

UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS

PROYECTO DE INTEGRACIÓN

**GUÍA 3- MODELO DE SIMULACIÓN PARA ANALIZAR EL EFECTO DE POLÍTICAS
QUE PROMUEVEN EL DESPLIEGUE DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

AUTORES:

MÓNICA CASTAÑEDA RIASCOS

TUTOR:

JOSÉ VELOSA GARCÍA

BOGOTÁ, D. C., 22 DE MAYO DE 2023

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	5
3. OBJETIVOS	7
4. JUSTIFICACIÓN	8
5. MARCO TEÓRICO.....	9
5.1 Tipos de Vehículos Eléctricos	9
5.2 Tipos de políticas para promover los Vehículos Eléctricos.....	9
5.3 Sobre el funcionamiento de los vehículos eléctricos	11
5.4 El rol de las estaciones de carga.....	11
5.5 Modelos de simulación enfocados en vehículos eléctricos.....	12
5.6 Normatividad en el mundo.....	13
5.7 Normatividad en Colombia.....	16
5.7.1 Meta de vehículos eléctricos en Colombia.....	18
6. METODOLOGÍA	18
6.1 Análisis de restricciones.....	19
Riesgos.....	19
Alcance:	19
Tiempo:	19
Coste y recursos:	20
Calidad:	20
6.2 Datos	20
6.3 Proceso de validación del modelo.....	25
7. MODELO DE SIMULACIÓN	27
7.1 Modelo de flujos y niveles	27
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	32
9. VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN	37
10. CONCLUSIONES	38
11. REFERENCIAS.....	40

RESUMEN EJECUTIVO

En este documento se presenta una propuesta de investigación, específicamente un modelo de simulación para analizar el efecto de políticas que promueven el despliegue de vehículos eléctricos en el sector residencial colombiano. Para ello se construye un modelo de simulación que emplea dinámica de sistemas y con el cual es posible identificar la política o combinación de políticas que acelerará el despliegue de vehículos eléctricos en el país. Se prefiere esta metodología sobre otras debido a la facilidad de evaluar políticas y sistemas caracterizados por ciclos de retroalimentación, no linealidad, y retardos. El modelo permitirá concluir la efectividad y costo de políticas enfocadas a la promoción de los vehículos eléctricos desde la demanda de electricidad como: la exención de impuestos y el pico y placa ambiental para vehículos eléctricos.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico tradicional ha sido cuestionado debido al surgimiento de tecnologías no convencionales que buscan descarbonizar el sistema eléctrico con el fin de mitigar los efectos del cambio climático, tales como tecnologías de energía limpia: eólica y solar fotovoltaica (di Silvestre et al., 2021). Sin duda, el uso de energías renovables es importante para combatir el cambio climático y, en consecuencia, evitar los efectos colaterales de las tecnologías eléctricas convencionales sobre el planeta (Craig et al., 2019). En este sentido, los gobiernos de todo el mundo han establecido objetivos ambientales en su sistema eléctrico para alcanzar la sostenibilidad ambiental (Ren21, 2022). Por lo tanto, el comienzo de una transición de un sistema de energía centralizado a un sistema de energía descentralizado es una realidad en la mayoría de los países. Como parte del sistema de energía descentralizado, es importante comprender el papel de los Recursos Energéticos Distribuidos (DER). Las cuales se definen como “un grupo de tecnologías flexibles conectadas a los sistemas de distribución”, estas incluyen sistemas solares fotovoltaicos, almacenamiento de energía en baterías y vehículos eléctricos (EV) (Caballero-Peña et al, 2022).

En cuanto a los vehículos eléctricos, entre los países con mayores niveles de penetración de Vehículos Eléctricos se encuentran China, Alemania, Reino Unido, Francia, Noruega, Países Bajos y Suecia (S. Li et al., 2021). En América Latina, Chile es líder en el mercado de vehículos eléctricos. Por ejemplo, este país aprobó la Estrategia Nacional de electromovilidad como un esfuerzo importante para reducir los niveles de emisión, dado que el sector transporte en Chile representa el 21% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Aymeric & Francois, 2017; Bibra et al., 2021). En cuanto a Colombia el camino por recorrer hacia fomentar el despliegue de energías renovables es largo y los esfuerzos para promover los vehículos eléctricos han sido tímidos. Es por esto que el objetivo de este trabajo es: Desarrollar un modelo de simulación para analizar el efecto de políticas que promueven el despliegue de vehículos eléctricos en el sector residencial colombiano. El resto del documento se encuentra organizado de esta manera: problema de investigación, objetivos, justificación, marco teórico, metodología, cronograma, calendario, modelo de simulación, análisis de resultados, validación y conclusiones.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Colombia expidió la Ley 1844 de 2017 “por medio de la cual se expresa el acuerdo de París”, comprometiéndose a reducir las emisiones de gases efecto invernadero en un 20% en comparación con las emisiones proyectadas para 2030 (UPME, 2019). En este sentido descarbonizar el sector transporte se convierte en una prioridad, dado que el mismo representa el 36% del consumo energético de Colombia y es responsable del 25% de las emisiones de gases efecto invernadero (Máñez et al., 2019).

Los vehículos eléctricos representan una alternativa de descarbonización del sector transporte. Principalmente, porque los beneficios de los vehículos eléctricos incluyen: reducción de emisiones, reducción de dependencia de fuentes no renovables y reducción de la contaminación auditiva (Aymeris y Francois, 2017; Noel et al., 2018). Sin embargo, el despliegue de los vehículos eléctricos conlleva a superar diferentes barreras asociadas al despliegue de esta tecnología (IEA, 2021). Estas barreras son de mercado, financieras, tecnológicas, de infraestructura y regulatorias como se puede observar en la **Figura 1**.

Algunas ciudades en Colombia han establecido programas de buses eléctricos, y el gobierno ha establecido metas nacionales, como que el 10% de los buses urbanos sean eléctricos para 2025 y un 100% lo sea para 2035 (EV Outlook, 2022). Además, en 2019 el gobierno colombiano definió la meta de tener en circulación 600000 vehículos eléctricos para 2030, sin embargo, a la fecha el país está lejos de alcanzar dicha meta (Valora, 2023). Por otro lado, esta estrategia no se compara con países líderes en vehículos eléctricos en Latinoamérica como Chile, el cual tiene una Estrategia Nacional de Electromovilidad, cuya meta es que el 100% de los vehículos de carga ligera sean eléctricos para el 2030, un 100% de los vehículos de transporte público y un 40% de los vehículos particulares sean eléctricos para 2050 (EV Outlook, 2022).

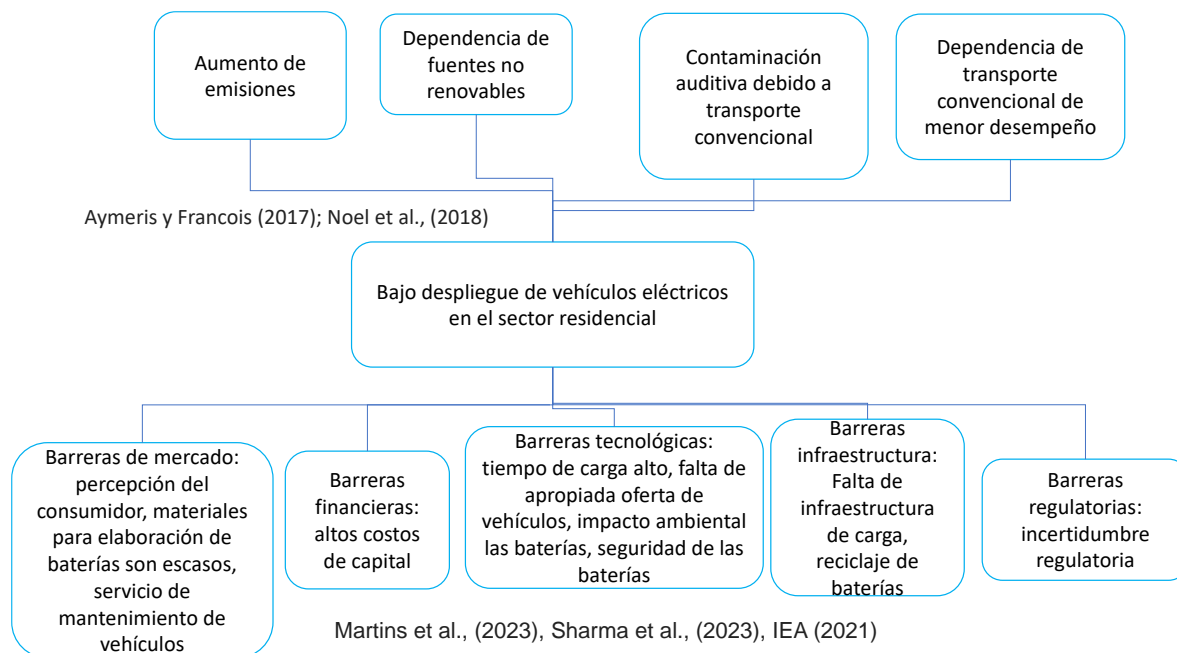


Figura 1. Árbol de problema. Fuente: Elaboración propia

En este trabajo se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo favorecer el despliegue de vehículos eléctricos en el sector residencial colombiano a través de políticas evaluadas en un modelo de simulación?

3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de simulación para analizar el efecto de políticas que promueven el despliegue de vehículos eléctricos en el sector residencial colombiano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el marco regulatorio disponible para el desarrollo de vehículos eléctricos en Colombia.
- Caracterizar la oferta y demanda de vehículos eléctricos en Colombia limitando el problema de investigación.
- Recolectar los datos de simulación necesarios para correr el modelo.
- Construir el modelo de simulación a través del planteamiento de ecuaciones y el uso de software vensim.
- Validar el comportamiento y estructura del modelo de simulación según protocolos de validación.
- Analizar escenarios de políticas (soat e impuesto de rodamiento) para promover el despliegue de vehículos eléctricos en el mercado eléctrico.

4. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación es conveniente porque hasta el momento no existe una herramienta para Colombia que facilite la toma de decisiones de políticas disponibles para promover el despliegue de vehículos eléctricos en el país.

En cuanto a la relevancia social, la sociedad misma se beneficiará de esta investigación. Este tipo de herramienta permitirá encontrar las herramientas para contribuir con la descarbonización. Puesto que según el acuerdo de París se debe limitar el calentamiento global generado por las emisiones de gases efecto invernadero manteniendo la temperatura global por debajo de 1.5 °C (IPCC, 2013).

Una herramienta de simulación ayudará a resolver aspectos prácticos asociados a planificación y la toma de decisiones asociadas a la adopción de vehículos eléctricos. En cuanto al valor teórico y la utilidad metodológica el modelo a construir este podrá ser replicado para cualquier otro país. A continuación, se presentan algunos artículos que han abordado temáticas relacionadas a la propuesta en esta investigación, aunque ninguno para Colombia.

Los estudios relacionados con vehículos eléctricos se han enfocado principalmente en desarrollar modelos de simulación aplicados a países con grandes avances en esta tecnología como: China, Francia, Alemania, India, Japón y Estados Unidos; donde los estudios se enfocan en políticas públicas para la industria automotriz, es decir, esto involucra a los fabricantes de automóviles, el ciclo de vida de los vehículos y baterías (Gómez Vilchez & Jochem, 2019; Alvarez Fernandez et al., 2018; X. Li et al., 2020). Incluso, en algunos países como China los vehículos eléctricos ya son competitivos respecto a los vehículos convencionales por lo que se han comenzado a desmontar los incentivos hacia esta tecnología, esto se ha estudiado desde la dinámica de sistemas y la simulación basada en agentes (Wang et al., 2019). Incluso algunos estudian la conversión de transporte público a vehículos eléctricos usando un análisis económico (Girard et al., 2019).

Como se puede observar entre los artículos revisados, ninguno plantea el desarrollo de un modelo de simulación para analizar el efecto de políticas que promueven el despliegue de vehículos eléctricos en el sector residencial en Colombia. Siendo este tema de gran utilidad teórica y metodológica.

5. MARCO TEÓRICO

El marco teórico fue construido principalmente a partir de los artículos científicos disponibles en la base de datos de la Universidad EAN, especialmente science e IEEE. La mayoría de los artículos revisados son de fechas posteriores a 2019. Esta sección se divide en las siguientes partes: (i) caracterización de los tipos de vehículos eléctricos, (ii) políticas para promover los vehículos eléctricos, (iii) funcionamiento de los vehículos eléctricos, (iv) rol de las estaciones de carga, (v) modelos de simulación en vehículos eléctricos, (vi) normatividad en Colombia (vi) normatividad en el mundo.

5.1 Tipos de Vehículos Eléctricos

En cuanto a los vehículos eléctricos esta alternativa de transporte ofrece varios tipos. Existen 4 tipos de vehículos eléctricos (Li et al., 2019): Vehículos eléctricos con baterías, vehículos eléctricos híbridos enchufables, vehículos eléctricos con autonomía extendida.

Vehículos eléctricos con baterías o 100% eléctricos, tienen un motor con batería recargable. Deben usarse para recargar energía de una fuente externa. Los vehículos eléctricos con baterías han probado ser ambientalmente amigables. Pero requieren de infraestructura de carga (Cabrera et al., 2019).

Vehículo eléctrico híbrido enchufable. PHEV (Plug-in electric vehicle). tiene dos motores, uno eléctrico que se alimenta de las baterías y uno convencional que funciona con gasolina o diesel (Li et al., 2019; Cabrera et al., 2019). Los vehículos eléctricos con autonomía extendida son híbridos (con un motor de combustión) y con una batería de mayor tamaño. Algunos vehículos eléctricos híbridos no necesariamente se enchufan y el sistema de frenos transforma la energía cinética en movimiento (Cabrera et al., 2019).

5.2 Tipos de políticas para promover los Vehículos Eléctricos

En cuanto a la revisión literaria Wang et al., (2019) indica que la literatura disponible sobre vehículos eléctricos está relacionada con la efectividad de las políticas, análisis estadístico y encuestas al consumidor.

En cuanto a las políticas de oferta están dirigidas a fabricantes de automóviles e infraestructura de carga. Se alienta o exige a los proveedores de servicios que promuevan la investigación, el desarrollo y la innovación. Además, para proveedores de servicios de infraestructura, se otorgan subsidios para reducir el costo de instalación y el costo de operación (Wang et al., 2019). Ver **Figura 2**.

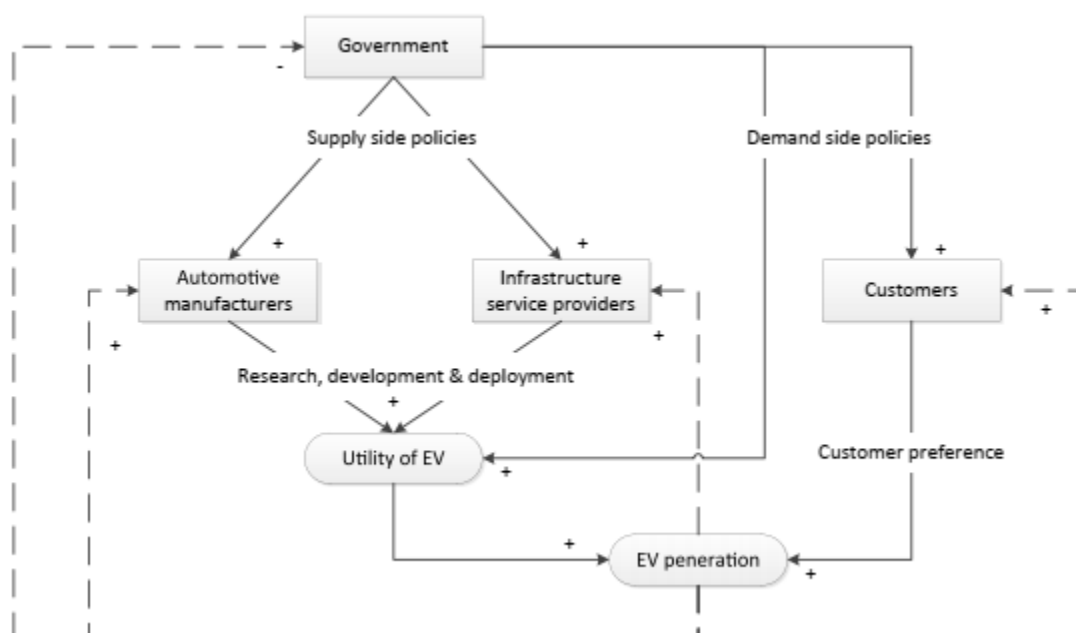


Figura 2. Comportamiento del gobierno y causalidad, tipos de políticas para vehículos eléctricos. Fuente: Wang et al., (2019)

Respecto a las políticas para promover los vehículos eléctricos enfocadas en la demanda. El costo es un elemento primordial cuando se trata de la decisión de comprar un auto nuevo. Las políticas del lado de la demanda, no sólo las políticas financieras sino también las políticas no financieras, pueden reducir el costo para mejorar la utilidad de los vehículos eléctricos. Se proporcionan subsidios de compra, exención de impuestos de compra y rescisión de restricción de compra para reducir el costo fijo. La exención del impuesto V&V, tarifa de estacionamiento, peajes de carretera, tarifa de seguro, tarifa de recarga pública reduce en gran medida el costo de funcionamiento, así como la restricción de conducción y el acceso al carril bus (Wang et al., 2019).

Entre otros factores, la expansión del mercado global de vehículos eléctricos se benefició de incentivos financieros como reembolsos directos y créditos fiscales o exención de impuestos. Los

subsidios directos pueden ser fijos (p. ej., Reino Unido), basados en el rango (China), basados en la capacidad de la batería (EE. UU.) o basados en el CO₂ (p. ej., Francia) (Li et al., 2021).

5.3 Sobre el funcionamiento de los vehículos eléctricos

Un vehículo eléctrico posee: un motor eléctrico, un banco de baterías y un cargador. También, un inversor DC/AC (normalmente dotados de motor de corriente alterna), un controlador y un convertor DC/DC (Salazar Marin, 2022) (Ver **Figura 3**).

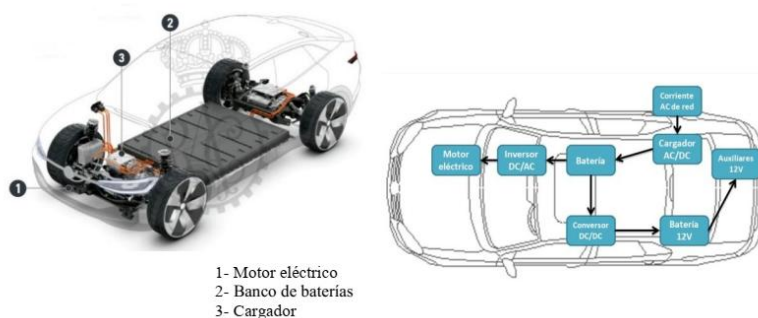


Figura 3. Vehículo eléctrico. Fuente: Salazar Marin (2022)

El sistema de propulsión de un vehículo eléctrico tiene uno o más motores eléctricos que almacenan la energía en un paquete de baterías recargables. Estas baterías se recargan de energía al conectar el vehículo al tomacorriente o con el sistema de autogeneración (frenado) (Salazar marin, 2022). Las baterías del vehículo eléctrico son reemplazadas cuando las capacidades bajan por debajo de un 70%-80% (Sharma et al., 2022).

5.4 El rol de las estaciones de carga

Una estación de carga centralizada (CCS) es una plataforma que puede proporcionar mantenimiento conveniente y carga de batería y entregar la batería al punto de intercambio de batería (BSP) para dar servicio a los vehículos eléctricos (Sharma et al., 2022). Punto de intercambio de batería (BSP) BSP se ha presentado recientemente en estudios para acortar el

tiempo que tarda un vehículo eléctrico en cargarse cambiando una batería gastada por una completamente cargada (Sharma et al., 2022).

