embargo, las baterías de litio de alta densidad de energía siguen enfrentando grandes desafíos, como la baja conductividad y la baja capacidad de transporte de electrones. Por esta razón, la batería para vehículos eléctricos es un foco de interés en desarrollo con tecnologías nanoestructuradas y de diferentes dimensiones, ya que cuando la vida útil de la batería para VEs ya no sea un obstáculo, el mercado global de vehículos eléctricos se desarrollará rápidamente<sup>18</sup>.

Como se ha mencionado anteriormente, las baterías para vehículos eléctricos son esenciales para su implementación en el



17 D. L. GREENE, S. PARK, AND C. LIU, "Public policy and the transition to electric drive vehicles in the US: The role of the zero emission vehicles mandates," *Energy Strategy Rev.*, vol. 5, pp. 66–77, 2014.

18 Y. LI, J. YANG, AND J. SONG, "Design structure model and renewable energy technology for rechargeable battery towards greener and more sustainable electric vehicle," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 19–25, 2017

mercado. También juegan un papel importante en el ciclo de vida útil del vehículo, ya que representan uno de los componentes que pueden generar mayor contaminación en la disposición final. Por esta razón se propone la reutilización de la batería como un aporte fundamental en el marco de los sistemas de energía sostenible. La vida útil de estas baterías depende de varios parámetros, tales como su química, el método de carga, los patrones de conducción y las condiciones meteorológicas donde operan, no obstante, se estima que la vida útil de las baterías en los vehículos es de 8 años con capacidad restante del 80% al final de la vida útil<sup>19</sup>.

***La reutilización de la batería es un aporte fundamental en el marco de los sistemas de energía sostenible***

Analizando la viabilidad ambiental de la reutilización de baterías previamente empleadas para VEs, surge como principal innovación la aplicación para los sistemas de energía renovable intermitentes. Por ejemplo, a través de la reutilización de las baterías, se puede soportar la generación de energía eólica intermitente para satisfacer la carga de los vehículos eléctricos<sup>20</sup>.

Esta alternativa contribuiría con la sostenibilidad de los vehículos eléctricos, respecto a la carga ambiental asociada, e incluso permitiría ampliar la duración de la batería, lo que contribuye a reducir la explotación de residuos y recursos. En la dimensión económica, los modelos de negocio efectivos para la reutilización de baterías de VEs son esenciales para desarrollar el mercado “post-vehículo” de las baterías retiradas y generar ingresos alternativos, que contribuirían a la reducción de precios de los VEs para los usuarios finales<sup>21</sup>.

## VI. LA INFRAESTRUCTURA DE RECARGA

El componente más crítico para el desarrollo y promoción de la movilidad eléctrica en las ciudades es la infraestructura de carga. Según el Massachusetts Institute of Technology (MIT), el mayor desafío es desarrollar una infraestructura de recarga a nivel nacional para VEs, en lugar de producir baterías a un costo asequible. La infraestructura de carga de VEs utiliza dos

19 S. SHOKRZADEH AND E. BIBEAU, “Sustainable integration of intermittent renewable energy and electrified light-duty transportation through repurposing batteries of plug-in electric vehicles,” *Energy*, vol. 106, pp. 701–711, 2016

20 N. JIAO AND S. EVANS, “Business Models for Sustainability: The Case of Second-life Electric Vehicle Batteries,” *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 250–255, 2016

21 N. JIAO AND S. EVANS, “Business Models for Sustainability: The Case of Second-life Electric Vehicle Batteries,” *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 250–255, 2016

métodos de acoplamiento básicos, tales como el acoplamiento del conductor y acoplamiento inductivo. En el acoplamiento del conductor, los vehículos cargan conectándose a una toma de corriente (acoplamiento tradicional). El acoplamiento inductivo, por su parte, utiliza el concepto de acoplamiento magnético en lugar de las conexiones cableadas directas.

Existen diferentes impactos en la carga de VEs, los cuales se clasifican como:

