

# Evaluación de la integración de vehículos eléctricos en el mercado colombiano a 2050 usando dinámica de sistemas

Juan Camilo Galvez Avellaneda, Isaac Dyer Rezonzew, Andres Julian Aristizabal Cardona, Enrique Ángel Sanint

Universidad Jorge Tadeo Lozano

Maestría en Gestión sostenible de la Energía

[juanc.galveza@utadeo.edu.co](mailto:juanc.galveza@utadeo.edu.co)

## Resumen

Este artículo se enfoca en la evaluación de las perspectivas y el potencial que Colombia posee para lograr una transición completa hacia vehículos eléctricos, con el objetivo de alcanzar una penetración del 100% de este tipo de automóviles para el año 2050. Para abordar este desafío, se plantean cuatro escenarios potenciales que parten de diferentes enfoques y estrategias.

En estos escenarios, se consideran diversas variables que desempeñarán un papel fundamental en la transformación del parque automotor colombiano, tales como incentivos gubernamentales destinados a fomentar la adopción de vehículos eléctricos, la evolución de los precios de las baterías, los cambios en los costos de adquisición de los vehículos eléctricos, la expansión de la red de estaciones de carga y otros elementos relevantes para el análisis.

Esta evaluación, busca proporcionar una visión clara de las posibilidades y desafíos que enfrenta Colombia en su camino hacia la electrificación del transporte, y ofrece un escenario para la toma de decisiones informadas en la formulación de estrategias que impulsen la adopción de vehículos eléctricos en el país.

Con el propósito de alcanzar el objetivo que se describe en el artículo, se empleó un enfoque de modelado de simulación. A través de este proceso, se obtuvo un modelo definitivo que da la posibilidad de representar de manera visual el progreso de los diferentes escenarios a lo largo de los años. Esta representación gráfica brinda una comprensión clara acerca de cuáles escenarios cumplen con los parámetros establecidos para lograr la meta previamente establecida llegando a valores cercanos al 100% para el año 2050 de vehículos eléctricos en Colombia y teniendo una reducción considerable del CO<sub>2</sub> producido por el sector de transporte en Colombia en un 27% menos en comparación al 2023, contando que el aumento de vehículos para el año 2050 será mucho mayor que en el periodo inicial, comenzando así un periodo de descenso para la contaminación en el país.

## Palabras clave

GEI - gases de Efecto invernadero

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

EV - Vehículos eléctricos

ENME - Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica.

UPME - Unidad de Planeación Minero Energética.

RUNT - Registro Único Nacional de Tránsito

## Abstract

This article focuses on evaluating the prospects and potential that Colombia must achieve a complete transition to electric vehicles, with the goal of achieving 100% penetration of this type of automobile by 2050. To address this challenge, four potential scenarios are proposed that are based on different approaches and strategies.

In these scenarios, various variables are considered that will play a fundamental role in the transformation of the Colombian vehicle fleet, such as government incentives aimed at promoting the adoption of electric vehicles, the evolution of battery prices, changes in acquisition costs of electric vehicles, the expansion of the charging station network and other elements relevant to the analysis.

This comprehensive assessment seeks to provide a clear view of the possibilities and challenges facing Colombia on its path towards the electrification of transport and offers a stage for informed decision-making in the formulation of strategies that drive the adoption of electric vehicles in the country.

with the purpose of achieving the goal described in the article, a simulation modeling approach was employed. Through this process, a definitive model was obtained that allows visually representing the progress of different scenarios over the years. This graphical representation provides a clear understanding of which scenarios meet the established parameters to achieve the previously set goal, reaching values close to 100% for electric vehicles in Colombia by 2050 and significantly reducing CO<sub>2</sub> emissions from the transportation sector in Colombia by 27% compared to 2023. Considering that the increase in vehicles by 2050 will be much higher than in the initial period, this marks the beginning of a period of decline in pollution in the country.

## Keywords

GHG - greenhouse gases

CO<sub>2</sub> - Carbon dioxide

EV - Electric Vehicles

ENME - National Electric Mobility Strategy.

UPME - Mining and Energy Planning Unit.

RUNT - Single National Transit Registry

## Introducción

El cambio climático y las energías sostenibles son los puntos importantes a tratar para evitar daños irreversibles en el medio ambiente, cada vez son más los avances tecnológicos que permiten tener un consumo de energía de una manera más sustentable. Para ello, es necesario hablar del sistema de transporte en Colombia, debido a que este es uno de los mayores consumidores de combustibles fósiles. Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en 2021, se da un consumo de 4894 Mgal, lo cual, representa un aumento anual del 30%; El sector del transporte abarca un 43% del consumo de energía en el país al 2021. Por esto, es de suma importancia tenerlo en cuenta para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Esta problemática es de alta complejidad debido a que contempla un cambio en la estructura vial del país a una tecnología que sigue en estudio por motivos de autonomía, puntos de recarga energéticos y tiempos por recarga, lo que conlleva a poca aceptación por los usuarios.

Debido a la incertidumbre en los cambios políticos que vive en la actualidad el país, los beneficios fiscales e inversiones de empresas privadas para los diferentes mercados, son limitaciones que a menudo no se tienen en cuenta para resolver este tipo de problemas y que llevan a otras propuestas de investigación a fallar en sus resultados. En este documento se contempla la posibilidad de cambios políticos en los próximos años y sus implicaciones en temas relacionados a la compra de vehículos eléctricos por los colombianos.

Mediante este proyecto se buscará realizar el análisis para posibles escenarios en los cuales se contemple una transición del 100% de los automóviles en Colombia como vehículos eléctricos para el año 2050, mediante simulaciones de sistemas dinámicos teniendo en cuenta un modelo sostenible que abarque temas económicos, sociales y de medio ambiente.

Teniendo en cuenta que Colombia hace parte del grupo de países en el acuerdo de París, en el cual se establece una reducción del 51% de la emisión de GEI para el 2030 y tender a la carbono neutralidad al 2050, se establece este estudio para contemplar casos posibles en los cuales esto pueda llegar a ser posible.

Para presentar los resultados de este artículo, se seguirá una estructura organizada. En primer lugar, se abordarán los antecedentes, proporcionando un contexto global y nacional sobre vehículos eléctricos. Luego, en el numeral dos, se expondrán los fundamentos teóricos que respaldan el artículo desde diversos enfoques. El numeral tres incluirá revisiones literarias relevantes para la investigación.

En el numeral cuatro se detallarán los objetivos del artículo, mientras que el numeral cinco se centrará en la metodología utilizada para implementar el modelo propuesto. El numeral seis abordará la validación del modelo, tanto en términos de estructura como de comportamiento y sensibilidad.

Posteriormente, en el numeral siete se realizará un análisis de los resultados obtenidos a través del modelo y los escenarios propuestos. Para concluir, en el numeral ocho se presentarán las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación. Finalmente, en el numeral nueve se incluirán las referencias bibliográficas.

## 1. Antecedentes

Múltiples avances tecnológicos a nivel mundial, permiten que el incremento de los vehículos eléctricos vaya en aumento con el pasar de los años, así mismo, la preocupación general de la población por la contaminación generada por los vehículos alrededor del mundo es un detonante para enfocar investigaciones y acciones políticas en beneficio de esta problemática. Muchos de los países alrededor del mundo están optando por la utilización de este tipo de vehículos entre ellos, los más poblados tales como China e India, quienes son unos de los líderes en este ámbito, alcanzando una favorabilidad en la población y hasta en los conductores experimentados [1]. Algunas de estas acciones se pueden resumir en:

### 1.1 Estaciones de carga a nivel Mundial

La infraestructura a nivel mundial ha aumentado el número de cargadores públicos disponibles cerca del 40% en 2021 con respecto al año anterior. La instalación de cargadores de baja potencia aumentó a 33%, siendo más baja que el promedio de crecimiento entre 2015 y 2020 con un 60% de incremento anual mientras que la instalación de cargadores de alta potencia o cargas rápidas aumentó un 45% con respecto al año anterior.[2] Este aumento progresivo de estaciones de carga ayuda a reducir la huella de carbono de manera significativa, sin embargo es posible reducirse aún más, teniendo una fuente de energía híbrida que permita realizar la carga de los vehículos eléctricos, ya que en su estado de utilización, la única fuente contaminante de manera indirecta es a partir de su fuente de energía. A partir del uso de energías renovables es posible reducirse la huella de carbono emitida por las estaciones de carga en un 89.9% [3] y reducir el costo de carga de los vehículos eléctricos a un valor menor, dando como resultado una reducción aun mayor de los costos operativos del vehículo[4].

### 1.2 Motos y Triciclos a nivel mundial

El Crecimiento en china alcanzó cerca de 9.5 millones de nuevos registros para 2021 llegando a ser el 97% del mercado mundial, por otro lado, las ventas en Vietnam alcanzaron valores de 230.000 y en India 89.000, en donde la diferencia entre el alcance de cada país con respecto al mercado de vehículos eléctricos es notable. En 2021, el 25% de motos y triciclos en Asia fueron eléctricos debido a que en muchas regiones, las motos y triciclos eléctricos son más baratos que los modelos convencionales. [2]

### 1.3 Vehículos de carga y de transporte masivo a nivel mundial

Los vehículos como las LCVs, pick-up, camiones y vans, aumentaron su mercado en vehículos eléctricos en un 50% para 2021. China lidera el mercado con 86000 LCVs vendidas y Europa logró la venta de 60000 LCVs

para el mismo año. Por otro lado, los autobuses convencionales redujeron sus ventas en un 7% y los autobuses eléctricos crecieron un 40% llevándolos a ser el 4% del mercado mundial. [2]

## 1.4 Stock de vehículos eléctricos a nivel mundial

El conocimiento preciso del stock y las ventas de vehículos eléctricos, son un requisito previo para la planeación de políticas industriales en el uso de fuentes renovables en un sistema de transporte [5].

Los vehículos eléctricos alcanzaron ventas de alrededor de 6.6 millones en 2021 siendo más que el doble con respecto a 2020 y que el triple en 2019. El sector de mercado de los autos eléctricos en las ventas totales de carros, creció de solo el 2,5 % en 2019 a casi el 9% en 2021. El 55% de los modelos a la venta en el mercado eran camionetas eléctricas.

Mediante el desarrollo del marco regulatorio, los beneficios e incentivos tributarios se ha logrado desarrollar un incremento de vehículos de cero emisiones para el sector del transporte. Para el año 2022, se tuvo la meta de contar con un total de 6600 vehículos eléctricos en Colombia, sin embargo, esta meta se superó y ya se cuenta a la fecha con un total de 8299 vehículos registrados en el Registro Único Nacional de Transito (RUNT).

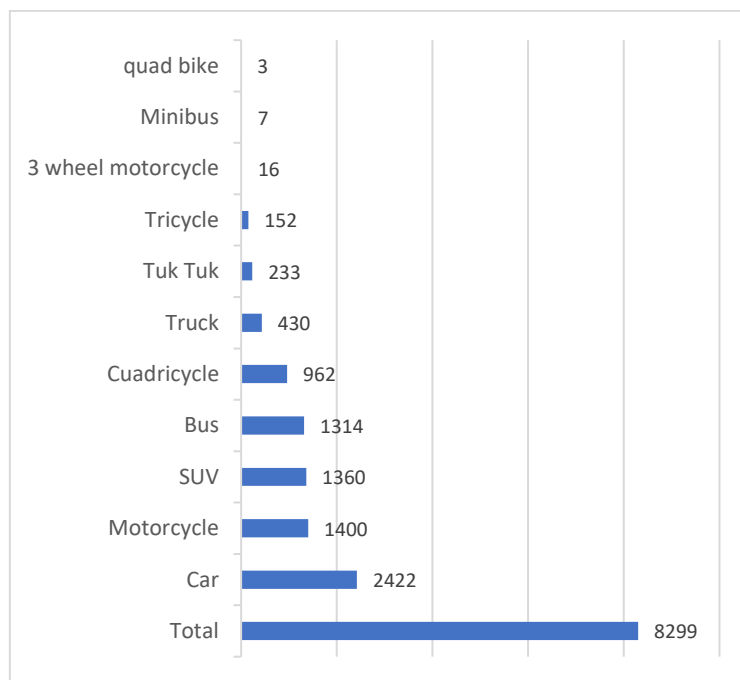


Figura 1. Cantidad y tipo de vehículos eléctricos registrados en el RUNT para el año 2022.

Sin embargo, uno de los focos principales para lograr la descarbonización del sector del transporte debe ser los vehículos pesado y de carga como los camiones y tractomulas, al igual, se debe hacer enfoque en los sistemas de transporte como buses y busetas que no hacen parte de los sistemas integrados de cada ciudad.

City	Industry	Taxis	Cars	Motorcycles	Buses	Trucks	SITP, Transmilenio, MIO
Bogotá	22%	1%	11%	10%	32%	22%	3%
Medellin and Municipality of Valle de Aburrá	18%	2%	6%	14%	8%	52%	
Cali			9%	12%	31%	25%	23%

Figura 2. Porcentaje de emisiones de GEI por tipo de vehículo en las ciudades.

En la figura 2, se puede observar que, en las ciudades principales del país, el porcentaje de emisiones de GEI se enfoca en el sector del transporte de carga y transportes públicos como buses y busetas, llegando a superar la mitad de las emisiones totales en el sector del transporte en todos los casos.