5.5 Modelos de simulación enfocados en vehículos eléctricos

Gómez Vilchez & Jochem, (2019) desarrollaron un modelo de simulación enfocado en autos eléctricos aplicado a China, Francia, Alemania, India, Japón y Estados Unidos. De acuerdo con Gómez Vilchez & Jochem, (2019) la mayoría de los estudios pueden categorizarse de acuerdo con las políticas públicas o orientadas a la industria automotriz, es decir, esto involucra a los fabricantes de automóviles y el ciclo de vida de los vehículos. Se estimó la demanda futura de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se analizaron las emisiones asociadas al proceso de fabricación para concluir que este proceso debe reevaluarse para reducir los gases de efecto invernadero asociados al proceso.

Con respecto a la abolición de los subsidios EV, Wang et al., (2019) demostraron el resultado de la reducción en la adopción de EV dada la derogación de los subsidios EV. El modelo de simulación planteado utiliza dinámicas de sistemas e integra un enfoque basado en agentes. Evaluaron el efecto de reducir los incentivos para vehículos eléctricos, como subsidios y exenciones de impuestos, que tienen un alto impacto en comparación con la exención de estacionamiento o peajes.

La necesidad de una sustitución del sistema de propulsión eléctrica es un hecho; sin embargo, el uso de baterías contamina el medio ambiente. Álvarez Fernández et al., (2018) mostraron la necesidad de mejorar el procedimiento actual de medición de gases de efecto invernadero para un cálculo realista de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a los vehículos eléctricos de batería.

X. Li et al., (2020) estudiaron el sistema de reciclaje de baterías de EV en China, en particular un esquema de depósito-reembolso. Combinaron la teoría de juegos con la dinámica del sistema, la teoría de juegos se utiliza para construir un modelo financiero entre el fabricante de baterías de vehículos eléctricos y el minorista de vehículos eléctricos. Mientras que se utiliza un modelo de dinámica de sistemas para mostrar la interacción entre los agentes. Además, el esquema de

depósito-reembolso de recolección puede aumentar la recolección de baterías EV usadas, y el fondo genera un excedente.

Girard et al., (2019) estudian la conversión de transporte público (taxis y “colectivos”) a vehículos eléctricos utilizando un análisis de costos. También compararon diferentes estrategias para recargar estos vehículos eléctricos, por ejemplo, un vehículo eléctrico cargado por la red frente a un vehículo eléctrico cargado por un sistema fotovoltaico solar. Si este vehículo eléctrico se cargaba por la red, era tan contaminante como un vehículo ICE (Motor de Combustión Interna). Concluyen que las baterías deben usarse para reducir las emisiones y durante los períodos de baja radiación.

Un análisis cualitativo ha sido desarrollado por Singh et al., (2021) estudiaron el caso indio y la evolución global de los vehículos eléctricos. Tras un análisis de fortalezas, debilidades, oportunidades y desafíos (SWOC), concluyen que aspectos como la infraestructura de carga y la tecnología de baterías son el principal desafío para el desarrollo de vehículos eléctricos. Además, la producción en masa y los fabricantes deben ser apoyados por la administración.

Deuten et al., (2020) plantearon un modelo de agente de mercado de transición de tecnología de tren motriz (PTTMAM), aplicado a Noruega y los Países Bajos para reproducir el comportamiento histórico de 2010 a 2017. Consideran todas las políticas de vehículos eléctricos aplicadas durante ese período y concluyen que los fabricantes necesitan emisión metas para facilitar la transición. Propusieron un modelo de dinámica de sistemas donde interactúan los agentes del mercado: usuarios, fabricantes, proveedores de infraestructura y autoridades.

5.6 Normatividad en el mundo

Entre los países más preparados para la normatividad vehicular se encuentran (Ver **Tabla 1**). La madurez de los vehículos eléctricos se refiere al número de vehículos eléctricos registrados. Madurez de carga, es la cantidad de estaciones de carga disponibles.

Tabla 1. Países más aptos para la transición hacia los vehículos eléctricos. Fuente: EV readiness index 2022

NºRank	País	Puntaje total	Madurez del mercado de	Madurez de carga	Accesibilidad económica
--------	------	---------------	------------------------	------------------	-------------------------

			Vehículos Eléctricos		
1	Noruega	42	18	8	16
2	Holanda	37	15	10	12
3	Reino Unido	35	13	6	16
3	Austria	35	13	8	14
4	Suecia	34	15	7	12
5	Bélgica	31	12	6	13
6	Finlandia	30	12	6	12
7	Alemania	29	13	3	13
7	Luxemburgo	29	13	5	11
8	Irlanda	28	13	2	13

En la **Tabla 2** se aprecia las políticas, metas y ambiciones de Noruega, el país con mayor despliegue de vehículos eléctricos y por lo tanto más apto para la transición hacia los vehículos eléctricos.

Tabla 2 Tipo de política en Noruega

País/Economía	Nivel	Tipo de política	Medidas políticas y metas	Año
Noruega	Nacional	Legislación	Noruega introducirá el impuesto al valor agregado en las compras de vehículos eléctricos superiores a NOK 500 000 a partir de 2023; anteriormente, todas las ventas de vehículos eléctricos estaban exentas del impuesto al valor agregado.	2023
Noruega	Multi-nacional	Ambición	Declaración de la COP26: trabajar para que todas las ventas de automóviles y furgonetas nuevas sean cero emisiones	2022

			a nivel mundial para 2040, o a más tardar para 2035 en los principales mercados.	
Noruega	Multi-nacional	Ambición	El objetivo del compromiso es adquisiciones de LDV 100 % sin emisiones de flotas propiedad y operadas por el gobierno civil, con aspiraciones de adquisiciones de M/HDV 100 % sin emisiones, a más tardar en 2035. Noruega apunta específicamente a que todos los LDV nuevos sean ZEV, y que todos los autobuses urbanos nuevos sean ZEV o biogás para 2025, así como el 75% de las nuevas camionetas pesadas y autobuses de larga distancia, y el 50% de los camiones nuevos sean ZEV para 2030.	2022
Noruega	Meta	Meta	Todas las ventas de LDV nuevos serán de cero emisiones para 2025.	2021

Fuente: IEA (2022)

Otras políticas más agresivas han sido implementadas, por ejemplo, el gobierno puede pagar a las personas un incentivo a la inversión, tal es el caso de Alemania que pago entre 2008 y 2009, 2500 euros por vehículo subsidiando 600000 vehículos. Italia implemento una política similar pagando entre 1500 euros y 3000 euros. Francia pagaba 1000 euros y subsidio 400000 vehículo, en el caso de Reino Unido el gobierno y las fábricas de manufactura subsidiaban 2000 libras. Por último, Estados Unidos subsidiaba entre 3500 y 4500 USD según el consumo del vehículo (Jimenez et al., 2016a). Incluso algunos países ofrecen dinero para desechar los vehículos eléctricos convencionales (Zhu et al., 2021; James et al., 2023).

5.7 Normatividad en Colombia

Colombia tiene como meta reducir el 22 % de la intensidad de la energía, las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20 % para el año 2030. Y tener en circulación 600 000 vehículos eléctricos para el mismo año (DNP, como se citó en Máñez et al., 2019)

La Ley nro. 1964 de 2019 establece **incentivos a los propietarios de vehículos eléctricos**, en particular tasas de impuestos vehiculares, reducciones en el Seguro Obligatorio de Accidentes de Tráfico (SOAT) y exenciones de restricciones de tráfico es decir **pico y placa** (Salazar Marin, 2022).

Específicamente, la **tasa impositiva** aplicable a los vehículos eléctricos debe ser menor al 1 % del valor comercial del vehículo (Salazar Marin, 2022).

Además, se aplica el **descuento temporal** sobre la revisión técnico-mecánica. Un descuento del 10% a las primas de seguro. Y asignación de un porcentaje mínimo de parqueaderos preferenciales (Salazar Marin, 2022). Ver **Figura 4** con clasificación de incentivos.

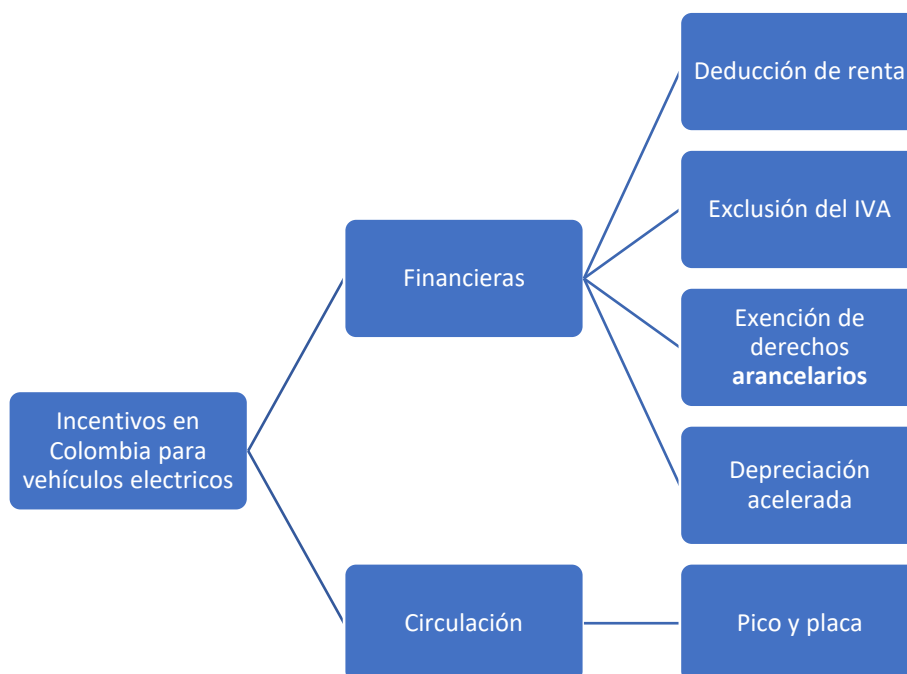


Figura 4. Incentivos para los vehículos eléctricos en Colombia. Fuente: UPME (2022).

