



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de estrategias para incentivar un transporte particular bajo en carbono en Colombia

Laura Andrea Ardila Franco

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la decisión

Medellín, Colombia

2013

Evaluación de estrategias para incentivar un transporte particular bajo en carbono en Colombia

Laura Andrea Ardila Franco

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería de Sistemas

Director:

Carlos Jaime Franco Cardona, Ph.D.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión
Medellín, Colombia
2013

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a las siguientes personas y entidades que fueron un soporte importante para el desarrollo exitoso de esta tesis:

- A mi madre Olga Patricia y a mi abuela Ana Elvia quienes nunca dudaron que podía lograrlo.
- A Dairo por su paciencia, constancia y por recordarme las cosas importantes de la vida.
- Al profesor Carlos Jaime Franco Cardona, director de esta investigación, por su apoyo, comprensión y lineamientos acertados y oportunos
- Al profesor Juan David Velásquez, por sus guías en la presentación de trabajos científicos, constante esfuerzo, dedicación y paciencia
- A los miembros del comité evaluador por sus aportes en la elaboración de la investigación y mi formación académica.
- Al Seminario CeIBA y los miembros del grupo de investigación Sistemas e Informática por sus interesantes aportes en el proceso de construcción de esta tesis.
- A la Universidad Nacional de Colombia y su programa “Beca estudiante sobresaliente de posgrado” por financiarme económicamente.
- A la Facultad de Minas y su programa de movilidad por permitirme mostrar el trabajo en otros escenarios y recibir realimentaciones oportunas.
- A mis amigos, familiares, compañeros y todas aquellas otras personas que por razones de espacio no menciono, quienes me apoyaron durante el desarrollo de esta investigación.

Resumen

La creciente preocupación por el cambio climático, las características del sector transporte y sus perspectivas de evolución, han hecho que este sector sea considerado relevante en el análisis de políticas que impulsen la economía baja en carbono. El desarrollo de vehículos con fuentes alternativas hace parte de esas políticas. Aunque la difusión de tecnologías limpias ha sido estudiada por la comunidad académica y está recibiendo mayor atención de los gobiernos, industrias y tomadores de decisión, poco se conoce sobre los procesos de difusión de estas tecnologías en los países en desarrollo y la efectividad de las políticas para incentivarlas en el mercado. Esta investigación presenta un enfoque conceptual que involucra el diseño y uso de un modelo de simulación de dinámica de sistemas para analizar políticas que incentiven la difusión de vehículos con fuentes energéticas alternativas en el mercado colombiano. Se desarrollaron simulaciones para cuatro tipos de estrategias: fiscales y regulatorias, económicas y financieras, de abastecimiento y de comunicación y difusión. Los resultados encontrados indican que las políticas orientadas a romper las barreras de entrada ayudan a impulsar un modelo de transporte particular bajo en carbono en el mercado colombiano y que la implementación conjunta de medidas es más efectiva que la aplicación aislada de cada una.

Palabras clave: Dinámica de sistemas; Simulación; Modelado; Difusión; Adopción; Vehículos con fuentes energética alternativas; Análisis de políticas.

Abstract

The growing concern about the climate change, the characteristics of the transport sector and its future trends, have made this sector to be considered relevant in policy analysis that promote low carbon economies. The development of alternative fuel vehicles is one of these policies. Although the diffusion of clean technologies has been studied for the academy community, and is receiving more attention of the governments, industries and stakeholders, both the adoption process of these technologies in developing countries and the effectiveness of the policies for boost the adoption in the market are low known. This research presents a conceptual approach that involves a design and use of a system dynamics simulation model in order to analyze policies that promote the diffusion of alternative fuel vehicles in the Colombian market. Simulations with different strategies: fiscal and regulatory, economic and financial, refueling, and communication and diffusion were carried out. The results show that the policies applied for broke entry barriers can help to impulse a model of low carbon private transport in the Colombian market and the joint implementation of measures is more effective than the separate application of each one.

Keywords: System dynamics, Simulation, Modeling, Diffusion, Adoption, Alternative fuel vehicles, Policy analysis