### 1.5 Transporte Público

En el mes de marzo del 2022 se registran 973 buses eléctricos en el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) entre los cuales se encuentran 868 de estos en el sistema de transporte público de la ciudad de Bogotá incorporados en Transmilenio, 69 en el sistema Metroplus de Medellín y 36 para la ciudad de Cali mediante el sistema de transporte Mio. Se espera que, para finales del año 2022, Colombia cuente con 1589 buses eléctricos por el territorio nacional llegando a ser la mayor flota eléctrica a nivel de Latinoamérica entre los cuales se estima un total de 1485 buses para el sistema de transporte de Bogotá.

### 1.6 Beneficios e incentivos para VE

si bien los incentivos financieros son necesarios en la mayoría de los casos para mejorar la competitividad en costos de los vehículos eléctricos, no siempre son indispensables[6]. Esto sugiere que el rol de los incentivos financieros en la adopción de vehículos eléctricos no es homogéneo y varía según las condiciones del mercado local, así como de los incentivos específicos ofrecidos. En el caso de Colombia, al ser un país emergente en la tecnología de vehículos eléctricos es necesario e indispensable el uso de los beneficios para lograr introducirlos en el mercado. Los beneficios hacia las tecnologías de cero emisiones son cada vez más constantes en el gobierno colombiano, lo cual, permite un aumento en la acogida por los colombianos como una mejor propuesta para la inversión en los vehículos eléctricos. Algunos de estos beneficios son los mencionados a continuación.

#### 1.6.1 Reducción de aranceles para vehículos eléctricos

Comprende la importación de vehículos eléctricos con un 0% y vehículos a gas con un 5% de reducción de los aranceles de manera permanente según el Decreto 2051 de 2019.

#### 1.6.2 Incentivos tributarios

Según los Decretos 1564, 2205 y 2143 de 2017, se incluye dentro de los bienes gravados con tarifa del 5% del IVA como incentivo al transporte eléctrico a taxis, vehículos de carga, buses, cargadores, bicicletas eléctricas, entre otros.

### 1.7 Delimitación de la problemática

Al considerar el panorama de los vehículos eléctricos y la problemática ambiental derivada de los vehículos de combustión en el contexto del cambio climático, así como las metas a largo plazo establecidas por Colombia para un futuro más sostenible, se propone un análisis detallado en este artículo. El propósito fundamental es profundizar en las necesidades que tiene el país durante este período crucial para alcanzar la carbono neutralidad.

En este sentido, la investigación se adentra en la implementación de un enfoque que incorpora tanto variables cuantitativas como cualitativas. Las primeras abarcan aspectos como el número de vehículos eléctricos en circulación, la expansión de la infraestructura de estaciones de recarga, los precios de los automóviles eléctricos y los costos operativos asociados. Por otro lado, las variables cualitativas como los beneficios e incentivos económicos generados por la adopción de vehículos eléctricos incluyen percepciones de los usuarios sobre la comodidad y la experiencia de conducción, la aceptación social de los vehículos eléctricos, así como consideraciones medioambientales y sostenibilidad ya que estas variables son las principales a tener en cuenta para poder tener un cambio progresivo y planeado en la estructura de los vehículos eléctricos de cualquier región a nivel mundial [7].

## 2. Marco teórico

### 2.1 Movilidad Sostenible

La movilidad sostenible ha ido en aumento con el paso del tiempo debido a las afectaciones causadas por el daño al ecosistema mediante la generación de GEI causando problemas de salud en las personas, calentamiento global, contaminación del aire y muchos problemas más.

Debido a esto se ha visto la necesidad de incurrir en otras prácticas de movilidad tales como andar en bicicleta, caminar, usar el sistema de transporte masivo o compartir el vehículo. Sin embargo, esto no soluciona el problema de raíz ya que año a año el consumo de gasolina y productos derivados del petróleo sigue en constante crecimiento y en su mayoría son usados para la industria del transporte como combustibles fósiles.

Según la asociación Colombiana de Petróleo y Gas (ACP) desde el año 2023 y hasta el año 2030, se espera un aumento del 3% anual (4% en gasolina, 2% en diésel y 5% en Jet).

En el contexto actual, los vehículos eléctricos experimentan un crecimiento sostenido, a pesar de no representar una tecnología novedosa. Este fenómeno se atribuye a desafíos persistentes en la movilidad eléctrica. En particular, la limitada autonomía de estos vehículos en comparación con los de combustibles fósiles ha generado obstáculos significativos. Además, la falta de una infraestructura adecuada en las ciudades para la recarga de estos automóviles se ha convertido en un factor limitante. La problemática se extiende al tiempo de recarga, el cual varía en función de la potencia del punto de recarga instalado. Esta variabilidad influye directamente en la conveniencia y accesibilidad de la carga para los usuarios de vehículos eléctricos. A pesar de estos desafíos, el crecimiento continuo de esta tecnología sugiere una respuesta positiva por parte de la sociedad y un interés persistente en superar las barreras existentes, lo que podría impulsar la evolución y la adopción generalizada de los vehículos eléctricos en el futuro.

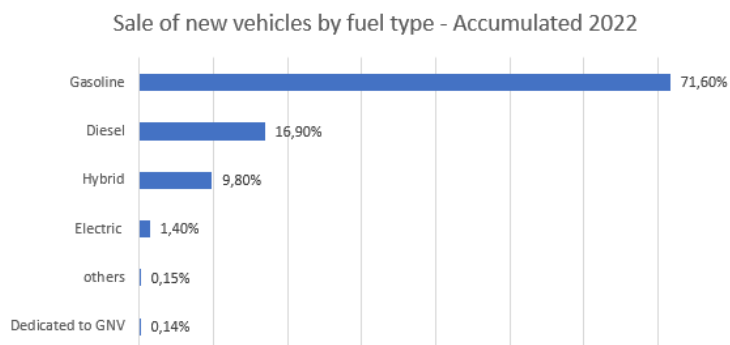
Factor	Basic	Semi-Fast	Fast	Super-Fast
Power	2,3 - 7,4 kW	22kW	40 - 50 kW	100 - 150 kW
Charging Time for daily use	2,6 h - 48 min	16 min	9 - 7,2 min	3,6 - 2,4 min
Charging Time for 80%, 40KWh Battery	14 - 4,3 horas	1,5 horas	48 - 38 min	19,2 - 12,8 min

Figura 3. Tipos de recarga para vehículos eléctricos.

Las tres problemáticas mencionadas anteriormente, son la mayor barrera en la que se debe trabajar para aumentar la inversión por parte de la población. Debido a esto, es necesario que el estado intervenga con incentivos para la población que desee adquirir este tipo de vehículos, haciéndolos una mejor opción dentro del mercado. Así mismo, un aumento significativo de vehículos eléctricos debe ir de la mano del aumento de generación de energía eléctrica para evitar un desabastecimiento a nivel nacional [8], para lo cual, un aumento de la generación a partir de energías renovables ayudaría a disminuir la generación de CO2 de manera indirecta por los vehículos eléctricos [9].

### 2.2 Vehículos eléctricos en Colombia

Al cierre del octavo mes del año 2022 se establece el registro de 171.385 autos nuevos, de los cuales 2.339 son vehículos eléctricos, esta cifra equivale a un 1.4% del total.



**Figura 4.** vehículos nuevos por tipo de combustible en Colombia en 2022.

Este dato, aunque es pequeño va en aumento de manera progresiva al pasar de los años, donde se registran desde el 2019 un aumento y al 2022 se tiene un aumento del 272% respecto al año anterior. Cabe resaltar que, si se desea tener un 100% de los vehículos con energía eléctrica, es necesario poder aumentar estas cifras cada vez más mediante incentivos del gobierno, reducción de precios para estas tecnologías y mejoramiento de la estructura de puntos de recarga para vehículos eléctricos.

### 2.3 Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica

Mediante la estrategia Nacional de Movilidad, Colombia busca reducir las emisiones de GEI progresivamente, para dar con el cumplimiento de la agenda al 2030, aumentando la cantidad de vehículos eléctricos a 600.000.

En el 2017 se expide la Resolución 2254 de Minambiente, en la cual, se adopta la norma de calidad del aire que habla de una disminución progresiva de los niveles máximos permitidos de contaminantes.

Debido a esto, se establece la línea de acción en donde se consolidan cuatro puntos claves para la obtención de los resultados esperados:

- Incentivar y Facilitar la transición de tecnologías de cero y bajas emisiones.
- Generar aproximaciones específicas al mercado
- Desarrollo de Infraestructura de puntos de recarga para vehículos eléctricos anticipándose a la transformación de movilidad.
- Creación y fortalecimiento del marco regulatorio.

La proyección de la venta de los vehículos eléctricos particulares es dependiente de los incentivos, beneficios y medidas que se realicen en Colombia.

### 2.4 Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una metodología de análisis y modelamiento de situaciones o entornos complejos donde se busca la retroalimentación entre los elementos que conforman el sistema para desarrollar una idea o hipótesis del comportamiento de estos[10]. La metodología seleccionada para este proyecto es el modelamiento de los sistemas dinámicos a partir de diagramas causales. En la actualidad, es posible desarrollar este tipo de simulaciones mediante software para contemplar las posibles soluciones al problema

### 2.5 Marco Legal

La Ley 1955 de 2019 y Ley 1964 de 2019 establecen el reglamento y regulación para el desarrollo de la disposición urbana en la selección de puntos para recarga de vehículos eléctricos. En esta misma ley, se habla de la formulación del reemplazo de las flotas del país a tecnología eléctrica, esta ley también determina las normativas en eficiencia energética para los vehículos nuevos.

Ley 1964 de 2019 realiza seguimiento al reemplazo de vehículos oficiales de entidades nacionales a vehículos eléctricos.

Resolución 1988 de 2017 - Minambiente trata y evalúa los incentivos y beneficios tributarios por la acogida de vehículos eléctricos.

### 2.6 Innovaciones

En la actualidad uno de los mayores aportes para el cambio a vehículos eléctricos es el aumento de estaciones de carga y con ellos, el conocimiento de la ubicación de cada uno de estos. Para esto han creado una aplicación a nivel mundial con la cual, poder buscar la ubicación de los puntos de carga más cercanos mediante la app “ELECTROMAPS”.

Colombia cuenta actualmente con 137 puntos de los cuales 36 se encuentran en la ciudad de Bogotá y el 39% de las estaciones de carga se encuentran ubicadas en centros comerciales, 22 en Medellín ubicadas en su mayoría igualmente en centros comerciales con un 45%, 10 en Pereira, 7 en la ciudad de Cali y otras en el resto del país. En Colombia, también se cuenta con 350 estaciones de carga ubicadas en hogares y empresas. [11]

A nivel mundial hay varias iniciativas de innovación en el área del transporte eléctrico con el fin de reducir las emisiones de GEI para el año 2030 y ser carbono neutros en la gran mayoría del mundo a 2050. Algunos de los principales fabricantes de autos a nivel mundial tienen planes a mediano y largo plazo para esto, por ejemplo, Toyota planea la venta de 3.1 millones de vehículos eléctricos anuales para 2030 y el lanzamiento de por lo menos 30 modelos de EV. Volkswagen plantea superar el 70% de las ventas en Europa y el 50% de China mediante vehículos eléctricos, para 2040 esperan un valor cercano al 100%. BMW plantea el 50% de los vehículos vendidos serán eléctricos para el 2030 o antes, Volvo se plantea ser una empresa de vehículos completamente eléctricos para el 2030, Mercedes anuncia que para el 2025 todos sus vehículos de lanzamiento serán 100% eléctricos. Entre otras marcas representativas del mercado. [12]

En el 2021 SK Innovation y Kia Motors, realiza un acuerdo para establecer un sistema circular de reutilización y reciclaje de los materiales de las baterías de los vehículos eléctricos, ya que el mayor contaminante de esta tecnología se le atribuye a los componentes de estas. Las baterías que sean aptas serán reutilizadas teniendo en cuenta la eficiencia en almacenamiento y se abrirán paso en el mercado surcoreano para luego ser también vendidas en Estados Unidos. Las baterías que sean catalogadas como no aptas para uso, serán tratadas como material reciclable. [13]

Otros estudios e innovaciones recientes relacionados con la eficiencia de las baterías son el incremento de nuevas rutas de abastecimiento de Niquel y su variedad, ya que El Niquel utilizado para las baterías es clase 1, pero mediante estudios y nuevas tecnologías han permitido hacer que el Niquel clase 2 sea convertido en Clase 1. [14]

### 2.7 Costos Actuales de Vehículos eléctricos en Colombia

Actualmente los vehículos eléctricos tienen un costo elevado en el mercado debido en su mayoría al costo de las baterías utilizadas en estos. Los vehículos eléctricos llegan a costar el triple que los vehículos convencionales (VC) teniendo las mismas características de confort y funcionalidades. Debido a esto, es necesario un análisis a largo plazo para saber si económicamente es viable que una persona adquiera un vehículo eléctrico. Para esto, se realiza un estudio utilizando el Valor Presente Neto en la Universidad de Antioquia [11] en el cual, se concluye que para que un vehículo eléctrico sea rentable teniendo en cuenta los beneficios dados por el gobierno, el costo de la gasolina y el kWh, es necesario que una persona maneje por año 33000 Km realizando el análisis a 10 años. Una persona promedio maneja entre 8000 Km a 15000 Km por año. Debido a esto los vehículos eléctricos son económicamente inviables por su alto precio de adquisición para las personas de estratos medio y bajo.