En cuanto a la infraestructura de recarga: Al menos cinco centros de recarga rápida deben garantizar los municipios en el territorio, en un plazo de tres años (Salazar Marin, 2022). Las iniciativas de puntos de carga son de inversión privada y no del gobierno lo cual puede desmotivar a los compradores, empresas como Enel codensa, EPM y Celsia en ciudades como Bogotá y Medellín son las más destacadas (Torres-Pamplona et al., 2021).

Estrategia Nacional de Movilidad. Cuyo objetivo es revisar y establecer los mecanismos económicos y de mercado necesarios al establecer lineamientos técnicos y promover las tecnologías. Decreto 2051 indica la importación de un número ilimitado de vehículos totalmente eléctricos (Salazar Marin, 2022). Entre las marcas de vehículos más vendidas en el mundo están: Volvo, Byd, Bmw, Saic, Tesla. Vehículos eléctricos más vendidos en Colombia: Renault Twizy, BMW i3 , Nissan Leaf, Renault Zoe, BYD E5 (ver **Tabla 3**).

En esta investigación se modelará a partir de los datos del vehículo eléctrico más vendido en Colombia con características similares a un vehículo convencional que podría tener una familia. Es decir, el BYD.

Tabla 3. Vehículos eléctricos más vendidos en Colombia.

Puesto	Marca	Matrículas	Variación %
1	BYD Yuan / Yuan Pro	231	138,4%
2	Zhidou D2S	213	110,9%
3	MINI Cooper SE	152	68.9%
4	Dongfeng Rich 6 EV	127	504.8%
5	Audi e-tron	109	5350%
6	BMW iX3	96	
7	BYD Yuan Plus	88	
8	BYD Dolphin	82	
9	Renault Zoe	78	
10	JAC E10X	62	

Fuente: Tomado de Elcarrocolombiano (2022).

5.7.1 Meta de vehículos eléctricos en Colombia

En el Plan Nacional de Desarrollo se definió como meta del sector eléctrico 6600 vehículos eléctricos para el 2022 y 600000 para el 2030 (Torres-Pamplona et al., 2021).

6. METODOLOGÍA

En este documento se desarrollará un modelo de simulación aplicando el método de dinámica de sistemas. La dinámica de sistemas es un método de que se enfoca en entender la complejidad de los sistemas, es decir como las estructuras o variables claves se interrelacionan entre sí generando patrones de comportamiento en el largo plazo (Sterman, 2002). Es un método muy usado para entender la complejidad de los sistemas, es decir, retroalimentaciones, relaciones no lineales entre las variables y retardos (Dyner & Larsen, 2001). Básicamente la dinámica de sistemas consiste en plantear un conjunto de ecuaciones diferenciales e introducirlas en un software de simulación, también es muy útil como laboratorio de aprendizaje para el diseño de políticas públicas (Sterman, 2002). La metodología es de tipo cuantitativo porque involucra la medición de magnitudes, el modelo será alimentado mediante información secundaria de fuentes fiables de información, por lo tanto, no es experimental sino teórico, además es de tipo analítica y descriptiva (Sampieri, 2018). Se realizará tomando como caso de estudio el caso colombiano en el sector residencial, tomando como tiempo de simulación hasta el año 2050.

Para desarrollar un modelo con dinámica de sistemas se deben seguir las siguientes etapas: i) articulación del problema, ii) hipótesis dinámica, iii) formulación, iv) prueba, v) formulación y evaluación de políticas (Sterman, 2002) (Ver **Figura 5**). En la primera etapa, la articulación del problema es importante identificar los límites del problema. En la segunda etapa, se debe plantear una estructura que comprenda bucles de retroalimentación y retrasos y represente el problema. La tercera etapa se refiere a la formulación de ecuaciones matemáticas que deben probarse en la cuarta etapa para garantizar resultados precisos. En la etapa final, el análisis de políticas puede ayudar a desarrollar estrategias que mejorarán el desempeño del sistema.



Figura 5. Metodología de Dinámica de Sistemas. Tomado de Sterman (2002).

6.1 Análisis de restricciones

Riesgos: ¿Qué puede salir mal y que se puede hacer al respecto?

Algunos datos del modelo posiblemente no serán encontrados para Colombia por la escasa difusión de los vehículos eléctricos en el país. Dado que estos datos resultan del análisis de datos históricos, se recurrirá a la revisión literaria para encontrar dichos datos. Posiblemente a artículos científicos donde se hallan analizado los datos para diferentes países. Siempre y cuando la información pueda ser contextualizada para Colombia.

Alcance: ¿Cuál es exactamente el resultado esperado?

Se espera identificar la política más efectiva para lograr el despliegue de vehículos eléctricos en el sector residencial colombiano. Evaluando las políticas actuales que se puedan y proponiendo otras. En este tipo de simulación el despliegue de vehículos eléctricos debe formar una curva en forma de “s”.

Tiempo: ¿En qué plazo debe completarse el proyecto?

El proyecto tiene la duración de un semestre, aunque para obtener un paper publicable en una revista de alto impacto podría requerirse un poco más de tiempo.

Coste y recursos: ¿Cuál es el presupuesto disponible? ¿Quién y qué se requiere para realizar el trabajo?

Se trabajará con la versión gratuita de vensim, la cual es una versión académica. Descargable en la siguiente dirección:

<https://vensim.com/free-download/>

En cuanto a los costes de mano de obra y equipo. Se dispone del tiempo del autor de este documento y la simulación no consume memoria del computador.

Calidad: ¿Qué tan cerca está el resultado de las expectativas?

A continuación, se muestra la parte central del modelo. Donde se aprecia la demanda de los vehículos y como esta puede traducirse en demanda por vehículos eléctricos o vehículos convencionales.

6.2 Datos

A continuación en la **Tabla 4**, se presentan las principales variables y su fuente.

Tabla 4. Datos

Variable	Fuente
Capacidad de Km a recorrer con batería	Zhang, C., Yang, F., Ke, X., Liu, Z., & Yuan, C. (2019). Predictive modeling of energy consumption and greenhouse gas emissions from autonomous electric vehicle operations. <i>Applied Energy</i> , 254, 113597.
Parámetro Conocimiento	Yang, H., Yang, S., Xu, Y., Cao, E., Lai, M., & Dong, Z. (2015). Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by

de la tecnología	learnable partheno-genetic algorithm. IEEE Transactions on smart grid, 6(2), 657-666.
Costos Vehículos eléctricos	Salazar Marin (2022)
Atractividad económica Atractividad del vehículo eléctrico rango de manejo Atractividad del tiempo de carga Parámetro de infraestructura	Setiawan, A. D., Zahari, T. N., Purba, F. J., Moeis, A. O., & Hidayatno, A. (2022). Investigating policies on increasing the adoption of electric vehicles in Indonesia. Journal of Cleaner Production, 380, 135097. Atractividad del vehículo eléctrico= $0.251 * \text{Atractividad económica del vehículo e.} + 0.23 * \text{Atractividad rango de manejo vehículo e.} + 0.253 * \text{Infraestructura}$
Número de vehículos eléctricos en Colombia por tipo	Mintransporte (2022) 2422 automóviles eléctricos en el país en 2022
Estaciones de carga o electrolinerías	Elcarrocolombiano (2022) 210 puntos de carga a 2022
Demás datos relativos al funcionamiento de vehículos eléctricos	Salazar Marin (2022)

Demanda de electricidad	UPME (2021)
Tarifas de electricidad	SUI (2022)
Estaciones de carga iniciales	Larepublica(2022)
Demanda de vehículos	desecho de vehículos eléctricos+desecho vehículos convencionales+vehículos totales*Tasa de crecimiento vehículos
Tasa de crecimiento de vehículos	Se tiene en cuenta el crecimiento poblacional y se espera que la población deje de crecer entre el 2040 y 2050 Fuente: Dane
Tasa de aprendizaje de la batería	Safari, M. (2018). Battery electric vehicles: Looking behind to move forward. Energy Policy, 115, 54-65. 9 ± 2% y 15 ± 1% para el precio y costos de un vehículo 100% eléctrico.
Parque automotor en Colombia	2422 vehículos particulares eléctricos en Colombia. 6978694 vehículos convencionales. En 2020 había 16042336 vehículos totales, el 38% son vehículos livianos 6096087. Una tasa de crecimiento de compuesto de 4.61% al año Fuente: Carroya(2022; Larepublica, 2023; Runt, 2032).
Supuesto	El precio del vehículo convencional se mantiene constante

En cuanto al análisis de costos, los vehículos eléctricos son 56% más económicos que uno de gasolina, 54% más baratos que uno de diesel (Larepublica, 2021). Esto se debe al menor costo de mantenimiento.

La demanda de electricidad del sector residencial representa el 40% (Jimenez et al., 2016b). La demanda de electricidad crece a una tasa compuesta del 2.47% al año.

Tabla 5. Demanda de electricidad. Fuente: UPME (2021)

Año	Demanda de electricidad GWh-año	Demanda de electricidad residencial GWh-año
2021	72824	29129,6
2022	75251	30100,4
2023	76920	30768
2024	78838	31535,2
2025	80776	32310,4
2026	82760	33104
2027	84841	33936,4
2028	86895	34758
2029	88900	35560
2030	90991	36396,4
2031	93302	37320,8
2032	95519	38207,6
2033	97747	39098,8
2034	100252	40100,8
2035	102668	41067,2
2036	105102	42040,8

Según la **Tabla 6**, la tasa de crecimiento compuesta de la tarifa de electricidad del 5.13% por año.

Tabla 6. Tarifa de electricidad media en el país. Fuente: SUI (2023) y cálculos propios.

Año	Tarifa
2013	346,03
2020	511,54
2023	613,27

A continuación, se presenta la **Tabla 7** con las principales variables endógenas y exógenas.