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas	XIV
Lista de abreviaturas.....	XV
Introducción	1
1. Problemática de la evaluación de estrategias en el sector transporte.....	5
1.1 Planeación de la investigación.....	5
1.1.1 Preguntas de investigación de la revisión de literatura.....	5
1.1.2 Proceso de búsqueda y criterios de inclusión y exclusión	6
1.1.3 Evaluación de la calidad.....	7
1.1.4 Recolección de datos.....	8
1.1.5 Desviaciones del protocolo.....	8
1.2 Resultados obtenidos y discusión.....	9
1.2.1 Resumen del proceso de búsqueda.....	9
1.2.2 Respuestas a las preguntas de investigación de la revisión de la literatura	9
1.3 Delimitación del problema de investigación	22
1.4 Aproximaciones metodológicas al análisis del problema de difusión de vehículos con fuentes alternativas.....	26
1.5 Objetivos.....	30
1.5.1 Objetivo general.....	30
1.5.2 Objetivos específicos	30
1.6 Conclusiones del capítulo	31
2. Metodología.....	33
2.1 Métodos de simulación para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas.....	33
2.1.1 Dinámica de sistemas	33
2.1.2 Simulación basada en agentes	35
2.1.3 Comparación entre los métodos de simulación y elección del método a utilizar	37
2.2 Estudios previos del análisis de la difusión de vehículos con fuentes alternativas usando el método seleccionado	40
2.3 Conclusiones del capítulo	42

3. Modelo dinámico para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas.....	43
3.1 Límites del modelo	43
3.1.1 Industria.....	45
3.1.2 Consumidores.....	45
3.1.3 Base instalada e infraestructura.....	45
3.1.4 Marco regulatorio y financiero.....	46
3.2 Hipótesis dinámica básica	47
3.2.1 Modelo de elección de alternativas	49
3.2.2 Modelo de intención.....	53
3.3 Estructura dinámica.....	56
3.3.1 Reglas de decisión del modelo	58
3.3.2 Ecuaciones que definen la estructura dinámica del nivel vehículos en el mercado	61
3.3.3 Ecuaciones que definen la estructura dinámica del nivel puntos de abastecimiento.....	62
3.3.4 Ecuaciones que definen la estructura dinámica de los niveles asociados a la intención.....	63
3.4 Validación.....	64
3.4.1 Pruebas directas a la estructura	64
3.4.2 Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento	65
3.4.3 Pruebas de comportamiento	67
3.5 Conclusiones del capítulo.....	67
4. Modelado del mercado colombiano	69
4.1 Análisis del caso base	70
4.1.1 Análisis de la dinámica de las compras	70
4.1.2 Análisis de la dinámica de las conversiones	72
4.1.3 Análisis del nivel vehículos en el mercado	73
4.2 Análisis de estrategias.....	75
4.2.1 Criterios para evaluar las estrategias.....	76
4.2.2 Estrategia fiscal y regulatoria	77
4.2.3 Estrategia económica y financiera	84
4.2.4 Estrategia de comunicación y difusión	86
4.2.5 Estrategia de abastecimiento.....	90
4.2.6 Comparación de las estrategias.....	95
4.2.7 Combinación de estrategias.....	98
4.3 Conclusiones del capítulo.....	101
5. Conclusiones	103
5.1 Aportes más importantes a nivel de comprensión del problema e implicaciones para el desarrollo de estrategias.....	103
5.2 Reporte de cumplimiento de objetivos.....	104
5.3 Solución de las preguntas de investigación planteadas.....	109
5.4 Divulgación de resultados	110
5.5 Trabajos futuros que surgen de la investigación.....	111
A. Anexo: Publicaciones seleccionadas en el proceso de búsqueda	113
B. Anexo: Resumen cambios en el diagrama de bloques	119
C. Anexo: Formulación del modelo de simulación en PowerSim	121

D. Anexo: Soportes de las pruebas de validación.....	127
E. Anexo: Calibración de los coeficientes de innovación e imitación para la intención de conversión	143
Bibliografía	147

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Panorama energético para vehículos particulares.....	11
Figura 1-2: Distribución sectorial del consumo final de energía.....	24
Figura 1-3: Evolución del parque automotor en Colombia.	24
Figura 3-1: Visión general del modelo.....	44
Figura 3-2: Estructura básica de realimentación de la difusión de vehículos con fuentes alternativas.	48
Figura 3-3: Dinámica de las conversiones.....	50
Figura 3-4: Dinámica de las compras.....	51
Figura 3-5: Dinámica de los retiros del sistema.....	52
Figura 3-6: Dinámica de la infraestructura.....	53
Figura 3-7: Dinámica de la intención de compra y la intención de conversión.....	54
Figura 3-8: Interacción de las dinámicas del sistema.	56
Figura 3-9: Estructura dinámica del modelo de difusión de vehículos con fuentes alternativas.	57
Figura 3-10: Proceso de toma de decisiones en dos etapas.	60
Figura 4-1: Dinámica de las compras en el caso base.....	71
Figura 4-2: Dinámica de las conversiones caso base.....	73
Figura 4-3: Vehículos en el mercado en el caso base.....	74
Figura 4-4: Resultados de la estrategia de exención de impuestos en el escenario 1.....	79
Figura 4-5: Resultados de la estrategia de exención de impuestos en el escenario 2.....	81
Figura 4-6: Resultados de la estrategia de exención de impuestos en el escenario 3.....	82
Figura 4-7: Resultados cuando se rompe la barrera del precio.....	83
Figura 4-8: Resultados con subsidio a la conversión.....	85
Figura 4-9: Resultados sin costo de conversión.....	86
Figura 4-10: Resultados de política de comunicación.....	88
Figura 4-11: Resultados cuando la intención es 1.....	90
Figura 4-12: Resultados con cambio en los hábitos de consumo.....	91
Figura 4-13: Resultados construcción de infraestructura de soporte.....	93
Figura 4-14: Resultados cuando se rompen las barreras técnicas de tiempo de abastecimiento y disponibilidad.....	95
Figura D-1: Compras y vehículos en el mercado cuando la demanda potencial es cero.....	132
Figura D-2: Probabilidad de compra y compras de vehículos cuando la intención de compra es cero.....	132
Figura D-3: Probabilidad de conversión y conversiones cuando la intención de conversión es cero.....	133