El problema de los costos de los vehículos eléctricos no es únicamente en Colombia si no alrededor del mundo, por eso, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha invertido 60 millones de dólares para acelerar los avances en vehículos de cero emisiones, ayudando así a reducir costos de producción mediante 24 proyectos de investigación entre los cuales estaría acelerar la innovación de las baterías para vehículos eléctricos, desarrollo de materiales livianos para aumentar la eficiencia de los vehículos, entre otras investigaciones.[15]

### 3. Revisión de literatura

En este capítulo, exploraremos una serie de estudios y avances tecnológicos que han contribuido significativamente al mejoramiento del sistema de transporte, particularmente en el ámbito de los vehículos eléctricos. Estos avances han sido cruciales para incrementar la confiabilidad de la tecnología

de transporte eléctrico en general. Sin embargo, es esencial destacar que este proyecto se distingue de investigaciones previas al centrarse en la recopilación y consolidación de evidencia tecnológica, política y social con el propósito de llevar a cabo un modelado de sistemas dinámicos.

El enfoque principal del proyecto radica en la utilización de investigaciones previas para identificar posibles escenarios en los que Colombia logre una transición completa hacia vehículos de cero emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2050. A diferencia de investigaciones anteriores que se centran en mejorar la tecnología de transporte en sí para incrementar la aceptación del público hacia los vehículos eléctricos, el enfoque de esta investigación está en la visión global de la transición y los factores interconectados que la sustentan.

Este proyecto busca no solo identificar los avances tecnológicos en el ámbito de la movilidad eléctrica, sino también comprender la importancia de las políticas y la respuesta social en la consecución de un futuro donde la totalidad de los vehículos sean de cero emisiones de GEI. Al unificar estos aspectos en un modelo de sistemas dinámicos, se pretende proporcionar una visión que permita tomar decisiones informadas y estratégicas hacia la descarbonización del sector del transporte en Colombia.

### 3.1. Sistemas dinámicos

El sector del transporte a nivel mundial se encuentra en el centro de la preocupación debido a su contribución significativa a la contaminación ambiental. La necesidad de descontaminar este sector es un tema crítico en la búsqueda de la neutralidad de carbono global. Diversos expertos coinciden en que la transformación hacia los vehículos eléctricos desempeña un papel esencial en este proceso [16].

Para abordar esta problemática, se ha recurrido a la dinámica de sistemas como herramienta de investigación. A través de esta metodología, se ha desarrollado un modelo que integra el sistema de suministro energético y la sostenibilidad de esta tecnología. El modelo proporciona una visión que comprende la dinámica del mercado de vehículos eléctricos y su sostenibilidad en el contexto colombiano. Se examina la relación entre la fabricación de vehículos eléctricos, su distribución y la demanda del mercado local.

Este enfoque permite no solo entender las complejidades que comprende la transición hacia los vehículos eléctricos en Colombia, sino también evaluar la viabilidad y la interacción de los diversos componentes que intervienen en la adopción de esta tecnología, contribuyendo así a la formulación de estrategias efectivas para avanzar hacia una movilidad más sostenible en el país y una reducción de la contaminación él.

Otros artículos apuntan a los modelos de vehículos eléctricos compartidos como medida para reducir la generación de GEI como un modelo sostenible con la idea de vender la energía almacenada de las baterías de los automóviles al sistema de distribución eléctrica [9] generando así no solo un medio de transporte en pro del medio ambiente si no un nuevo modelo de negocio para los dueños de los vehículos ya que los propietarios pueden obtener ganancias adicionales mediante la participación en el mercado energético. Mediante políticas gubernamentales que avalen la utilización de estas tecnologías como fuente de ingresos reguladas, es posible incrementar la venta de vehículos eléctricos ya que no serían vistos tan solo como medios de transporte si no como bancos de energía capaces de retribuir a los ingresos de las personas[17]. Según la propuesta de investigación realizada en Reino Unido por [18] realizar este tipo de actividades económicas no solo ayuda a mejorar los ingresos de los propietarios de los vehículos sino que también funciona como una medida de reducción de la generación de GEI en el sector energético, disminuyendo a su paso los impactos ambientales, vendiendo la energía almacenada en los vehículos y haciendo uso de los vehículos eléctricos retirados de circulación como medio de generación de energía limpia a partir de sus baterías intercambiándolas en vehículos funcionales.

En la tesis que aborda el modelo de masificación de vehículos eléctricos en

Bogotá D.C., presentada en la Universidad Nacional de Colombia [19], se profundiza en la descripción y evaluación de los impactos derivados del crecimiento de vehículos eléctricos en la ciudad. El análisis se centra en considerar los efectos en la red de distribución eléctrica, el medio ambiente y la infraestructura necesaria, especialmente las estaciones de carga, que son esenciales para la viabilidad de una amplia adopción de vehículos eléctricos en la ciudad.

En esta tesis, se analiza en detalle la diferencia y los beneficios asociados con diversos tipos de vehículos orientados hacia la movilidad sostenible, como los vehículos eléctricos enchufables (PHEV), los vehículos eléctricos a baterías (BEV) y los vehículos híbridos (HEV). Además, se desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que propone escenarios proyectados para el año 2034, basados en los ejes de disponibilidad e investigación, desarrollo e innovación (I+D+I).

El modelo se construye a partir de datos recabados a través de encuestas, las cuales son parte integral del proyecto de investigación. Estas encuestas identifican los factores primordiales que influyen en la toma de decisiones al adquirir un vehículo eléctrico, así como cuál tipo de vehículo eléctrico se percibe como la opción ideal para cada persona. Este análisis proporciona una comprensión detallada de las dinámicas y las consideraciones clave que moldearán el futuro de la adopción de vehículos eléctricos en Bogotá, contribuyendo al desarrollo de estrategias efectivas en el ámbito de la movilidad sostenible.

El modelo presentado para analizar el crecimiento de los vehículos eléctricos en Bogotá se fundamenta en un enfoque Logit, el cual considera las características clave que influyen en la toma de decisiones. Este modelo desempeña un papel fundamental al predecir el comportamiento del mercado en los próximos años en el contexto de la movilidad eléctrica. Su construcción se basa en la creación de múltiples escenarios que contemplan la variabilidad en investigación y desarrollo, así como la disponibilidad en el mercado, teniendo en cuenta diversos criterios, como la inversión gubernamental en incentivos, fluctuaciones de precios a nivel global y otros factores de relevancia. El modelo Logit ofrece una visión integral de cómo las decisiones de los consumidores se ven influidas por una serie de variables cruciales, lo que permite anticipar posibles tendencias y patrones de adopción de vehículos eléctricos en Bogotá. A través de la exploración de escenarios que abarcan una amplia gama de condiciones, este enfoque facilita una comprensión más profunda de los factores que podrían impulsar o frenar el crecimiento de la movilidad eléctrica en la ciudad, lo que a su vez contribuye a la formulación de estrategias y políticas más efectivas en el ámbito de la movilidad sostenible.

### 3.2 Investigación y desarrollo

Sin lugar a dudas, una de las medidas principales para el mejoramiento de los porcentajes de venta de los vehículos eléctricos es aumentar la capacidad de estaciones de carga eléctrica en la ciudad al igual que los avances tecnológicos que han surgido para la velocidad de carga en las estaciones. Según[20] la manera de obtener la mejor distribución de estaciones de carga es considerando la satisfacción de los usuarios y la conveniencia de carga o facilidad de encontrar un punto de recarga mediante la medición de la densidad poblacional y sectorización de las ciudades.

Al igual que la ubicación de las estaciones, los avances tecnológicos en la recarga son indispensables ya que, dependiendo de la densidad poblacional en una zona, es importante determinar el tipo de recarga que habrá. Según[21], existen tres tipos de estaciones de carga para vehículos eléctricos las cuales son divididas por velocidad de carga, lo que resume a la potencia entregada por punto de carga. Basado en la reubicación de las estaciones de carga de manera estratégica se obtendrá un aumento en un 6% [22] de la eficiencia y utilización de las estaciones de carga, aumentando la probabilidad de adquisición de vehículos eléctricos.

Al igual que en el sector del transporte, es necesario reducir el daño medioambiental generado en el sector de la producción energética, para

esto[23], habla de la generación de la energía mediante paneles fotovoltaicos para las estaciones de carga de los vehículos eléctricos, indicando que es posible generar puntos de carga rápida sin hacer uso del suministro de la red eléctrica de la ciudad, permitiendo a los puntos de recarga a ser auto sustentables y eficientes.

El aumento de vehículos eléctricos destaca la necesidad de estrategias efectivas de carga y navegación. Debido a esto, en el artículo [24] se presenta una nueva estrategia que considera la diferencia en la valoración del tiempo por parte del usuario durante la conducción y la carga, priorizando la carga rápida y eficiente. Utilizando un área de 18 km<sup>2</sup> como estudio de caso, se demuestra cómo esta estrategia optimiza las rutas de carga, con resultados que sugieren una disposición general de los usuarios a pagar más por una carga más rápida. Estos hallazgos subrayan la importancia de esta estrategia para el futuro de los vehículos eléctricos.

### 3.3 Políticas y medidas de regulación

Las medidas de regulación cumplen un papel fundamental en el cambio de la estructura de transporte, debido a que es el gobierno quien debe marcar el punto de partida mediante leyes y reglamentos que beneficien a los dueños de vehículos libres de emisiones de CO<sub>2</sub> y restringe a aquellas personas que no cambian a las nuevas tecnologías con decretos como restricción de acceso a zonas urbanas para vehículos altamente contaminantes, acceso a parqueaderos públicos y carriles exclusivos para autobuses eléctricos[21] haciendo más atractiva la idea de adquirir autos eléctricos. Según una investigación realizada en Suecia[25], se determinó que es indispensable la iniciativa de los vendedores de vehículos para aumentar la venta de los automóviles eléctricos, para esto es necesario crear beneficios tributarios para concesionarios que estén dispuestos a distribuir este tipo de vehículos y que cumplan con una cuota mínima de venta de estos. Teniendo en cuenta estos beneficios a los vendedores, se hace de vital importancia la capacitación en este tipo de tecnologías para ayudar al comprador a adquirir un vehículo eléctrico. Sin embargo, otra de las mayores problemáticas es su alto coste en el mercado, esto debido al precio de las baterías que, aunque ha venido disminuyendo con el tiempo y aumentando su eficiencia energética mediante desarrollos tecnológicos[26], sigue siendo costoso.

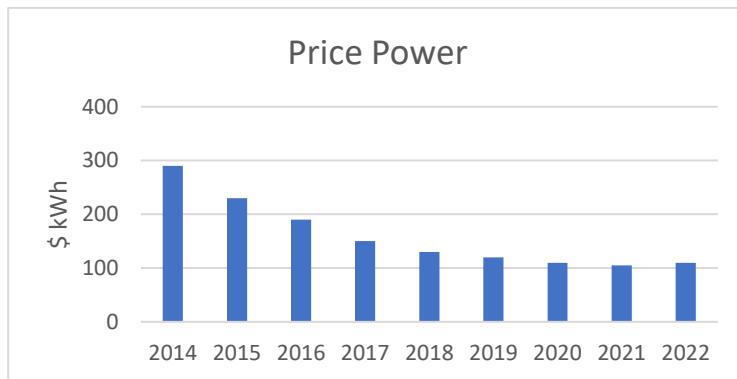


Figura 5. Precios de las baterías de 2014 a 2022[27].

## 4. Objetivos

El cambio climático y la contaminación del medio ambiente son los problemas principales a nivel mundial, debido a esto en el acuerdo de París se contempla mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C teniendo como meta alcanzar máximo los 1.5 °C. Siendo Colombia miembro de los países partícipes, se propone reducir el 20% de sus emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente a 169.44 millones de toneladas para el 2030 y tender a la carbono neutralidad para el año 2050, teniendo en cuenta como punto de partida las emisiones nacionales del 2010.

El transporte es una de las industrias con mayor generación de gases de efecto invernadero siendo la tercera más contaminante después de la industria petrolera y la energética, debido a esto, es necesario contemplar una manera de reducir la generación de Gases de efecto invernadero que sea viable para la economía colombiana, sostenible y funcional en el tiempo, por lo tanto, este

cambio debe realizarse de manera progresiva mediante una hoja de ruta que ayude a guiar al país a un cambio de su sistema de transporte convencional mediante vehículos a gasolina y Diesel, productos derivados del petróleo por uno más amigable con el medio ambiente como lo son los vehículos impulsados por motores eléctricos.

### 4.1. Objetivo General

Realizar el modelamiento y simulación de casos teóricos en los que puede llegar a tenerse un 100% de vehículos eléctricos en Colombia para el año 2050 teniendo en cuenta factores económicos, políticos y sociales que permitan esta posibilidad y así poder reducir la emisión de gases de efecto invernadero producida en el país por el sector del transporte.

### 4.2. Objetivos Específicos

- Identificar los puntos clave que permitirían llevar a cabo el cambio a un 100% de vehículos eléctricos en Colombia.
- Diseñar diferentes escenarios posibles para el año 2050 contemplando los puntos claves encontrados para generar el cambio en el sistema de transporte en Colombia.
- Realizar el modelamiento y simulación de los escenarios contemplados para corroborar la posibilidad de alcanzar la meta de cero emisiones de CO<sub>2</sub> para los años 2040 y 2050.

## 5. Metodología

Para la identificación de los puntos clave que permitirían llevar a un cambio energético en el sector del transporte a cero emisiones de GEI se realizó una investigación a fondo de los desarrollos tecnológicos que han surgido en los últimos años para identificar cuáles son viables para el cumplimiento de este objetivo al igual que las normas y decretos existentes que permitan llegar a una ley de cero emisiones.