Tabla 7. Tipos de variables

VARIABLES ENDÓGENAS	VARIABLES EXÓGENAS
Adoptadores potenciales de vehículos eléctricos potenciales	Precio de electricidad
Adoptadores de vehículos eléctricos	Demanda de electricidad
Adoptadores de vehículos convencionales en uso	Tasa de crecimiento de vehículos
Crecimiento de estaciones de carga	
Atractividad relativa de vehículos eléctricos	
Atractividad económica	

Algunos supuestos

Se asume el porcentaje de crecimiento de la tarifa de electricidad.

Se asume que la tarifa de electricidad media del país pagada por el sector residencial crece en un 5.2% (tasa de crecimiento compuesta)

Se estudian los vehículos 100% eléctrico de carga ligera, no se considera otro tipo de vehículo eléctrico.

Se asume que la batería del vehículo eléctrico dura 20 años.

En la **Tabla 8** se compararon un Mazda CX30 2023 y un BYD 2023, ambos vehículos son comparables y corresponden a los datos de entrada para calcular el VPN de cada uno de ellos. Donde el tiempo de evaluación de 10 años, el valor presente neto del vehículo convencional fue \$ 250.261.903, mientras el del vehículo eléctrico fue \$ 222.366.751.

Tabla 8. Comparación de vehículo eléctrico y vehículo convencional

	Mazda cx30 2023	BYD Dolphin 2023

Costo compra Cc	\$ 145.750.000	\$ 161.900.000
kilometros recorridos Kmt	24000 km	
Rendimiento del combustible (ciclo mixto ciudad carretera) Km galón o Km/KWh	40 km/galón	9.5 km/KWh
Autonomía	530 Km	405 km
DTF	12,00%	
Precio combustible	\$ 12.173	\$ 851/KWh

Fuente: BYD (2023) y Mazda (2023)

A continuación, se presentan las ecuaciones usadas para el cálculo del valor presente neto de cada tecnología.

$$VPN = \text{Costo de compra} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{Costo fijo}(t) + \text{Costo de operación y mantenimiento}(t)}{(1+i)^t} \quad (1)$$

La ecuación de costos fijos.

$$\text{Costo fijo}(t) = \text{Impuesto de rodamiento}(t) + \text{soat}(t) + \text{seguro}(t) \quad (2)$$

A continuación, la ecuación del costo variable de un vehículo eléctrico se muestra a continuación.

$$\text{Costo variable}(t) = \text{Km promedio por año por vehículo} * \text{precio de electricidad}(t) * \text{KWh requeridos batería/Capacidad de km a recorrer} \quad (3)$$

La ecuación del costo variable de un vehículo convencional se muestra a continuación.

$$\text{Costo variable}(t) = \text{Litros de gasolina necesarios para recorres 1 km} * \text{precio litro de gasolina} * \text{km promedio por año por vehículo} \quad (4)$$

6.3 Proceso de validación del modelo

Los modelos de Dinámica de Sistemas no conducen a la verdad absoluta (Sterman, 2002), dado que estos modelos son una representación limitada del mundo real. Los modelos de Dinámica de Sistemas están diseñados para alcanzar un propósito particular, por lo que el proceso de validación

debe realizarse con respecto al cumplimiento del objetivo del modelo. En la literatura se han propuesto diferentes esquemas para validar modelos de Dinámica de Sistemas (Barlas, 1996; Forrester & Senge, 1996; Sterman, 2002), pero todos estos esquemas tienen el mismo propósito el cuál es validar la estructura del modelo y comportamiento del modelo. Para este documento únicamente se validará la estructura del modelo según lo definido por Sterman (2002)

Tabla 9. Proceso de validación del problema. Fuente: Sterman (2002)

Prueba	Definición
Límites de estructura	¿Cuáles son las variables endógenas? ¿Cuáles son las variables exógenas del modelo? Las variables endógenas del modelo describen el problema de investigación.
Evaluación de estructura	¿La estructura del modelo coincide con el conocimiento del sistema real? ¿Es el nivel de agregación el adecuado? Cada ecuación es verificada en conformidad con las leyes físicas.
Consistencia dimensional	No sumar “peras” con “manzanas”.
Evaluación de parametros	Cada parámetro coincide con un concepto del mundo real.
Error de integración	Vensim dispone de dos métodos de integración. RK4 y Euler, los resultados al correr el modelo con estos dos métodos deberían ser similares.

Fuente: Basado en Sterman (2002)

7. MODELO DE SIMULACIÓN

En esta sección se explica el modelo de simulación y sus respectivas ecuaciones. En la sección 9.1 se presenta el modelo de flujos y niveles, donde un nivel es una variable que se acumula en el tiempo y un flujo una tasa de cambio (Sterman, 2002). Los niveles se representan con rectángulos y los flujos con llaves.

7.1 Modelo de flujos y niveles

La atraktividad de un vehículo eléctrico se calcula según Setiwan (2022). Siendo una función de la atraktividad económica, el tiempo de carga, la autonomía y la cantidad de estaciones de carga.

$$(5) \quad \textit{Atraktividad EV} = 0.251 * \textit{Atraktividad economica de vehículos eléctricos} + \textit{Atraktividad autonomia} * 0.266 + \textit{Atraktividad estaciones de carga} * 0.253 + \textit{Atraktividad tiempo de carga} * 0.23$$

[sin unidades]

$$(6) \quad \textit{Atraktividad economica de vehículos eléctricos} = (0.5 * (\textit{Costos totales vehículos convencionales} - \textit{Costos totales vehículos eléctricos}) / (\textit{max}(\textit{Costos totales vehículos eléctricos}, \textit{Costos totales vehículos convencionales}))) + 0.5 \quad [\textit{sin unidades}]$$

$$(7) \quad \textit{Atraktividad autonomia} = 0.5 * ((\textit{Ev autonomia} - \textit{Autonomia vehículo convencional}) / \textit{max}(\textit{Autonomia vehículo convencional}, \textit{Ev autonomia})) + 0.5$$

[sin unidades]

$$(8) \quad \textit{Atraktividad estaciones de carga} = 0.5 * (\textit{Estaciones de carga} - \textit{Estaciones de gasolina}) / \textit{max}(\textit{Estaciones de carga}, \textit{Estaciones de gasolina}) + 0.5$$

[sin unidades]

$$(9) \text{ Atractividad tiempo de carga} = 0.5 * ((\text{Tiempo de carga vehículo convencional} - \text{Ev tiempo de carga}) / \max(\text{Ev tiempo de carga}, \text{Tiempo de carga vehículo convencional})) + 0.5$$

[sin unidades]

$$(10) \text{ Atractividad de vehículos convencionales} = 1 - \text{Atractividad EV}$$

[sin unidades]

$$(11) \text{ Autonomia vehículo convencional} = 547 \text{ [km]}$$

$$(12) \frac{d \text{ EV autonomia}}{dt} = \text{EV mejora continua [km]}$$

$$(13) \text{ EV mejora autonomia} = \text{Ev autonomia} * \text{EV parametro de mejora}$$

$$(14) \text{ EV parametro de mejora} = ((772/2.11)^{(1/20)}) - 1$$

$$(15) \frac{d \text{ EV tiempo de carga}}{dt} = -\text{reduccion tiempo de carga [min]}$$

$$(16) \frac{d \text{ Precio vehículo eléctrico}}{dt} = -\text{reduccion precio vehículo eléctrico}$$

$$(17) \text{ reduccion precio vehículo eléctrico} = - \text{Tasa reduccion precio EV} * \text{Precio vehículo eléctrico}$$

(18) $\text{reduccion tiempo de carga} = \text{Ev tiempo de carga} * \text{Tasa de mejora reduccion tiempo de carga}$

(19) $\text{Tasa de mejora reduccion tiempo de carga} = ((20/30)^{(1/10)} - 1)$

(20) $\text{Tiempo de carga vehiculo convencional} = 5$ [min]

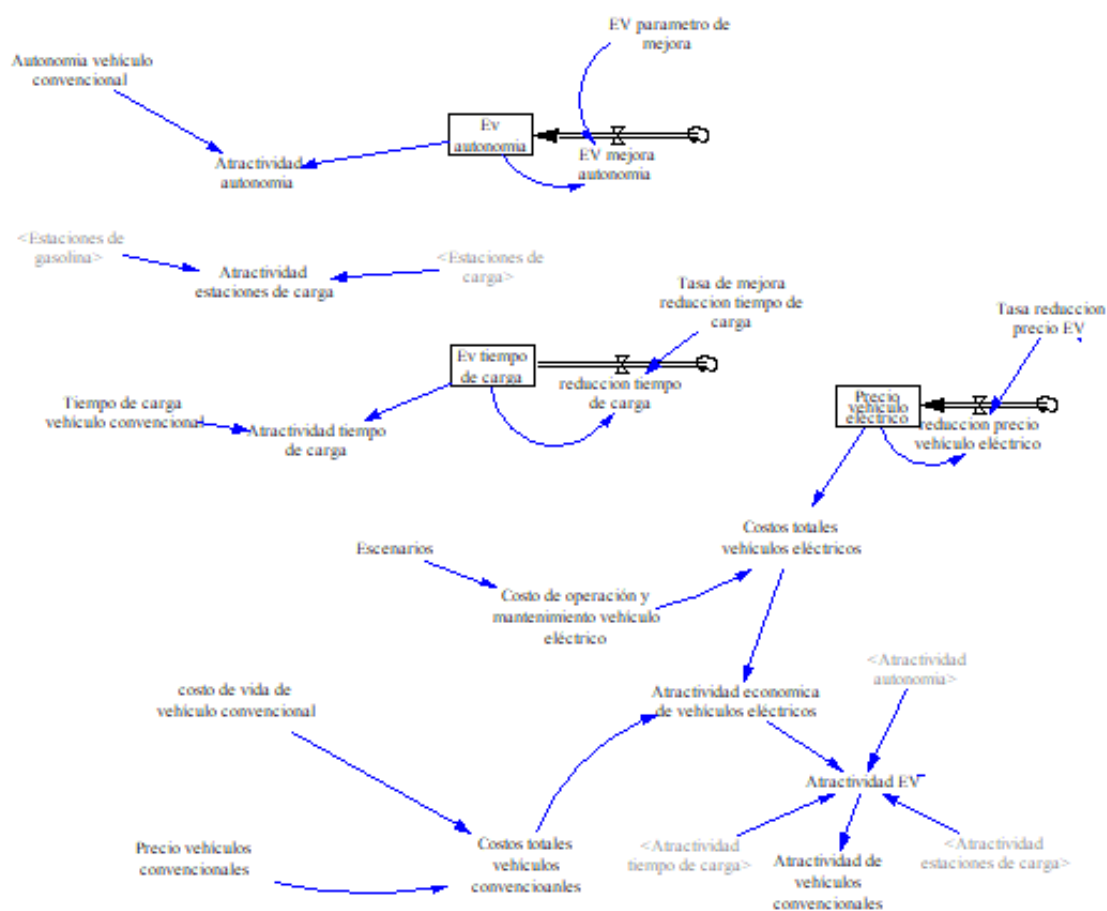


Figura 7. Atraktividad económica de los vehículos eléctricos. Fuente: Elaboración propia.