- a) **Impacto en la capacidad de carga.** Se da principalmente por la incertidumbre en el momento de carga de los VEs, que puede aumentar la demanda de carga máxima. Los impactos de un millón de VEs afectan ligeramente a la curva de demanda normal de electricidad en casi un 1%. Pero, 42 millones de VEs representan una carga considerable, exigiendo un 92% más de suministro de energía eléctrica<sup>22</sup>.
- b) **Impacto en la calidad de la energía.** La carga de VEs afecta en gran medida la calidad de energía del sistema de potencia, pudiendo generar efectos de armónicos, efectos de transformadores de distribución, efectos de corriente de falla y efectos de pérdidas de línea. Sin embargo, las sobretensiones, la sobrecarga del transformador y los problemas de pérdida de línea son controlados por los esquemas de control inteligentes en la supervisión de la carga y descarga<sup>23</sup>.
- c) **Impacto en la economía.** Guo y Zhao incluyen los costos de la tierra, de demolición, de adquisición del equipo y de inversión del proyecto, además de los costos anuales de operación y mantenimiento (como salarios, carga eléctrica, gastos financieros, impuestos, amortización de la batería, entre otros). Por último, se adiciona lo relacionado con el periodo de amortización de la inversión <sup>24</sup>.
- d) **Impacto social.** Se deben considerar factores como la armonización de las estaciones de carga con la planificación de desarrollo de la red urbana de carreteras y la red eléctrica, conveniencia del tráfico, capacidad de servicio e impacto en la vida de las personas.
- e) **Impacto en el medio ambiente.** Se incluyen los impactos ambientales inducidos por las estaciones de carga como la destrucción de vegetación y agua, descarga de desechos,

22 N. SHAUKAT et al., "A survey on electric vehicle transportation within smart grid system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017.

23 N. SHAUKAT et al., "A survey on electric vehicle transportation within smart grid system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017

24 S. GUO AND H. ZHAO, "Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective," *Appl. Energy*, vol. 158, pp. 390–402, 2015.

reducción de emisiones de GEI y reducción de emisiones de partículas finas para evaluar los impactos positivos y negativos relacionados. Adicionalmente, como criterios ambientales, se deben evaluar los efectos ecológicos de la construcción y operación de la estación de carga en el entorno de operación.

## VII. CONCLUSIONES

- La preocupación medio ambiental y la perspectiva de agotamiento de yacimientos de petróleo, asociado a un aumento en la variabilidad climática, ha llevado a que se adelanten desarrollos tecnológicos en el sector transporte para contribuir a una sociedad sostenible, que impacte directamente en la calidad del aire y en el bienestar de las personas. Uno de estos desarrollos ha sido los VEs, considerados como vehículos de cero emisiones y de menor impacto ambiental, en relación con los vehículos de combustión interna.
- La prospectiva medioambiental de países a nivel mundial que se han propuesto metas para el mejoramiento de emisiones contaminantes, en relación a los compromisos del COP21 del Acuerdo de París, ven como un potencial de disminución de impactos ambientales al sector transporte. En este sentido, los VEs forman parte de esta estrategia para cumplir con las metas de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C y aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.
- A pesar de que los VEs poseen un alto potencial en la contribución para reducir las emisiones contaminantes, todavía se encuentran en estado de investigación y desarrollo. Esto se debe al impacto de los VEs en la cadena de suministro asociada, principalmente en su disposición final y los procesos asociados a la producción, además del impacto que supondría su integración en el sistema eléctrico de potencia.
- El desarrollo e implementación de VEs en las grandes ciudades se posibilita en gran medida debido a la disminución de costos de inversión y operación y a la generación de políticas públicas orientadas hacia la promoción tecnológica. Las políticas públicas para vehículos eléctricos plantean retos asociados con las implicaciones que se presentarían en la aplicación de incentivos financieros, bonos a tecnologías verdes, seguridad energética, inventivos por mejora

medioambiental, entre otros. En gran medida, surgen estos retos porque la tecnología avanza rápidamente, la incertidumbre de comportamiento que representa la implementación de nuevas tecnologías en las ciudades, y las interdependencias regionales, nacionales e internacionales que éstas suponen. Sin embargo, resulta esencial que las políticas públicas se desarrollen en el momento y con la intensidad adecuada, permitiendo un óptimo desarrollo de los vehículos eléctricos en las ciudades urbanas.

- Las baterías siguen siendo un foco de interés en la masificación de los vehículos eléctricos, debido al alto costo que representan, a la relación proporcional entre densidad energética y autonomía de los vehículos eléctricos, y a los aspectos relacionados con la disposición final de las baterías. En este último aspecto continuamente se realizan desarrollos enfocados a mejorar la viabilidad ambiental de la reutilización de estas baterías, como lo es la aplicación de segundo uso en sistemas estacionarios, por ejemplo, las energías renovables intermitentes.
- La infraestructura de recarga para vehículos eléctricos se presenta como un componente esencial en el desarrollo del transporte eléctrico en las ciudades. En gran medida, se debe a la disponibilidad de puntos de carga, que permitan una operación continua y confiable de los automóviles eléctricos. Sin embargo, también se encuentran asociados impactos en la demanda del sistema eléctrico, aumentando considerablemente su valor. También presenta efectos en la calidad de la energía, como lo son armónicos, efectos de corriente de falla y efectos de pérdida de línea. Adicionalmente, la infraestructura de recarga puede representar impactos ambientales producto de la destrucción de la vegetación y el agua, la descarga de desechos y efectos ecológicos en la construcción y operación de la estación de recarga en su entorno de funcionamiento.