Se realizará una división por sector de estudio:

- Político (Normas, leyes y Decretos)
- Estructura de puntos eléctricos para carga de vehículos.
- Desarrollos tecnológicos
- Factores económicos

Una vez se realiza la investigación, se propone el diseño de posibles escenarios que podrían existir en los años 2040 y 2050 haciendo uso y contemplando los avances tecnológicos, políticos y de desarrollo de infraestructura de la ciudad. Estos escenarios son casos hipotéticos dados por las tendencias tecnológicas y políticas que han sido contempladas en la investigación y pretenden estructurarse los siguientes casos a partir de la interpretación de la orientación política favorable o no de los escenarios para la energía renovable en el país y la orientación de la sociedad a favor del mismo cambio con la intención de analizar los resultados obtenidos por las simulaciones y evidenciar si en algún punto del tiempo al año 2050 es posible contar con un transporte 100% eléctrico en Colombia.

### 5.1. Selección de la herramienta de modelado

Existen múltiples herramientas de modelado y simulación que permiten crear sistemas dinámicos y escenarios para la comprensión de los procesos que se desean exponer, sin embargo, se toma la decisión de utilizar Vensim para la simulación de escenarios de vehículos eléctricos en Colombia debido a su capacidad para modelar de manera clara y comprensible la complejidad de los sistemas dinámicos. En este contexto, la simplicidad de la interfaz de Vensim puede ser una ventaja, permitiendo centrarse en la dinámica clave sin abrumarse con características complejas. Además, dado que la simulación de escenarios de vehículos eléctricos en Colombia puede involucrar múltiples variables y factores interrelacionados, la capacidad de Vensim para visualizar y analizar las dinámicas a lo largo del tiempo podría facilitar la toma de decisiones estratégicas en el ámbito de la movilidad sostenible.

## 5.2. Descripción del modelo

### 5.2.1. Descripción de la estructura del modelo

El modelo comprende las variables principales para la toma de decisiones en la probabilidad de selección de un vehículo eléctrico según una encuesta realizada en el modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá [19] en la cual, se especifica cuáles son las razones principales por las cuales las personas en Bogotá optarían por un vehículo eléctrico. En base a estos, se plantea un modelo Logit que ayude a comprender el funcionamiento del proceso de selección en base a los porcentajes de cada uno de estos factores.

Al considerar los diversos factores que influyen en la toma de decisiones, se asignaron los pesos específicos a cada uno de ellos en base a los valores obtenidos de las encuestas del modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá D.C.[19] con el objetivo de proporcionar una evaluación integral. Estas ponderaciones reflejan la importancia relativa de cada factor en la toma de decisiones respecto a la elección de vehículos. La investigación para esta metodología asigna los siguientes porcentajes a los factores clave:

**Costo del vehículo:** Representa el 30% de la evaluación total, reflejando la significativa influencia de este factor en la decisión final.

**Autonomía:** Con un peso del 21%, este factor refleja la importancia de la capacidad de recorrido del vehículo en la toma de decisiones.

**Costos operativos:** Es asignado un peso del 23% a este factor, reconociendo su impacto en los costos a largo plazo asociados con la propiedad del vehículo.

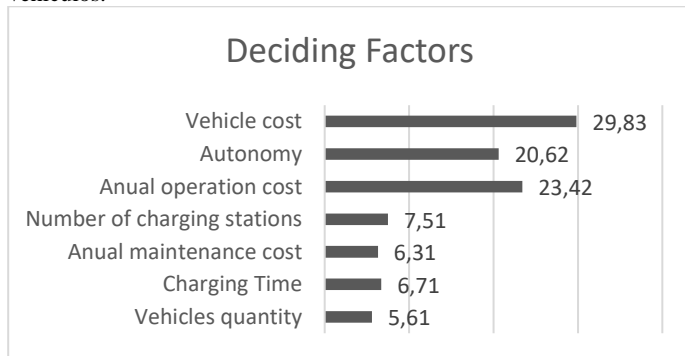
**Estaciones de carga:** Dada la creciente importancia de la infraestructura de carga, este factor tiene un peso del 7% a partir de los resultados obtenidos.

**Tiempo de carga:** Cuenta con un resultado del 7% considerando la conveniencia y eficiencia a la rapidez con la que un vehículo puede recargarse.

**Costos de mantenimiento:** Con un peso del 6%, este factor refleja la relevancia de los gastos asociados con el mantenimiento a lo largo del tiempo.

**Cantidad de vehículos:** Cuenta con un 6% para reflejar la importancia de la variedad y disponibilidad de modelos en la decisión del consumidor.

Esta estructura de ponderación busca proporcionar una evaluación equilibrada y completa, considerando todos los aspectos relevantes en la selección de vehículos.



**Figura 6.** Factores de decisión en la probabilidad de sección de un VE

Para el modelo Logit que se utiliza para determinar la probabilidad de selección de un vehículo eléctrico, se asignan valores específicos a los coeficientes (Betas) asociados con diferentes factores de decisión. Estos Betas son esenciales para calcular la probabilidad logarítmica de elegir un vehículo eléctrico en función de ciertos atributos. A continuación, se detallan los valores específicos de los Betas para cada factor:

Costo del vehículo (CVE): -5.96e-05  
Autonomía (A): 0.002575

Costos operativos (CO): -1.17e-07  
Estaciones de carga (EC): 0.00028  
Tiempo de carga (TC): -0.001117  
Costos de mantenimiento (CM): -5.25e-08  
Cantidad de vehículos (VE): 3.3e-07

Estos valores son esenciales para calcular la probabilidad logarítmica de elegir un vehículo eléctrico en función de las características mencionadas. El resultado final del modelo Logit se obtiene mediante la combinación de estos Betas con los valores específicos de cada factor para un vehículo dado. Este resultado proporciona una medida de la probabilidad de elección de un vehículo eléctrico en relación con las variables mencionadas en el modelo. Es importante destacar que estos valores de Betas influyen en la magnitud y dirección de la contribución de cada factor a la probabilidad total de selección del vehículo eléctrico. La ecuación que representa el comportamiento en el factor de decisión es la siguiente:

$$\frac{1}{1 + e^{(-5.96e-05 \cdot CVE + 0.002575 \cdot A - 1.17e-07 \cdot CO + 0.00208 \cdot EC - 5.96e-08 \cdot CM - 0.001117 \cdot TC + 3.3e-07 \cdot VE)}}$$

El modelo realizado para el análisis de los escenarios planteados comprende la dinámica de sistemas como herramienta principal para el desarrollo de este. Dentro del modelo, se encuentran varios Loops de realimentación enfocados principalmente con la probabilidad de selección de un vehículo eléctrico.

### 5.2.2. Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento de los vehículos eléctricos se componen principalmente del aumento anual del Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (SOAT), el cual representa una parte significativa de los gastos. Además, se incluyen los mayores desembolsos asociados a las revisiones mecánicas preventivas, asegurando un óptimo rendimiento y funcionamiento del vehículo eléctrico.

El desglose de costos también abarca la inversión en un kit de carretera adecuado, destinado a cubrir posibles eventualidades durante los desplazamientos. Asimismo, se consideran los gastos relacionados con las revisiones técnico-mecánicas periódicas, asegurando el cumplimiento de los estándares de seguridad y eficiencia.

Es importante destacar que estos costos totales se ven mitigados por el porcentaje correspondiente a los beneficios e incentivos económicos aplicables a los vehículos eléctricos. Este componente reduce la carga financiera asociada al mantenimiento, promoviendo la adopción de tecnologías más amigables con el medio ambiente y respaldando la sostenibilidad en el transporte.

Costos de mantenimiento = Kit de carreteras+Lavado+Revisión preventiva + SOAT + Tecnomecanica - (Revisión preventiva \* Beneficios e incentivos) - (SOAT \* Beneficios e incentivos) - (Tecnomecanica\*Beneficios e incentivos)

### 5.2.3. Costos del vehículo

El costo asociado a la adquisición de vehículos eléctricos está directamente vinculado a la producción y penetración en el mercado de estos automóviles. Existe una relación directa entre la cantidad de vehículos eléctricos producidos y la curva de aprendizaje del costo, donde, a medida que la producción y la adopción de estos vehículos aumentan, se generan economías de escala que contribuyen a la disminución de los costos unitarios de fabricación.

Este fenómeno se explica por la optimización de procesos, la mejora en la eficiencia de la cadena de suministro y la madurez tecnológica que acompaña a la producción a gran escala. En consecuencia, los beneficios derivados de la producción masiva tienen un impacto directo en el costo final del vehículo eléctrico.

A esto, se suma la influencia positiva de los beneficios e incentivos económicos asociados a la adopción de vehículos eléctricos. El gobierno ofrece incentivos fiscales, subsidios directos y otros estímulos económicos

para fomentar la transición hacia vehículos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Estos incentivos no solo actúan como factores de reducción de costos inmediatos para los consumidores, sino que también aumentan la atraktividad económica de elegir un vehículo eléctrico frente a sus contrapartes de combustión interna.

En consecuencia, la combinación de la curva de aprendizaje derivada de la producción en masa y los beneficios e incentivos económicos crea un escenario propicio para la reducción de los costos asociados a los vehículos eléctricos. Este abaratamiento no solo influye positivamente en el costo inicial del comprador, sino que también incrementa la probabilidad de que los consumidores opten por la adquisición de un vehículo eléctrico, contribuyendo así a la expansión y consolidación de esta tecnología en el mercado automotriz.

La ecuación que representa el comportamiento del costo del VE es:

$$\text{costo del VE} = \text{Costo Inicial VE} + \int -\text{Reducción del costo}$$

#### 5.2.4. Autonomía

La autonomía de un vehículo eléctrico, entendida como la distancia que puede recorrer con una sola carga de batería, se presenta como un factor de crucial importancia en el proceso de toma de decisiones al considerar la compra de un vehículo eléctrico. No obstante, este aspecto fundamental está ligado al progreso y desarrollo de la tecnología asociada a las baterías y sistemas de almacenamiento de energía.

La evolución de la autonomía de los vehículos eléctricos se encuentra vinculada a los avances tecnológicos en el campo de las baterías, donde la mejora continua en la eficiencia y capacidad de las baterías desempeña un papel central. A medida que se logran avances en la densidad energética, la durabilidad y la eficiencia de las baterías, se traduce directamente en un aumento en la autonomía de los vehículos eléctricos [28].

Este incremento en la autonomía no solo responde a la mejora de las características de las baterías, sino que también está relacionado con la escalabilidad de la producción y la aceptación generalizada de la tecnología eléctrica en la sociedad. Con el aumento de la cantidad de vehículos eléctricos en las carreteras, se crea un círculo virtuoso en el que la demanda creciente impulsa la inversión en investigación y desarrollo, generando así más avances tecnológicos y, por ende, mejoras en la autonomía.

La aceptación de los vehículos eléctricos en la sociedad desempeña, por lo tanto, un papel crucial en este proceso. A medida que la percepción pública de los vehículos eléctricos evoluciona hacia una aceptación más amplia y positiva, se estimula la inversión en innovación tecnológica. Esta dinámica, a su vez, contribuye a la consolidación de los vehículos eléctricos como una opción viable y atractiva en el mercado automotriz.

La función que representa el aprendizaje en la autonomía del vehículo eléctrico es:

$$\text{Autonomía} = 30.537 * \text{Vehiculos electricos}^{\text{Factor de aprendizaje}}$$

#### 5.2.5. Costos operativos

Los costos operativos de un vehículo son aquellos desembolsos asociados con el mantenimiento adecuado del automóvil, asumiendo un promedio de 15,000 kilómetros por año. Estos gastos, en su mayoría, derivan del costo por kilovatio-hora (Kwh), los impuestos del vehículo y el precio de las baterías, que se equiparan al precio del Kwh de almacenamiento. Para ilustrar el valor de un automóvil de gama media, consideraremos un consumo promedio de 0.15 Kwh por kilómetro, expresado como la variable "Kwh/km VE".

La expresión matemática que representa los costos operativos se define mediante la ecuación:

$$\text{Costos Operativos} = (\text{Km recorridos por año} * \text{KWh/Km VE} * \text{costo Kwh}) + \text{Precio Baterías COP} + \text{Impuestos}$$

Esta ecuación refleja la relación directa entre los costos operativos y los componentes clave, como el consumo eléctrico por kilómetro, la distancia recorrida, el costo del Kwh, los impuestos asociados al vehículo y el valor de las baterías. El análisis detallado de estos factores permite una evaluación precisa del impacto financiero asociado con el uso de un vehículo eléctrico.

#### 5.2.6. Tiempo de carga

El tiempo de carga en los vehículos eléctricos es un aspecto crucial en la toma de decisiones al considerar la adopción de esta tecnología. A diferencia de la rápida recarga de combustibles fósiles, el enfoque en la carga de vehículos eléctricos se centra en satisfacer las necesidades diarias de kilometraje, marcando un cambio significativo en la forma de recargar el vehículo.