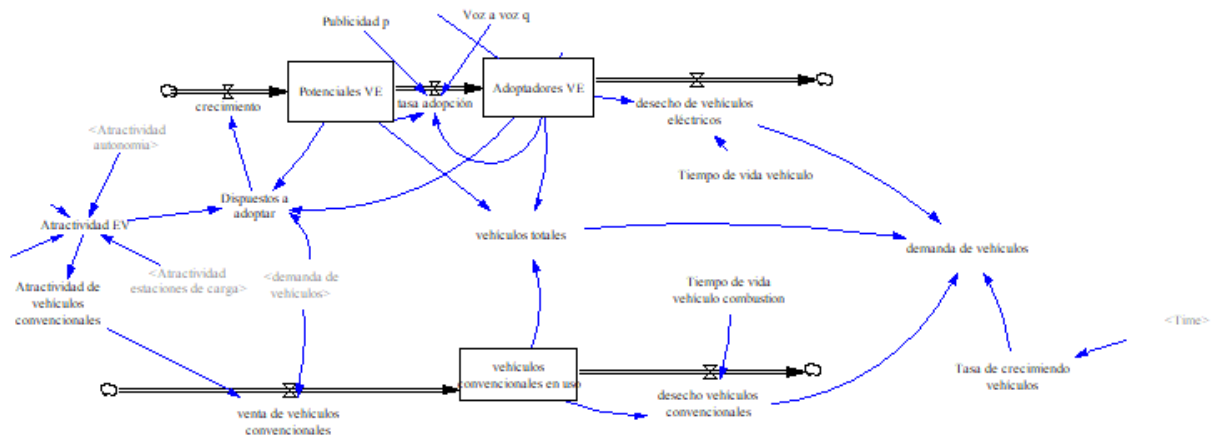


Figura 8. Adoptadores vehículos eléctricos y vehículos convencionales en uso. Fuente:
Elaboración propia

$$(21) \quad \frac{d \text{ Adoptadores VE}}{dt} = \text{tasa adopcion} - \text{desecho vehículos eléctricos}$$

[carros]

$$(22) \quad \text{demanda de vehículos} = \text{desecho de vehículos eléctricos} + \text{desecho vehículos convencionales} + \text{vehículos totales} * \text{Tasa de creciendo vehículos}$$

[carros]

$$(23) \quad \text{desecho de vehículos eléctricos} = \text{Adoptadores VE} / \text{Tiempo de vida vehículo}$$

[carros/año]

$$(24) \quad \text{desecho vehículos convencionales} = \text{vehículos convencionales en uso} / \text{Tiempo de vida vehículo combustion}$$

[carros/año]

$$(25) \quad \text{Dispuestos a adoptar} = \text{demanda de vehículos} * \text{Atractividad EV} - \text{Potenciales VE} - \text{Adoptadores VE}$$

[adoptadores]

$$(26) \frac{d \text{Potenciales VE}}{dt} = \text{crecimiento} - \text{tasa adopcion}$$

[adoptadores]

$$(27) \text{ Publicidad } p = 1.5e - 05$$

[sin unidades]

$$(28) \text{ Voz a voz } q = 0.387$$

[sin unidades]

$$(29) \text{ tasa adopción} =$$

$$\text{Publicidad } p * (\text{Potenciales VE} - \text{Adoptadores VE}) + \text{Voz a voz } q / \text{Potenciales VE} \\ * \text{Adoptadores VE} \\ * (\text{Potenciales VE} - \text{Adoptadores VE})$$

[adoptadores/año]

$$(30) \frac{d \text{vehículos convencionales}}{dt} = \text{venta de vehículos convencionales} -$$

desecho de vehículos convencionales

[carros/año]

$$(31) \text{ vehículos totales} =$$

$$\text{vehículos convencionales en uso} + \text{Adoptadores VE} + \text{Potenciales VE}$$

[carros]

$$(32) \text{ venta de vehículos convencionales} =$$

$$\text{demanda de vehículos} * \text{Atractividad de vehículos convencionales}$$

[carros]

$$(33) \text{ Tiempo de vida vehículo} = 8.3 \text{ [años]}$$

(34) *Tiempo de vida vehículo combustion* = 15 [años]

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la **Figura 9**, se plantearon los siguientes escenarios: escenario 1, escenario 2, escenario 3 y escenario 4. A continuación, se describe el número del escenario con su respectiva explicación.

1 ->No incentivo: No se aplica ningún incentivo para los vehículos eléctricos

2 ->Incentivo 10% soat: Se aplica un descuento del 10% en el soat

3 ->Incentivo impuestos: Sin impuestos

4 ->Incentivos soat + impuestos: Con descuento de soat y sin impuestos.

Como se puede observar en la **Figura 9**, los incentivos dirigidos a la reducción de impuestos aplicados actualmente no tienen efecto sobre el despliegue de vehículos eléctricos. No obstante, bajo todos los escenarios la meta de vehículos eléctricos es alcanzada (600000 para el 2030).

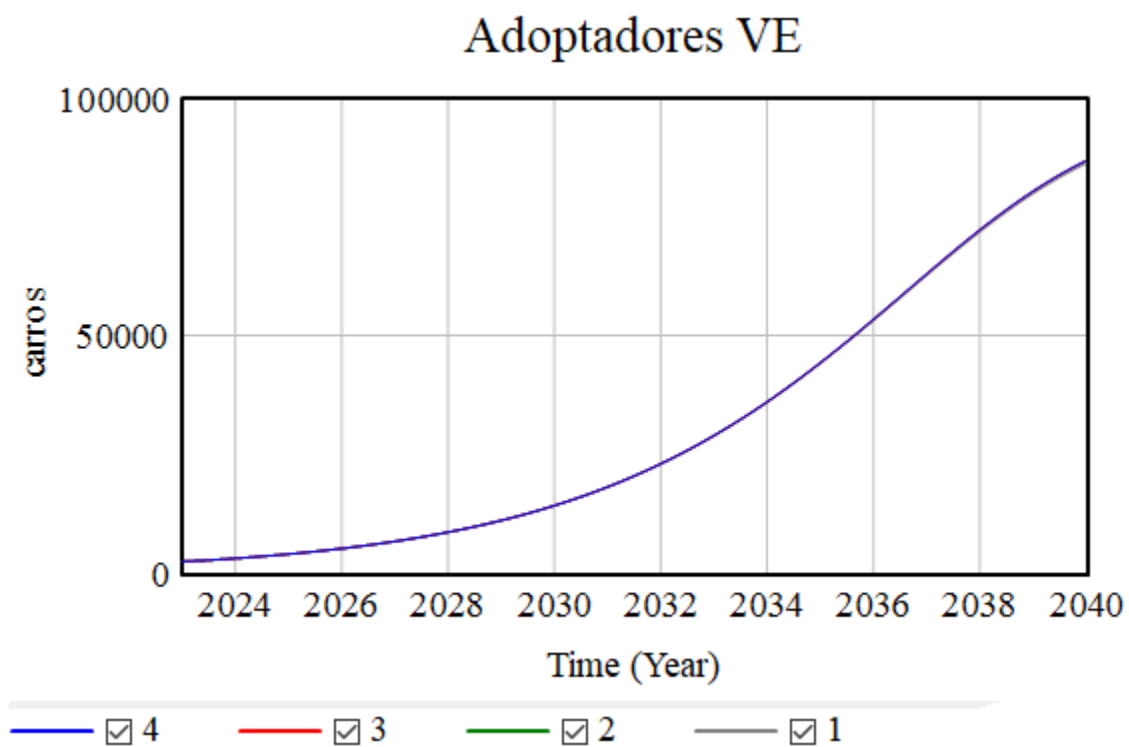
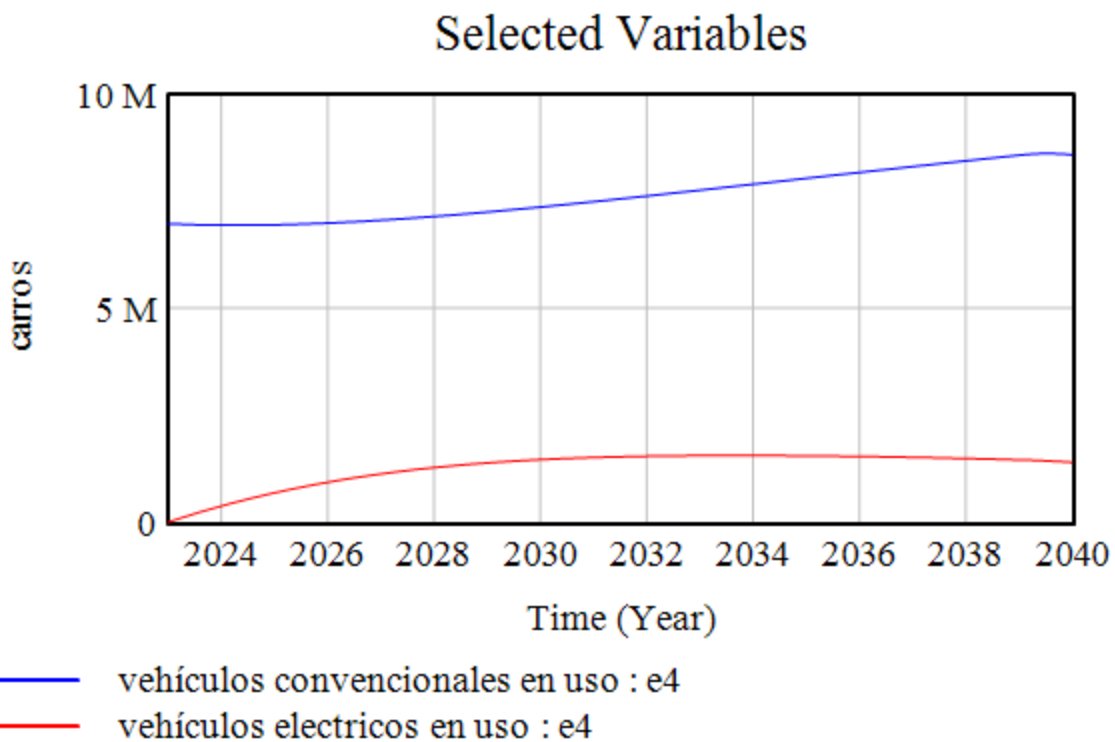


Figura 9. Adoptadores de vehículos eléctricos [carros]

En la **Figura 10**, se compara el despliegue de vehículos convencionales y eléctricos. Los vehículos convencionales siguen siendo mayoría. En este sentido, las medidas de transición deberían ser más agresivas.