Actualmente, con un cargador medio de 16 A, 230 VAC, 3.7 Kw, el tiempo promedio de carga completa es de alrededor de 480 minutos (8 horas). Este tiempo de carga, aunque inicialmente puede parecer extenso, se espera que disminuya progresivamente con el avance tecnológico y la creciente presencia de vehículos eléctricos en circulación. Esta disminución se modela mediante una ecuación que sigue una curva de aprendizaje, expresada como:

$$\text{Tiempo de Carga} = 480 * \text{Vehiculos electricos}^{-\text{factor de aprendizaje}}$$

En esta ecuación, la variable "Vehículos eléctricos" representa la cantidad de automóviles eléctricos en circulación, y el "factor de aprendizaje" es una variable dinámica que se ajusta según el escenario y el desarrollo tecnológico. Este modelo refleja la tendencia de reducción en el tiempo de carga a medida que aumenta la familiaridad y adopción de los vehículos eléctricos en la sociedad, proporcionando una perspectiva optimista sobre la evolución de la eficiencia en la carga de estos vehículos en el futuro.

#### 5.2.7. Estaciones de carga

En el contexto actual, el país experimenta un aumento constante en el número de estaciones de recarga, guiado por disposiciones legales específicas, como los Artículos 7 y 9 de la Ley 1964 de 2019. Estos artículos establecen un crecimiento mínimo del 2% de las estaciones totales como puntos de recarga para vehículos eléctricos, junto con un requisito mínimo de estaciones de recarga según el tipo de ciudad. No obstante, es importante señalar que estas regulaciones no abordan específicamente las estaciones de recarga en hogares y oficinas, las cuales desempeñan un papel esencial en el fomento del crecimiento del ecosistema de vehículos eléctricos.

El modelo propuesto considera el crecimiento de las estaciones de recarga en relación con la cantidad de vehículos existentes, introduciendo una curva de aprendizaje. Según este enfoque, a medida que la cantidad de vehículos eléctricos en circulación aumenta, se espera que la infraestructura de estaciones de carga también se expanda. En la actualidad, Colombia cuenta con 193 estaciones de recarga distribuidas a lo largo del país, sirviendo como punto de partida para el modelamiento de los escenarios.

La ecuación que representa el aumento de las estaciones de carga es:

$$\text{Estaciones de carga} = 60 * \text{Vehiculos electricos}^{\text{factor de aprendizaje}}$$

#### 5.2.8. Cantidad de vehículos

Fomentar el aumento de vehículos eléctricos no solo impulsa su presencia en las calles, sino que también influye positivamente en diversos factores de decisión. La aceptación social creciente actúa de gran manera, mejorando elementos clave como las infraestructuras de estaciones de carga, la asequibilidad de los vehículos, y la eficiencia en el tiempo de carga. Este impulso, a su vez, nutre la preferencia de la población hacia la elección de vehículos eléctricos, generando un ciclo positivo.

Con la creciente aceptación y mejora de los factores relacionados, la población se inclina hacia un aumento en la cantidad de vehículos eléctricos. Este incremento no solo transforma la movilidad urbana, sino que también estimula la inversión en la tecnología eléctrica en el país.

La cantidad de vehículos en circulación está estrechamente vinculada a la población existente, la cual se modela a través de un ciclo de nacimientos y muertes, reflejando las tasas establecidas de natalidad y mortalidad. Dentro de esta población, hay una proporción que adquiere automóviles, determinada por la tasa de adquisición de vehículos. Esta tasa, a su vez, se multiplica por la probabilidad de seleccionar un vehículo eléctrico (VE), la cual es influenciada por diversos factores de decisión, delineando el flujo de venta de vehículos eléctricos.

La dinámica de la cantidad de vehículos eléctricos en circulación también se ve afectada por la tasa de chatarrización a lo largo del tiempo. Esta tasa refleja la retirada de vehículos de circulación debido a su uso prolongado y otros motivos legales que conllevan a la salida del vehículo del parque automotor.

La ecuación que representa el comportamiento del incremento de las ventas de vehículos eléctricos está representada por la siguiente ecuación:

Vehículos nuevos\*Probabilidad de selección de un VE  
En esta ecuación, la variable “vehículos nuevos” representa el número de automóviles que la población está dispuesta a adquirir y es representada mediante la ecuación:

Población\*Tasa población que compra vehículo

Por último, el número de vehículos eléctricos en Colombia por año será determinado por la ecuación:

$$\text{Número de vehículos} = 8299 + \int \text{Venta de VE} - \text{Chatarrización VE}$$

### 5.2.9. Vehículos a Combustión

Los vehículos a combustión son la mayor proporción actual del parque automotor, entre los cuales irán decreciendo a medida que los vehículos eléctricos se abren paso en la aceptación de la población.

Los vehículos a gasolina dentro del modelo, serán el producto restante de la probabilidad de selección de un auto eléctrico, dando a entender que la tasa de población que no adquiere un VE, adquirirá un vehículo a gasolina, el cual será afectado en mayor proporción por la tasa de chatarrización o de salida de esta tecnología la cual es mayor que la tasa en los vehículos eléctricos debido a la antigüedad del parque automotor de automóviles a combustión, fallos mecánicos provenientes de un mal mantenimiento periódico de estos, entre otros.

La ecuación que representa el comportamiento del flujo de venta de vehículos a gasolina es:

(1-Probabilidad de selección de un VE) \*Vehículos nuevos

### 5.2.10. CO2 generado por vehículos eléctricos y vehículos a combustión

La generación de CO2 asociada a los vehículos eléctricos depende en gran medida de la fuente de energía utilizada para alimentar las redes eléctricas. En regiones donde la electricidad proviene mayoritariamente de fuentes no renovables, como el carbón o el gas natural, los vehículos eléctricos pueden contribuir indirectamente a las emisiones de CO2. Aunque los vehículos eléctricos en sí mismos no emiten gases de escape, la huella de carbono está vinculada al mix energético de la red eléctrica. La transición hacia fuentes de energía renovable es esencial para maximizar los beneficios ambientales de los vehículos eléctricos en el país.

En contraste, los vehículos a combustión interna emiten directamente gases contaminantes, incluyendo CO2, durante su operación. Estos vehículos dependen de la quema de combustibles fósiles, lo que resulta en emisiones significativas de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos. La diferencia fundamental radica en que, mientras los vehículos eléctricos permiten una transición hacia una movilidad más sostenible con el tiempo, los vehículos a combustión contribuyen de manera directa a la contaminación atmosférica y al cambio climático.

En el modelo, la generación de CO2 proveniente de los vehículos eléctricos, está representada a partir de del CO2 producto de la generación de energía eléctrica con la cual se recargan sus baterías. Actualmente en Colombia, la energía eléctrica baja en carbono representa un 74.8% [29] del total de la generación equivalente a 166.20 gCO2eq/Kwh. Este valor variará en el tiempo a medida que vaya cambiando el porcentaje de energía baja en carbono en el total de la generación de energía en Colombia y será multiplicado por la cantidad de Kwh/km en un VE equivalente a 0.15 Kwh/km en promedio, dando como resultado el valor de generación de CO2 producto de las recargas de energía para el uso del VE por cada Kilómetro recorrido, con unidades de gCO2/Km.

$$CO2 VE Km = CO2 \text{ en generación eléctrica} * "KWh/Km VE"$$

Luego, este valor transformado en toneladas es multiplicado por la cantidad de kilómetros promedio que recorre un vehículo (15.000 Km) y por el total de vehículos eléctricos, para obtener como resultado las Toneladas de CO2 por año totales resultantes del uso de los VE.

$$CO2 VE = Vehiculos electricos * \left( \frac{CO2 VE Km * Promedio de Km / Año}{1e + 06} \right)$$

El CO2 proveniente de la utilización de los vehículos a gasolina, es representado en el modelo a partir de la multiplicación de la cantidad de vehículos a gasolina, el promedio de Kilómetros recorridos en un año (15.000 km) y el CO2 promedio generado por un vehículo a gasolina durante un kilómetro (143 gCO2/Km), dando como resultado la cantidad total de Toneladas de CO2.

$$CO2 VG = Vehiculos a Gasolina * \left( \frac{CO2 VG * Promedio de Km / Año}{1e + 06} \right)$$

El CO2 salvado a partir de la salida de circulación de los vehículos a gasolina es representado por la ecuación:

$$\text{Chatarrización VG} = \text{Chatarrización VG} * \left( \frac{CO2 VG * Promedio de Km / Año}{1e + 06} \right)$$

### 5.2.2. Descripción de la implementación del modelo

El modelo de simulación diseñado abarca un horizonte temporal extenso, dando inicio desde el año 2023 hasta el año 2050. La elección del punto de partida en 2023 se basa en la recopilación de los últimos detalles e información relevante disponible en ese momento, asegurando que el modelo se inicie con una base sólida y actualizada. A lo largo de este horizonte temporal, se busca comprender cómo se desarrollarían los escenarios relacionados con los vehículos eléctricos en el contexto colombiano, explorando las posibles trayectorias de crecimiento y evolución tecnológica. Los resultados obtenidos a lo largo de este periodo ofrecerán insights valiosos sobre las acciones necesarias para alcanzar los objetivos planteados y optimizar la adopción de vehículos eléctricos en Colombia.

En la realización de este modelo se planteó un paso a paso para poder conseguir el resultado del modelo final, iniciando con la búsqueda de información relevante y detallada del comportamiento de esta tecnología en Colombia y en diferentes partes del mundo, aportando una idea global de cómo se han superado las barreras de crecimiento en un ámbito legal y tecnológico. Seguido de esto, se desarrolla el planteamiento de los posibles escenarios descritos en el artículo y su comportamiento a lo largo del tiempo. Una vez se realizaron los escenarios, se desarrolla el planteamiento de la mejor estrategia de simulación, dando como resultado un modelo Logit para analizar el comportamiento de la regresión lineal producto de los múltiples factores de decisión para la selección de un vehículo eléctrico. Para dar inicio al modelamiento del sistema, se utiliza el Software Vensim a partir de un proceso de selección donde se establece como el mejor software para esta simulación dado que su interfaz permite comprender al usuario de manera rápida el funcionamiento de este.



## 6. Validación del modelo

### 6.1. Validación de estructura

La confirmación de la validez en la estructura implica compararla detalladamente con el modelo de popularización de vehículos eléctricos desarrollado por la Universidad Nacional en Bogotá D.C [19]. En dicho modelo, los factores se identificaron en este artículo como determinantes para la toma de decisiones al adquirir un vehículo eléctrico emergen como elementos clave. Para seleccionar estos factores, se empleó el Modelo Logit, que ayuda a calcular cuánto impacto tiene cada uno de estos en la decisión final.

Resulta relevante subrayar que la robustez de estos factores encuentra respaldo en un estudio paralelo llevado a cabo por la Universidad EAN. En este contexto, realizaron encuestas a la población de Bogotá [30], obteniendo resultados que respaldan y refuerzan la presencia de factores similares. Estos factores, que abordan aspectos tecnológicos, sociales, económicos e infraestructurales, no solo reflejan una consistencia entre ambos estudios, sino que también afirman la solidez de la estructura evaluativa propuesta en este trabajo.

Al validar estos factores desde distintas perspectivas, no solo se está fortaleciendo la idea de su importancia en la decisión de adquirir vehículos eléctricos en Bogotá, sino que también se está contribuyendo a una comprensión más contextualizada del proceso de adopción de esta tecnología en Colombia.

### 6.2. Validación de comportamiento

Se lleva a cabo un análisis en consideración de los resultados presentados por el Ministerio de Ambiente en la Estrategia Nacional de Movilidad (ENME) [5], evidenciando similitudes en los valores proporcionales de vehículos eléctricos en los escenarios Greta, Renewable Extractivism y Burning House. Esto sugiere una postura conservadora al proponer los resultados esperados para el año 2050, basándose en las indicaciones proporcionadas en dicho documento. Asimismo, al comparar estos resultados con el modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá, se observan similitudes hasta el año 2034. Dado que este modelo abarca un periodo más acotado, se reflejan porcentajes de selección de vehículos eléctricos que están entre el 10% y el 20%, alineándose con las conclusiones presentadas en el presente artículo.

En relación con la generación de CO<sub>2</sub> en Colombia derivada del proceso de generación eléctrica, se recurrió a los datos proporcionados por LowCarbon Power, una organización especializada en la consolidación de esta información. Esta entidad detalla la estructura de la red de generación eléctrica en diversos países a nivel mundial.

La construcción de los modelos de aprendizaje para las variables que describen el comportamiento a lo largo de los años se fundamentó en los valores base de los escenarios, extraídos de diversas fuentes citadas en las referencias bibliográficas. Estos porcentajes de enseñanza se ajustan conforme a los escenarios propuestos. La validación de estos resultados se lleva a cabo al confrontarlos con diversos modelos existentes en distintos artículos, como los mencionados anteriormente, garantizando así una coherencia y respaldo en la interpretación de los datos presentados.

### 6.3. Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad en el modelo de algunas de los principales factores en la toma de decisiones propuesta para la selección en la compra de vehículos eléctricos en Colombia, dando, así como resultado que el comportamiento del modelo es bastante estable y los resultados obtenidos a partir de este son robustos en su totalidad.

Algunas de las variables modificadas para este son los factores de las curvas de aprendizaje en las variables de crecimiento de estaciones de carga y autonomía.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la validación de la sensibilidad en las variables mencionadas anteriormente en el

escenario de simulación Green Democracy:

- Estaciones de carga:

Se realiza un cambio de tres puntos porcentuales en el factor de aprendizaje, de un 30% a un 33% y se obtiene un aumento para el año 2050 de 2.9 millones más de vehículos eléctricos y una obtención del 99% de vehículos eléctricos para el año 2044.

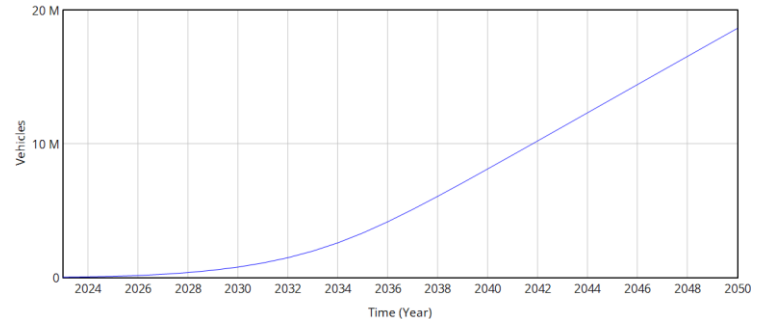


Figura 8. Número de VE en análisis de sensibilidad – estaciones de carga

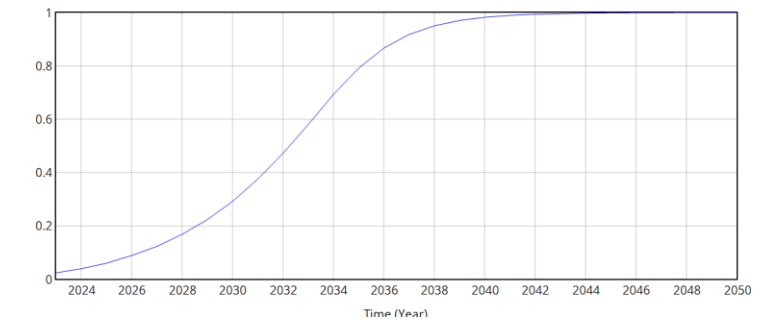


Figura 9. Porcentaje de VE en análisis de sensibilidad – estaciones de carga

- Autonomía

Se realiza un cambio de dos puntos porcentuales en el factor de aprendizaje, de un 20% a un 22% y se obtiene un aumento para el año 2050 de 2.6 millones más de vehículos eléctricos y una obtención del 99% de vehículos eléctricos para el año 2043.

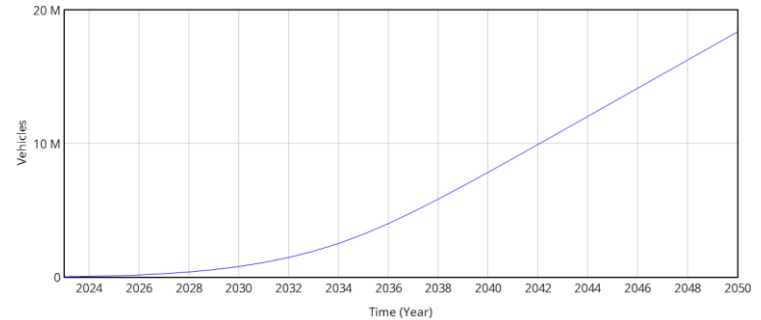


Figura 10. Número de VE en análisis de sensibilidad – Autonomía

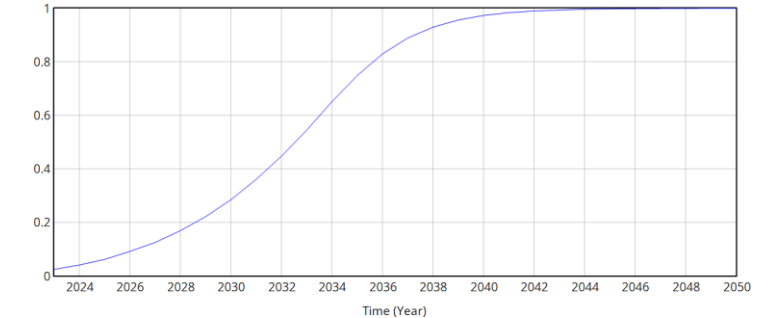
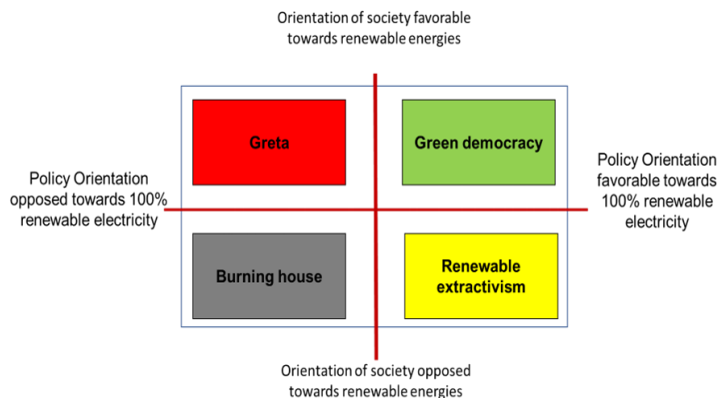


Figura 11. Porcentaje de VE en análisis de sensibilidad – Autonomía

Esta diferencia entre los resultados de Estaciones de carga y Autonomía, es dada a partir del porcentaje de participación de los factores de decisión dentro de la toma de decisiones, dado que autonomía tiene un 14% y estaciones de carga un 12% como se indica en el apartado del diseño de escenarios. Por lo tanto, aunque se modifiquen en un mismo porcentaje de 3%, se obtendrá un resultado mayor moviendo la variable de autonomía que de estaciones de carga para este análisis.

## 7. Análisis de resultados

### 7.1. Diseño de escenarios



**Figura 12.** Escenarios planteados del posible comportamiento del país a 2050

#### 1. Green Democracy:

El precio de los combustibles fósiles se encuentra al alza manteniendo un aumento progresivo de los gastos operativos de los vehículos a gasolina, permitiendo así un crecimiento de los vehículos eléctricos debido a su bajo costo operativo mediante la carga de los vehículos con el bajo costo en comparación de la energía en los sectores residenciales, permitiendo un crecimiento extraordinario de los puntos de recarga en hogares y centros comerciales, al igual que el aumento de estas a lo largo de la malla vial en el país. La política de cero emisiones es cada vez más estricta llegando a impulsar incentivos tributarios a favor de los vehículos eléctricos llegando a una curva de aprendizaje capaz incrementar en gran medida la cantidad de EV en Colombia. Se hace uso eficiente de los avances tecnológicos y de desarrollo en la ciudad, generando en las personas el deseo de migrar a vehículos eléctricos al igual que aumentar los beneficios por el cambio a las nuevas tecnologías. De igual manera, las empresas invierten y apuestan a un mejoramiento de estas tecnologías llegando a tener precios asequibles para la mayoría de los colombianos.

Las variables utilizadas para el planteamiento del escenario Green Democracy comprenden las siguientes especificaciones:

- Beneficios e incentivos económicos 1% – 50%
- Aprendizaje autonomía 20%
- Aprendizaje estaciones de carga 30%
- reducción aprendizaje para el costo del vehículo -33%
- Aprendizaje tiempo de carga: -5%
- Costo Kwh 802 - 489 COP/Kwh
- CO2 en generación eléctrica: 166.2 – 0 gCO2eq / Kwh

#### 2. Greta:

El precio de los combustibles fósiles aumenta, lo que promueve una transición energética en la que se ven distintas situaciones políticas que oscilan con los cambios de gobierno, impidiendo que exista una estructura sólida que apoye la transformación del sector del transporte a vehículos eléctricos. La actividad económica del sector privado permite diversificar los ingresos del país, lo que conlleva junto al costo del combustible a aumentar la posibilidad de adquirir un VE, sin embargo, la inexistencia de incentivos económicos por parte del gobierno ralentiza la curva de adquisición del transporte eléctrico, sumado a

la poca estructura de suministro eléctrico para estos vehículos. Con ayuda del sector privado, se logra incentivar la innovación y desarrollo de los VE logrando reducir el costo de las baterías y mejorar la autonomía de los vehículos.

Las variables utilizadas para el planteamiento del escenario Greta comprenden las siguientes especificaciones:

- Beneficios e incentivos económicos 1% – 8.9%
- Aprendizaje autonomía 15.5%
- Aprendizaje estaciones de carga 28%
- reducción aprendizaje para el costo del vehículo -42%
- Aprendizaje tiempo de carga: -4%
- Costo Kwh 802 - 640 COP/Kwh
- CO2 en generación eléctrica: 166.2 – 10.6 gCO2eq / Kwh

#### 3. Renewable Extractivism:

El precio de los combustibles fósiles no impulsan el cambio a vehículos eléctricos debido a su reducción en el precio. Se crea incertidumbre en el sector privado debido a que los gobiernos promueven políticas para frenar la exploración haciendo al país dependiente del petróleo y gas importados, al igual, se reduce la inversión de las empresas en nuevos proyectos de innovación o desarrollo tecnológico, llevando esto a un estancamiento del decrecimiento del precio de los VE y disminución de la curva de aprendizaje de las estaciones de carga en el país. Los incentivos económicos no son suficientes para activar la economía en pro del desarrollo sostenible en el sector transporte y se plantea una curva de aprendizaje lenta en la adquisición de los vehículos eléctricos debido a la falta de apoyo del sector privado en el país.

Las variables utilizadas para el planteamiento del escenario Renewable Extractivism comprenden las siguientes especificaciones:

- Beneficios e incentivos económicos 1% – 50%
- Aprendizaje autonomía 14%
- Aprendizaje estaciones de carga 26%
- reducción aprendizaje para el costo del vehículo -43%
- Aprendizaje tiempo de carga: -3%
- Costo Kwh 802 - 852 COP/Kwh
- CO2 en generación eléctrica: 166.2 – 43.2 gCO2eq / Kwh

#### 4. Burning House:

El precio de los combustibles fósiles bajan favoreciendo al uso de vehículos convencionales, debido a esto las personas no tienen interés en incurrir en gastos innecesarios adquiriendo vehículos eléctricos. En los gobiernos siguientes, se promueve la idea de continuar con una economía favorable y dependiente del petróleo y gas, teniendo así una disminución progresiva de los beneficios antes dados a dueños de vehículos eléctricos. El país no hace ningún tipo de ley o decreto para implementar vehículos eléctricos ni beneficios que puedan favorecer al aumento de la venta de este tipo de autos, por el contrario, se invierte en exploración de hidrocarburos y el uso de los combustibles fósiles aumenta. La estructura de las ciudades para vehículos eléctricos existe únicamente en zonas puntuales como centros comerciales y en los hogares de los dueños de este tipo de vehículos.

Las variables utilizadas para el planteamiento del escenario Burning House comprenden las siguientes especificaciones:

- Beneficios e incentivos económicos 1% – 8.9%
- Aprendizaje autonomía 14%
- Aprendizaje estaciones de carga 25%
- reducción aprendizaje para el costo del vehículo -45%
- Aprendizaje tiempo de carga: -2%
- Costo Kwh 802 - 880 COP/Kwh
- CO2 en generación eléctrica: 166.2 – 23.5 gCO2eq / Kwh

## 7.2. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos al simular los distintos escenarios con el modelo planteado, indica algo muy claro: para que en Colombia avancemos de verdad en el desarrollo de vehículos eléctricos, es crucial que las decisiones del gobierno estén en línea con lo que la gente quiere y necesita. Este análisis muestra que no solo se trata de mejorar la tecnología de los autos, sino de lograr que las políticas gubernamentales y la aceptación social vayan de la mano.

El éxito de los vehículos eléctricos no depende solo de avances técnicos, sino de que el gobierno implemente políticas que impulsen el uso de estos autos, ya sea con beneficios fiscales, reglas que cuiden el medio ambiente o inversiones en lugares para cargar los autos. Pero también es clave que la gente esté dispuesta a cambiar sus autos tradicionales por eléctricos, y eso va más allá del aspecto técnico. Factores como el costo, los beneficios para el medio ambiente y la comodidad diaria juegan un papel importante en la decisión de la gente.

### 7.2.1 Estaciones de Carga

Para aumentar las posibilidades de que la gente elija vehículos eléctricos, resulta esencial contar con un elevado número de estaciones de carga que se ajusten al incremento anual de vehículos. En el escenario denominado "Green Democracy", se observa un patrón de aprendizaje que muestra un total de 7213 estaciones de carga para el año 2050, superando significativamente los valores de otros escenarios como 4665 para "Greta", 2684 para "Burning House" y 3280 para "Renewable Extractivism". Estos datos sugieren que el factor más influyente para un crecimiento eficiente de las estaciones de carga radica en la predisposición social hacia los vehículos eléctricos. Una actitud favorable por parte de la sociedad hacia esta tecnología es el elemento determinante para impulsar el desarrollo y la eficiencia de la infraestructura de carga, proporcionando así un mejor entorno para la adopción masiva de vehículos eléctricos.

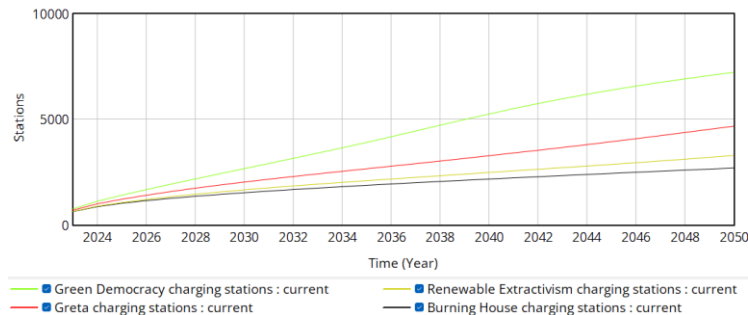


Figura 13. Proyección de las estaciones de carga a 2050 para los 4 escenarios analizados.