En la **Figura 11** se da un incentivo de 12 millones a los consumidores que adquieran vehículos eléctricos (escenario 5). En ese caso, la penetración de esta tecnología es ligeramente superior respecto al escenario 4 (sin impuestos ni soat).

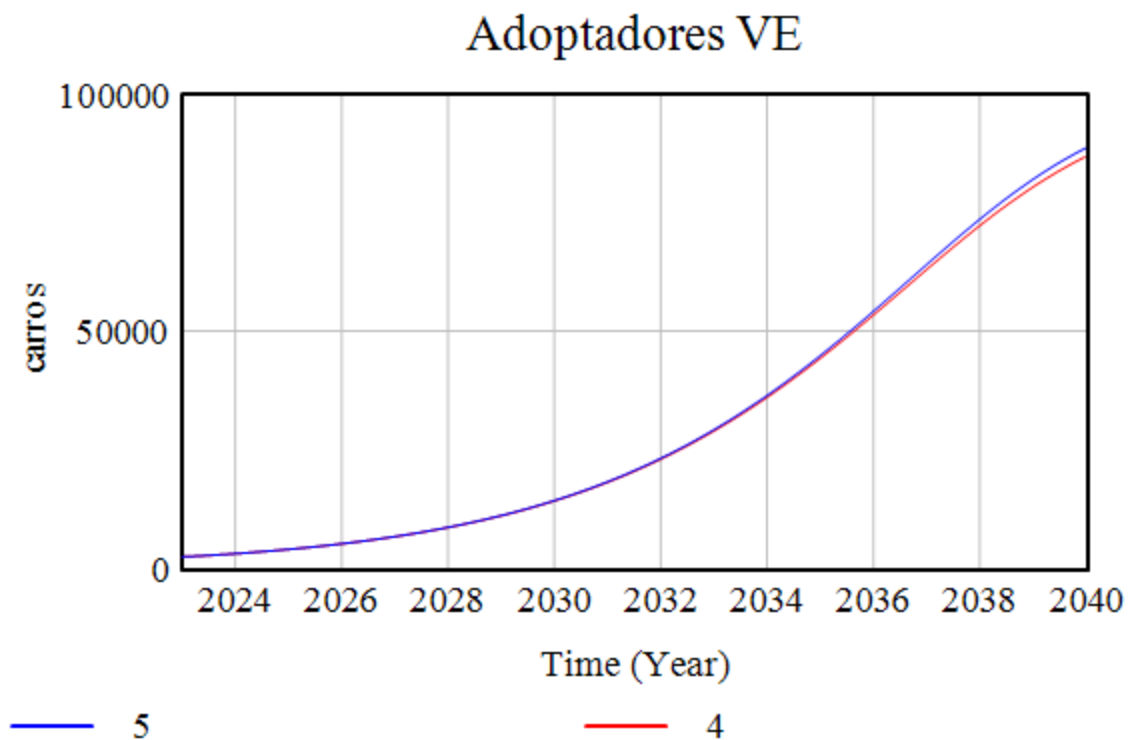


Figura 11. Incentivo de compra de vehículos eléctricos de 12 millones.

En la **Figura 12** se paga a los que tienen auto convencional un incentivo de 12 millones por cambiar a eléctrico (escenario 6). En ese caso, la penetración de esta tecnología es ligeramente superior.

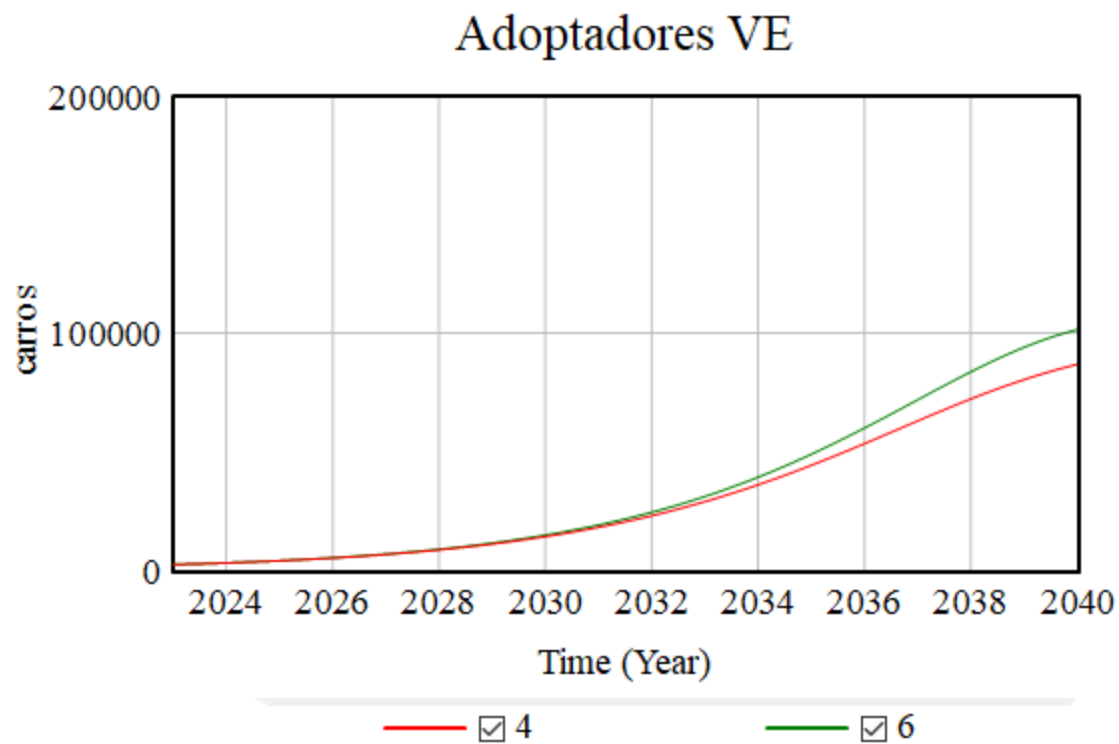


Figura 11. Incentivo de compra de vehículos eléctricos reciclando convencionales.

En la **Figura 13** se informa a los consumidores sobre las ventajas de los vehículos eléctricos (escenario 7). En ese caso, la penetración de esta tecnología es acelerada respecto al escenario 4.

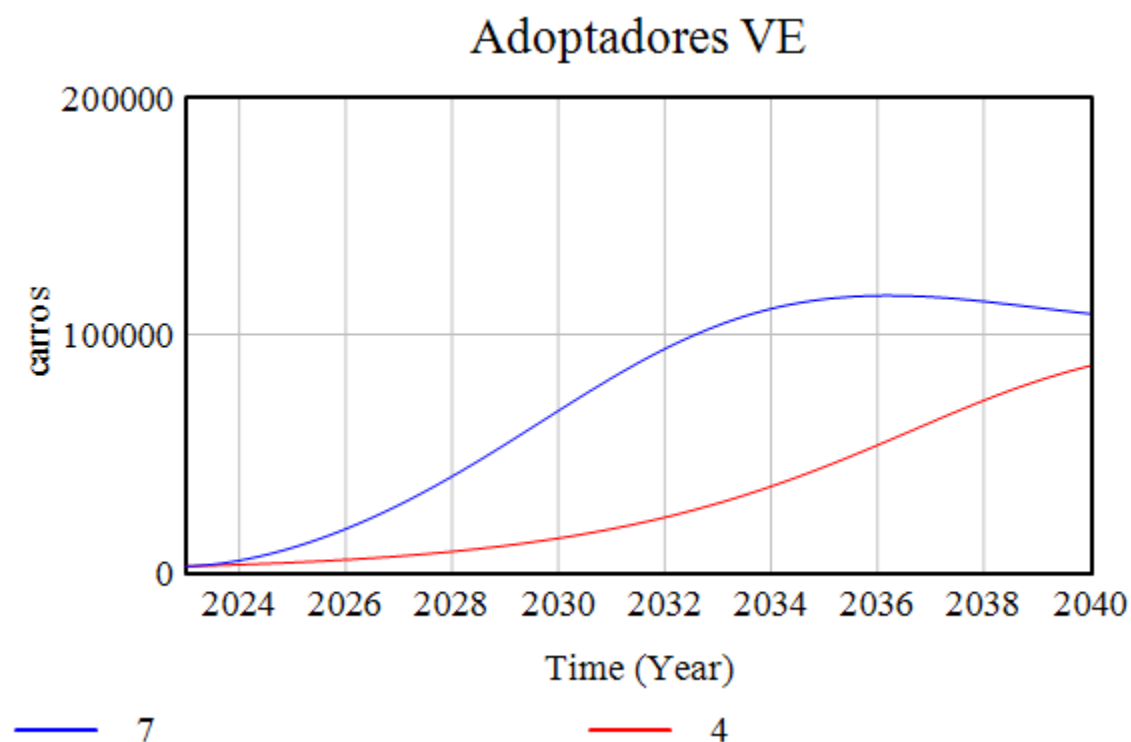


Figura 12. Estrategia de comunicación e información enfocada a los consumidores

9. VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

A continuación, en la **Tabla 10** se presenta el análisis correspondiente a las pruebas de validación.