### 7.2.2 Tiempo de carga

La rapidez con la que se carga un vehículo eléctrico desempeña un papel crucial en su aceptación general, siendo un factor determinante en la adaptación de las personas a este cambio. Este aspecto destaca especialmente porque implica dedicar considerable tiempo en comparación con los vehículos de combustión tradicionales. Para abordar este desafío, se llevó a cabo una simulación del modelo utilizando una carga promedio de 16 amperios, 230 voltios de corriente alterna, generando 3.7 kilovatios, con un tiempo de carga total de aproximadamente 480 minutos para alcanzar el 100% de capacidad.

Los resultados más eficientes se obtuvieron en el escenario "Green Democracy", donde se logró reducir el tiempo de carga promedio a unos 330 minutos, equivalente a 5.5 horas. En contraste, los otros escenarios presentaron valores de 366 minutos para "Greta", 428 minutos para "Burning House" y 397 minutos para "Renewable Extractivism".

Estos resultados sugieren que la metodología de carga actual podría evolucionar hacia un enfoque en el que los usuarios carguen sus vehículos durante la noche o en momentos de espera, como en centros comerciales, oficinas o en casa. Esto se debe a que los tiempos actuales de carga son

demasiado extensos para abastecer de manera rápida, tal como se hace actualmente con los vehículos de combustión. Este cambio en la dinámica de carga podría ser crucial para facilitar la transición hacia la adopción masiva de vehículos eléctricos.

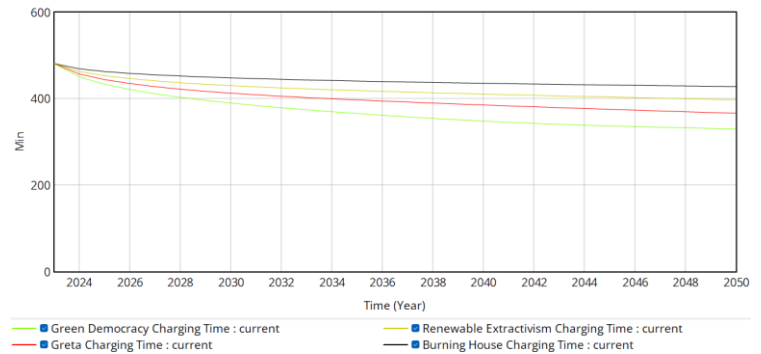


Figura 14. Proyección del tiempo de carga a 2050 para los 4 escenarios analizados.

### 7.2.3 Autonomía

En la actualidad, la autonomía de un vehículo eléctrico está muy por debajo de la autonomía de un vehículo a combustión rondando el valor de 170 km. Este, es uno de los indicadores más bajos y con mayor problemática para los vehículos eléctricos, ya que no existen estaciones de carga suficientes en el país para suplir la enorme necesidad de una estación cercana y los tiempos de demora son extensos, debido a esto, la necesidad de incrementar la autonomía de los vehículos eléctricos es uno de los mayores retos en la actualidad para lograr mejorar la eficiencia de la penetración en el mercado.

Según los valores obtenidos por la simulación del modelo en los diferentes escenarios, se proyecta alcanzar valores cercanos a la eficiencia actual de un vehículo a combustión para el año 2050. Para el escenario "Green Democracy", el valor de autonomía incrementará hasta los 840 km, 529 km para el escenario "Greta", 417 km para "Burning House" y 448 km para "Renewable Extractivism".

El valor de autonomía conseguido en el escenario Green Democracy, demuestra que teniendo un buen incremento de vehículos eléctricos, puede llegar a considerarse una tecnología competitiva en el ámbito de la autonomía, compitiendo contra los vehículos a combustión actuales. Sin embargo, los otros escenarios, no muestran resultados tan favorables, ya que, en la actualidad, una autonomía cercana a los 500 km no daría una seguridad para el consumidor en viajes largos o largos trayectos de recorrido.

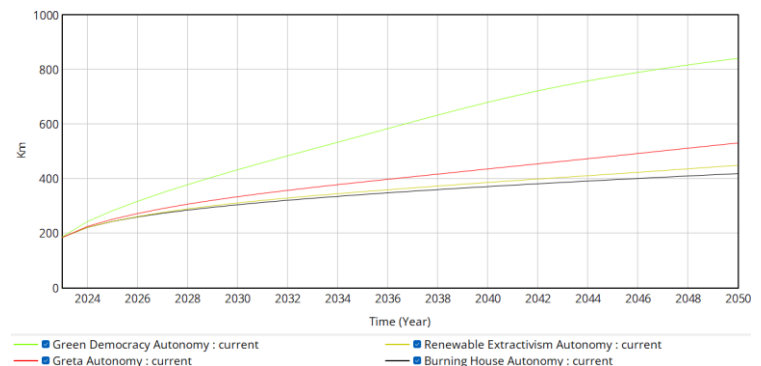
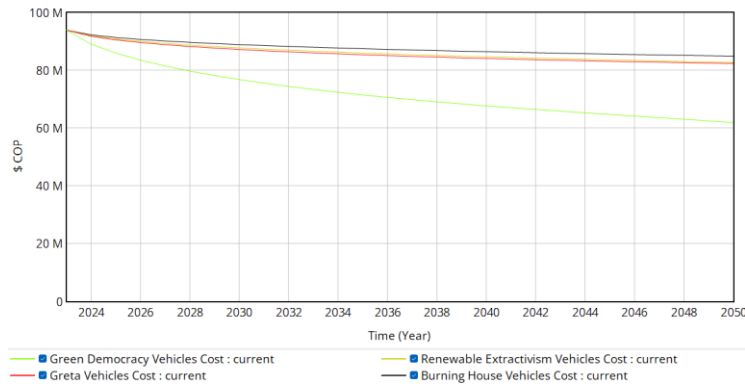


Figura 15. Proyección de la autonomía a 2050 para los 4 escenarios analizados.

### 7.2.4 Costo de los vehículos eléctricos

El costo inicial de un vehículo eléctrico al año 2023 es de alrededor de los 93'800.000 COP, un precio bastante costoso, para la gran mayoría de personas, encontrándose así como la principal barrera que enfrentan los vehículos eléctricos. Siendo el costo inicial el mayor contribuyente en la aceptación de la tecnología de este tipo de automóviles en Colombia es de vital importancia conocer el comportamiento que este tendrá en los escenarios propuestos, dando así un resultado muy favorable para el escenario "Green Democracy" llegando a obtener una disminución del costo del vehículo a

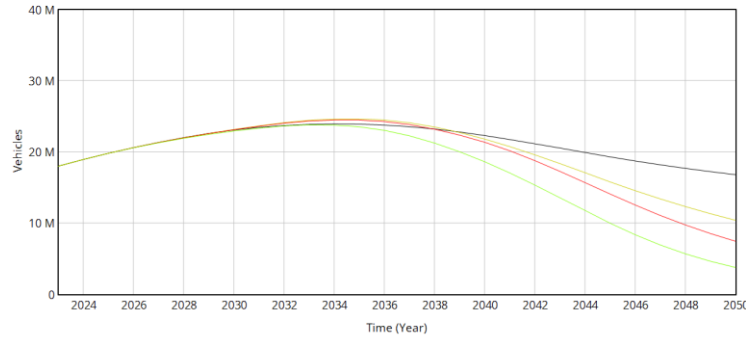
61'820.000 COP en el mejor de los casos, siendo este, un precio competitivo con los vehículos a combustión. El escenario "Greta" para el año 2050 alcanza un costo inicial de 82'275.000 COP, "Burning House" un costo de 82'600.000 COP y "Renewable Extractivism" un costo de 84'800.000 COP. En el caso de Green Democracy, se evidencia una gran mejoría de los precios a largo plazo y se espera que el decrecimiento del precio tan elevado permita una mayor aceptación en los colombianos. Sin embargo, para los demás escenarios, no se obtienen resultados tan favorables ya que su reducción en todos los casos es de menos de 11 millones de pesos con respecto al valor inicial.



**Figura 16.** Proyección del costo de vehículos eléctricos a 2050 para los 4 escenarios analizados.

### 7.2.5 Número de vehículos a combustión

Como consecuencia de los factores de decisión detallados en el artículo, se observa una notable disminución de los vehículos a combustión en el escenario "Green Democracy". En este caso, la cifra se reduce significativamente, pasando de alrededor de 18 millones de vehículos a 3.76 millones. En el escenario "Greta", se registra un total de 7.4 millones de vehículos, mientras que en "Burning House" la cifra asciende a 16.8 millones, y en "Renewable Extractivism" se alcanzan 10.4 millones. Este comportamiento no solo recae sobre los factores de decisión si no en el porcentaje de vehículos que salen de circulación, ya que es fundamental realizar un plan de evacuación de vehículos a combustión que cumplen con su ciclo de vida. A partir de esto, se logra evidenciar una disminución de vehículos a combustible de una manera más acelerada.

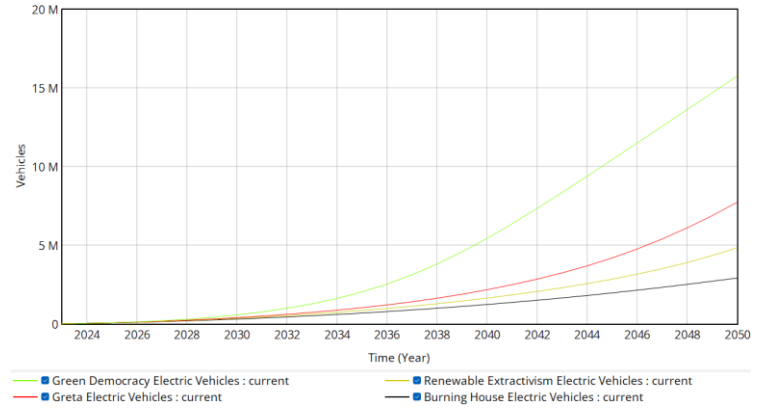


**Figura 17.** Proyección de los vehículos de combustión a 2050 para los 4 escenarios analizados.

### 7.2.6 Número de vehículos eléctricos

La cantidad de vehículos eléctricos en la actualidad no supera el 1.4% del total con un valor de 8299 vehículos aproximadamente y se espera un crecimiento de este valor a partir del cumplimiento de los factores de decisión de cada escenario. Para el escenario "Green Democracy", se logrará un estimado de 15.7 millones de vehículos eléctricos al año 2050, en el escenario "Greta" se espera tener alrededor de 7.7 millones, "Burning House" un total de 2.9 millones y para "Renewable Extractivism" se espera un total de 4.8 millones de vehículos eléctricos. Existe una gran diferencia entre estos valores con respecto al escenario "Green Democracy", dado que este es uno de los factores más importantes para el crecimiento de esta tecnología, extiende una

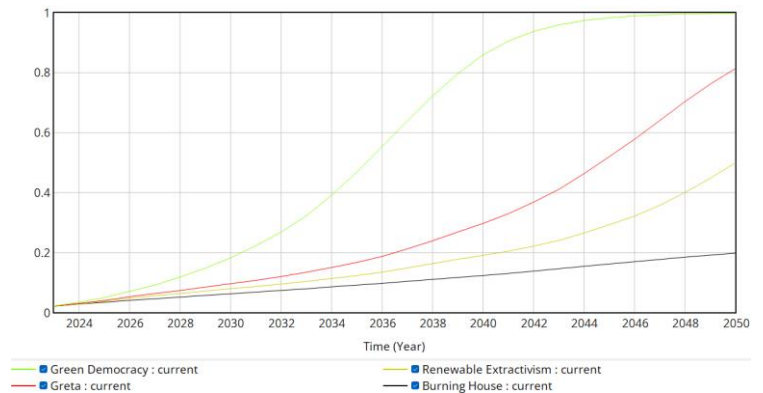
brecha significativa entre los resultados de los escenarios propuestos.



**Figura 18.** Proyección de los vehículos eléctricos a 2050 para los 4 escenarios analizados.

### 7.2.7 Probabilidad de selección de un vehículo eléctrico

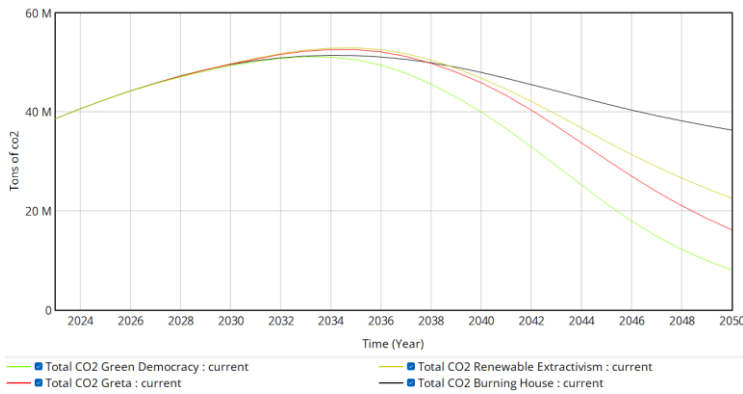
Dado el enorme crecimiento en el escenario "Green Democracy", este tiene un crecimiento bastante considerable desde el año 2028, en el que se comienza a evidenciar una separación de los resultados de simulación arrojados para los otros escenarios. Para el escenario "Green Democracy", se espera obtener un 99.8% de los vehículos como eléctricos, sin embargo, los otros escenarios no cuentan con resultados similares o cercanos a un 100%. Para el escenario "Greta", se espera un 81.4% de participación de esta tecnología, "Burning House" se estima un 19.8% de estos vehículos y en "Renewable Extractivism" se espera un valor del 50%. Esta brecha entre escenarios evidencia que el ámbito social y político tienen que ir en el mismo sentido para poder progresar como se espera en un futuro.



**Figura 19.** Proyección de la probabilidad de selección de un VE a 2050 para los 4 escenarios analizados.

### 7.2.8 CO2 producido por vehículos en Colombia

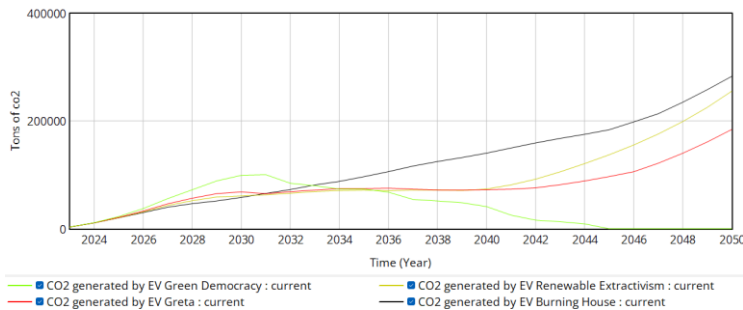
El comportamiento del CO2 producido por los vehículos en Colombia reacciona al comportamiento de la reducción de los vehículos a combustión, esto debido a que son en su mayoría los mayores contribuyentes a la generación de CO2. Teniendo un valor inicial en el año 2023 de alrededor de 38.6 millones de Toneladas de CO2, se obtiene que para los escenarios planteados, en el año 2050 se esperan 8 millones de toneladas de CO2 en "Green Democracy", 16.1 millones para "Greta", 36.3 millones para "Burning House" y 22.5 millones de toneladas de CO2 para "Renewable Extractivism". Aunque los valores estén por encima del valor inicial sin incluir a Green Democracy, se debe considerar que el número de vehículos para el año 2050 es significativamente mayor en comparación con el año 2023.



**Figura 20.** Proyección de CO2 producido por autos de combustión en Colombia a 2050 para los 4 escenarios analizados.

Los vehículos eléctricos, aportan tan solo una mínima parte del total de CO2, ya que esta se refiere al total de CO2 que es

producido a partir de la generación de energía utilizada para la recarga de sus baterías, convirtiéndolos en productores indirectos. El escenario “Green Democracy” espera una generación de CO2 producto de vehículos eléctricos que ascenderá hasta el año 2030 a un valor máximo de 99 mil Toneladas de CO2 y posteriormente se reducirá hasta llegar a 0 debido a su incremento en energías renovables para la generación de energía. Para los demás escenarios, se contempla un aumento prolongado, debido a que sus redes energéticas no son 100% renovables llevado a valores de 184 mil Toneladas de CO2 para el escenario “Greta”, 283 mil Toneladas de CO2 para “Burning House” y 252 mil Toneladas de CO2 para “Renewable Extractivism”



**Figura 21.** Proyección de CO2 producido por vehículos eléctricos en Colombia a 2050 para los 4 escenarios analizados.

## 8. Conclusiones y recomendaciones

Los puntos clave para poder pensar en un futuro con una transición del 100% de participación de vehículos eléctricos en Colombia es contemplar una total armonía entre la orientación social y la orientación política tal como se describe en el escenario “Green Democracy”, además, se debe realizar un análisis riguroso del comportamiento en el futuro del costo de compra de los vehículos eléctricos, la autonomía y los costos de operación ya que en total, equivalen a un 73.87% del total en los factores de decisión al momento de la compra para un vehículo eléctrico. A su vez, es importante comprender que el número de estaciones de carga, los costos de mantenimiento, el tiempo de carga y la cantidad de vehículos eléctricos, son otras de las variables clave a tener en cuenta para poder lograr el objetivo de tener un parque automotor 100% eléctrico.

A partir de los elementos clave que ocasionan un cambio del sistema de transporte, se desarrollaron cuatro escenarios basados en los extremos de orientación social y política. En este análisis, se observó que tres de dichos escenarios logran superar el umbral del 50% de vehículos eléctricos en el parque automotor. No obstante, al llegar al año 2040, solo uno de estos escenarios había logrado estar cerca de este porcentaje, lo cual se interpreta como la notable demora en el proceso de adopción de esta tecnología cuando las orientaciones social y política evolucionan en direcciones opuestas. Este hallazgo enfoca la importancia crítica de la alineación entre los factores

sociales y políticos para propiciar una transición eficiente hacia vehículos eléctricos en el sistema de transporte.

Al analizar la transformación en el sistema de transporte en Colombia, se aprecia una gran disminución en las emisiones generadas en el país. No obstante, es fundamental reconocer que esta reducción nunca alcanzará un valor de cero hasta que el sistema de generación eléctrica esté completamente alimentado por fuentes de energía renovable para los vehículos eléctricos y no se hayan reducido a cero los vehículos a combustión ya que son los mayores contribuyentes a la generación de CO2 en el sector del transporte. Aunque los vehículos eléctricos no generan emisiones de CO2 durante su vida útil, es necesario tener en cuenta que su proceso de abastecimiento a través de electrolineras implica el consumo de energía. Este hecho, los convierte en generadores indirectos de CO2. Debido a esto, destaca la importancia de abordar la transición hacia vehículos eléctricos como parte integral de una estrategia más amplia que también considere la descarbonización del sector de generación de energía. La dependencia de fuentes de energía renovable para la recarga de vehículos eléctricos es un paso crucial hacia la obtención de emisiones cercanas a cero en el sector del transporte. Por esto, el avance hacia la sostenibilidad completa requiere una transformación integral en la matriz energética como se representa en el escenario “Green Democracy”, en donde los valores de gCO2 por Kwh en la generación eléctrica descienden a 0. La descarbonización completa del sector transporte tendrá una reducción con retraso, debido a la baja velocidad de salida de los vehículos a combustión.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el porcentaje de participación de los vehículos eléctricos en Colombia, según los escenarios propuestos, muestra un rango significativo. En el escenario menos optimista, representado por “Burning House”, el porcentaje es del 19.8%, mientras que en el escenario más alentador, “Green Democracy”, la participación asciende a un 99.8% para el año 2050. Estos porcentajes proporcionan una aproximación significativa que sugiere que en unos años más, la totalidad del parque automotor podría ser completamente eléctrico. Es relevante indicar que el porcentaje más alto obtenido para el año 2040 es del 85.9% a partir del escenario “Green Democracy” y un 29.7% para el escenario “Greta”, mostrando que los últimos años contemplados en los escenarios son cruciales para el crecimiento masivo de esta tecnología. Esto sugiere que la aceptación de los vehículos eléctricos tiende a aumentar de manera acelerada en los años finales del periodo analizado.

## 9. Referencias

- [1] L. N. Patil *et al.*, “Investigation on different parameters associated with purchase of electric vehicle in India,” *Case Stud Transp Policy*, vol. 15, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.cstp.2024.101152.
- [2] REN 21, “RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT,” *REN 21*, 2022.
- [3] S. Faisal, B. P. Soni, G. R. Goyal, F. I. Bakhsh, D. Husain, and A. Ahmad, “Reducing the Ecological Footprint and charging cost of electric vehicle charging station using renewable energy based power system,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2023.100398.
- [4] M. A. Nasab, W. K. Al-Shibli, M. Zand, B. Ehsan-maleki, and S. Padmanaban, “Charging management of electric vehicles with the presence of renewable resources,” *Renewable Energy Focus*, vol. 48, p. 100536, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ref.2023.100536.
- [5] H. Zhou, Y. Dang, Y. Yang, J. Wang, and S. Yang, “An optimized nonlinear time-varying grey Bernoulli model and its application in forecasting the stock and sales of electric vehicles,” *Energy*, vol. 263, p. 125871, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.125871.
- [6] C. Gil Ribeiro and S. Silveira, “The impact of financial incentives on the total cost of ownership of electric light commercial vehicles in EU countries,” *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 179, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.tra.2023.103936.

- [7] J. Pasha *et al.*, "Electric vehicle scheduling: State of the art, critical challenges, and future research opportunities," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 38. Elsevier B.V., Mar. 01, 2024. doi: 10.1016/j.jii.2024.100561.
- [8] D. Horak, A. Hainoun, G. Neugebauer, and G. Stoeglehner, "Battery electric vehicle energy demand in urban energy system modeling: A stochastic analysis of added flexibility for home charging and battery swapping stations," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 37, p. 101260, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.segan.2023.101260.
- [9] P. G. Dhawale, V. K. Kamboj, S. K. Bath, M. S. Raboaca, and C. Filote, "Integrating renewable energy and plug-in electric vehicles into security constrained unit commitment for hybrid power systems," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 2035–2048, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.01.027.
- [10] E. Lopez-Arboleda, A. T. Sarmiento, and L. M. Cardenas, "Understanding synergies between electric-vehicle market dynamics and sustainability: Case study of Colombia," *J Clean Prod*, vol. 321, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128834.
- [11] M. Torres Pamplona, A. Jaramillo Duque, and J. Ortiz Castrillón, "Vehículos Eléctricos Versus Convencionales en Colombia: Un Análisis Financiero Comparando Los Costos Totales de Propiedad," *Revista Innovación y Desarrollo Sostenible*, vol. 1, no. 2, pp. 36–45, Feb. 2021, doi: 10.47185/27113760.v1n2.26.
- [12] Leonardo Paoli, "Electric Vehicles," IEA. Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>
- [13] SK Innovation and Kia Motors join forces in latest of several Korean circular battery initiatives," circular energy storage. Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.circularenergystorage-online.com/post/sk-innovation-and-kia-motors-join-forces-in-latest-of-several-korean-circular-battery-initiatives>
- [14] International Energy Agency, "Global Supply Chains of EV Batteries," Francia, Jul. 2022. [Online]. Available: [www.iea.org/t&c/energy.com](http://www.iea.org/t&c/energy.com)
- [15] "DOE Awards \$60 Million to Accelerate Advancements in Zero-Emissions Vehicles," energy.gov. Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/articles/doe-awards-60-million-accelerate-advancements-zero-emissions-vehicles>
- [16] L. Maybury, P. Corcoran, and L. Cipcigan, "Mathematical modelling of electric vehicle adoption: A systematic literature review," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 107, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103278.
- [17] N. Bañol Arias, S. Hashemi, P. B. Andersen, C. Træholt, and R. Romero, "Assessment of economic benefits for EV owners participating in the primary frequency regulation markets," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 120, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105985.
- [18] G. Zhao and J. Baker, "Effects on environmental impacts of introducing electric vehicle batteries as storage - A case study of the United Kingdom," *Energy Strategy Reviews*, vol. 40, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100819.
- [19] B. D. C. " Blas and M. Quintana, "Modelo de masificación de vehículos eléctricos," Bogotá D.C, 2014.
- [20] D. Xu, W. Pei, and Q. Zhang, "Optimal Planning of Electric Vehicle Charging Stations Considering User Satisfaction and Charging Convenience," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15145027.
- [21] M. S. Mastoi *et al.*, "An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends," *Energy Reports*, vol. 8. Elsevier Ltd, pp. 11504–11529, Nov. 01, 2022. doi: 10.1016/j.egy.2022.09.011.
- [22] P. Skaloumpakas *et al.*, "A user-friendly electric vehicle reallocation solution for uniformly utilized charging stations," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, p. 101266, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101266.
- [23] J. Engelhardt, J. M. Zepter, T. Gabderakhmanova, and M. Marinelli, "Energy management of a multi-battery system for renewable-based high power EV charging," *eTransportation*, vol. 14, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100198.
- [24] J. Zhong, N. Yang, X. Zhang, and J. Liu, "A fast-charging navigation strategy for electric vehicles considering user time utility differences," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 30, p. 100646, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100646.
- [25] J. Hagman and J. J. Stier, "Selling electric vehicles: Experiences from vehicle salespeople in Sweden," *Research in Transportation Business and Management*, 2022, doi: 10.1016/j.rtbm.2022.100882.
- [26] B. Nykvist and M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," *Nat Clim Chang*, vol. 5, no. 4, pp. 329–332, Mar. 2015, doi: 10.1038/nclimate2564.
- [27] Annie Lee, "Alza en materias primas impulsa mayores precios de baterías para autos eléctricos," Bloomberg. Accessed: Oct. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.bloomberglinea.com/2021/11/04/alza-en-materias-primas-impulsa-mayores-precios-de-baterias-para-autos-electricos/>
- [28] H. Aouzellag, K. Ghedamsi, and D. Aouzellag, "Energy management and fault tolerant control strategies for fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicles to enhance autonomy, efficiency and life time of the fuel cell system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 22. Elsevier Ltd, pp. 7204–7213, Jun. 15, 2015. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.132.
- [29] LowCarbonPower, "Electricidad en Colombia en 2022." [Online]. Available: <https://lowcarbonpower.org/es/region/Colombia#:~:text=El%20promedio%20de%20las%20emisiones,159.9%20to%20164.2%20gCO2eq%20%20kWh.%5C!A%C3%B1o>
- [30] G. M. L. S. S. E. Joya Leidy, "Factores de decisión que influyen en la adquisición de vehículos eléctricos en Bogotá," *Universidad EAN*, Mar. 2023.