Tabla 10. Pruebas de Validación

Prueba	Definición	Análisis
Límites de estructura	¿Cuáles son las variables endógenas? ¿Cuáles son las	Variables exógenas: costos de compra, operación y mantenimiento

	variables exógenas del modelo? Las variables endógenas del modelo describen el problema de investigación.	Variables endógenas: atraktividad de los vehículos eléctricos, atraktividad de los vehículos convencionales, demanda de vehículos, demanda de vehículos eléctricos.
Evaluación de estructura	¿La estructura del modelo coincide con el conocimiento del sistema real? ¿Es el nivel de agregación el adecuado? Cada ecuación es verificada en conformidad con las leyes físicas.	Se puede observar en la sección de flujos y niveles 9.2 Todas las ecuaciones tienen sentido físico y lógico.
Consistencia dimensional	No sumar “peras” con “manzanas”.	Se puede observar al identificar las unidades de las ecuaciones en la sección 9.1
Evaluación de parámetros	Cada parámetro coincide con un concepto del mundo real.	Se puede observar en las ecuaciones sección 9.2.
Error de integración	Vensim dispone de dos métodos de integración. RK4 y Euler, los resultados al correr el modelo con estos dos métodos deberían ser similares.	Se uso de métodos de integración Euler y Rk4, al correr el modelo con ambos métodos el resultado no varía sustancialmente los resultados.

10. CONCLUSIONES

Se concluye que las políticas dirigidas a reducción de impuestos y del SOAT no son efectivas para promover el despliegue de vehículos eléctricos en el sector residencial colombiano.

Políticas más agresivas como el otorgamiento de incentivos por invertir en vehículos eléctricos, o incentivos para dejar de utilizar un vehículo convencional podrían ser un poco más efectivas. La mejor política podría ser de comunicación e información a los no adoptadores sobre las ventajas de largo plazo de los vehículos eléctricos sobre los vehículos convencionales.

Esta investigación identifico el marco regulatorio disponible en Colombia para el desarrollo de los vehículos eléctricos, esto fue además insumo para caracterizar la oferta y demanda de vehículos eléctricos desde el punto de vista de literatura disponible. Posteriormente, se recolectaron y procesaron los datos de simulación necesarios para correr el modelo. Se construyo el modelo de simulación en vensim, software gratuito para esto el autor se baso en la literatura existente. Se valido el modelo y se concluyó entorno al mejor escenario posible para Colombia y el desarrollo de vehículos eléctricos.

Tabla 11. Cumplimiento de objetivos de investigación

Objetivos	¿Dónde se cumplió?
Identificar el marco regulatorio disponible para el desarrollo de vehículos eléctricos en Colombia.	Sección 5.7
Caracterizar la oferta y demanda de vehículos eléctricos en Colombia limitando el problema de investigación.	Sección 5.7 Sección 6.2
Recolectar los datos de simulación necesarios para correr el modelo.	Sección 6.2
Construir el modelo de simulación a través del planteamiento de ecuaciones y el uso de software vensim.	Sección 9.1

Validar el comportamiento y estructura del modelo de simulación según protocolos de validación.	Sección 11
Analizar escenarios de políticas para promover su despliegue en el mercado eléctrico, en particular pico y placa y exención de impuestos IVA.	Sección 10

11. REFERENCIAS

Álvarez Fernández, R., Caraballo, S. C., Cilleruelo, F. B., & Lozano, J. A. (2018). Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms. *Renewable and sustainable energy reviews*, 81, 655-668.

Aymeric, G., & François, S. (2017). Case study for Chile: The electric vehicle penetration in Chile. In *Electric Vehicles: Prospects and Challenges* (pp. 245-285). Elsevier.

Carroya (2022). Fuente: <https://www.carroya.com/noticias/noticias-y-lanzamientos/el-parque-automotor-en-colombia-es-cada-vez-mas-viejo-5077>

Deuten, S., Vilchez, J. J. G., & Thiel, C. (2020). Analysis and testing of electric car incentive scenarios in the Netherlands and Norway. *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119847.

Elcarrocolombiano (2022). Fuente: <https://www.elcarrocolombiano.com/industria/10-carros-electricos-mas-vendidos-de-colombia-en-2022/>

EV readiness (2022). <https://www.leaseplan.com/-/media/leaseplan-digital/shared/documents/full-report---ev-readiness-index-release-2022.pdf>

Girard, A., Roberts, C., Simon, F., & Ordoñez, J. (2019). Solar electricity production and taxi electrical vehicle conversion in Chile. *Journal of cleaner production*, 210, 1261-1269.

IEA, Top 5 barriers to EV adoption reported by EV100 member companies, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/top-5-barriers-to-ev-adoption-reported-by-ev100-member-companies>, IEA. Licence: CC BY 4.0

IEA, 2022. Fuente: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-policy-explorer>

IPCC (2013). In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and James, A. T., Asjad, M., Kumar, G., Shukla, V. C., & Arya, V. (2023). Analyzing barriers for implementing new vehicle scrap policy in India. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 114, 103568.

Jiménez, J. L., Perdiguero, J., & García, C. (2016a). Evaluation of subsidies programs to sell green cars: Impact on prices, quantities and efficiency. *Transport policy*, 47, 105-118.

Jimenez, M., Franco, C. J., & Dyner, I. (2016b). Diffusion of renewable energy technologies: The need for policy in Colombia. *Energy*, 111, 818-829.

P.M. Midgley, eds. (Cambridge University Press), p. 1535.

Larepublica (2021). Autos eléctricos resultan 40% más económicos en comparación con los tradicionales. Fuente: <https://www.larepublica.co/empresas/autos-electricos-resultan-40-mas-economicos-en-comparacion-con-los-tradicionales-3263944#:~:text=El%20estudio%20'Veh%C3%ADculo%20y%20ahorro,debido%20a%20dos%20situaciones%20particulares>.

Larepublica (2022). Colombia, el tercer país de la región con más estaciones de carga públicas y privadas. Fuente: <https://www.larepublica.co/economia/colombia-el-tercer-pais-de-la-region-con-mas-estaciones-de-carga-publicas-y-privadas-3370038>

Larepublica (2023). ¿Y si el parque automotor sigue creciendo, qué? <https://www.larepublica.co/opinion/editorial/y-si-el-parque-automotor-sigue-creciendo-que-3535361>

Li, X., Mu, D., Du, J., Cao, J., & Zhao, F. (2020). Game-based system dynamics simulation of deposit-refund scheme for electric vehicle battery recycling in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104788

Máñez Gomis, G.; Bermúdez Forn, E.; Pardo González, J. L. y Orbea Otazua, J. (2019). Movilidad eléctrica: avances en América Latina y el Caribe y oportunidades para a colaboración regional 2019. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). <https://parlatino.org/wp-content/uploads/2017/09/movilidad-electrica-16-7-20.pdf>.

Martins, H., Henriques, C. O., Figueira, J. R., Silva, C. S., & Costa, A. S. (2023). Assessing policy interventions to stimulate the transition of electric vehicle technology in the European Union. *Socio-Economic Planning Sciences*, 101505.

Mintransporte (2022). <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/11015/colombia-tiene-8299-vehiculos-electricos-en-el-runt-1699-mas-de-la-meta-del-plan-nacional-de-desarrollo/>

Noel, L., de Rubens, G. Z., Kester, J., & Sovacool, B. K. (2018). Beyond emissions and economics: Rethinking the co-benefits of electric vehicles (EVs) and vehicle-to-grid (V2G). *Transport Policy*, 71, 130-137.

Runt (2023). Parque automotor registrado en Runt. https://www.runt.com.co/runt-en-cifras/parque-automotor?field_fecha_de_la_norma_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2020

Salazar Marín, Edgar (2022). Vehículos eléctricos, una opción viable para Colombia.

Sharma, P., & Naidu, R. C. (2022). Optimization techniques for grid-connected pv with retired ev batteries in centralized charging station with challenges and future possibilities: a review. *Ain Shams Engineering Journal*, 101985.

Sterman, J. (2002). *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*.

SUI (2022). Consolidado de energía por empresa y departamento. Fuente: <http://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-sector/Energia/Reportes-comerciales/Consolidado-de-energia-por-empresa-y-departamento/>

Torres-Pamplona, M., Jaramillo-Duque, A., & Ortiz-Castrillón, J. (2021). Vehículos Eléctricos Versus Convencionales en Colombia: Un Análisis Financiero Comparando Los Costos Totales de Propiedad. *Revista Innovación Digital y Desarrollo Sostenible-IDS*, 1(2), 36-45.

UPME (2019) Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica ,
<https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>. Available at:
https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_electromovilidad-8dic-web.pdf
 (Accessed: March 5, 2023).

UPME (2021). Proyección de demanda de energía eléctrica gas natural y combustibles líquidos.
 Fuente:

https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_proyeccion_demanda_energeticos.pdf

UPME (2022). <https://acortar.link/KDbi5N>

Valora (2023) <https://www.valoraanalitik.com/2023/01/19/colombia-no-cumplira-meta-600-000-vehiculos-electricos-rondando-a-2030/>. Available at:
https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_electromovilidad-8dic-web.pdf
 (Accessed: March 5, 2023).

Wang, N., Tang, L., Zhang, W., & Guo, J. (2019). How to face the challenges caused by the abolishment of subsidies for electric vehicles in China?. *Energy*, 166, 359-372.

Zhu, Y., Chappuis, L. B., De Kleine, R., Kim, H. C., Wallington, T. J., Luckey, G., & Cooper, D. R. (2021). The coming wave of aluminum sheet scrap from vehicle recycling in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105208.