Figura D-4: Conversiones y vehículos en el mercado cuando los vehículos tradicionales son cero	133
Figura D-5: Compras y vehículos en el mercado cuando la oferta de vehículos con fuentes alternativas es cero.....	134
Figura D-6: Simulaciones para detectar errores de integración	135
Figura D-7: Sensibilidad al coeficiente Beta del precio	136
Figura D-8: Sensibilidad de la atracción de compra y las compras al coeficiente Beta de los costos	137
Figura D-9: Sensibilidad de la atracción de conversión y conversiones al coeficiente Beta de los costos	137
Figura D-10: Sensibilidad de la intención de compra, intención de conversión, compras y conversiones ante cambios en las influencias internas.....	138
Figura D-11: Sensibilidad de la intención de compra, intención de conversión, compras y conversiones ante cambios en las influencias externas.....	140
Figura D-12: Comparación de modelos en la reproducción del modo de referencia	141
Figura E- 1: Modelo construido para estimar los parámetros influencias externas e influencias internas.....	145
Figura E- 2: Comparación población con intención de conversión histórica y estimada.	145

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Principales factores de influencia en la difusión de una innovación.....	16
Tabla 1-2: Barreras al ingreso de vehículos con fuentes alternativas.....	18
Tabla 1-3: Estrategias identificadas para superar las barreras.....	21
Tabla 1-4: Resumen de las características y usos de modelos clasificados según su metodología	27
Tabla 1-5: Resumen de modelos para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas	28
Tabla 2-1: Resumen comparativo de las principales características de los métodos de modelado	38
Tabla 2-2: Evaluación de los métodos de modelado para cumplir con los requisitos de la investigación	39
Tabla 3-1: Clasificación de los elementos considerados en la construcción del modelo..	46
Tabla 3-2: Formulación de las ecuaciones asociadas al nivel vehículos en el mercado. .	61
Tabla 3-3: Formulación de las ecuaciones asociadas al nivel puntos de abastecimiento	62
Tabla 3-4: Formulación de las ecuaciones asociadas los niveles población con intención de compra o conversión.....	63
Tabla 4-1: Panorama de las estrategias modeladas	75
Tabla 4-2: Indicadores cuantitativos para evaluar la difusión de una innovación.....	77
Tabla 4-3: Impuestos a los vehículos en Colombia	78
Tabla 4-4: Resumen comparativo de las estrategias modeladas	96
Tabla 4-5: Resumen comparativo combinación de estrategias	100
Tabla A- 1: Publicaciones seleccionadas en la investigación.	113
Tabla B- 1: Resumen comparativo de las principales modificaciones realizadas al diagrama de bloques.....	119
Tabla C- 1: Formulación del modelo de simulación en PowerSim	121
Tabla D- 1: Explicación de los parámetros del modelo.....	128
Tabla D- 2: Explicación de las variables exógenas del modelo	130
Tabla D- 3: Valores de las variables exógenas	130
Tabla D- 4: Resumen de la comparación estadística de los modelos.....	141
Tabla E- 1: Descripción de las variables usadas para la calibración	146
Tabla E- 2: Valores de las variables usados para la calibración.....	146

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
CEPAL	Comisión Económica para Latinoamérica y el caribe
CONFIS	Consejo Nacional de Política Fiscal
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EIA	Energy Information Administration
IEA	International Energy Agency
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MME	Ministerio de Minas y Energía

Introducción

Analizar y evaluar políticas antes de implementarlas en ámbitos complejos y de alta incertidumbre es de suma importancia. No considerar las características complejas del sistema que se analiza es una de las principales razones por las cuales las políticas fallan (Ghaffarzadegan, Lyneis y Richardson 2010; Forrester 1958; Forrester 1995; Sterman 1989; Sterman 2000). La resistencia a las políticas a menudo surge de los ciclos de realimentación que caracterizan los sistemas complejos. Un análisis de políticas adecuado previo a la implementación a menudo da algunas ideas sobre cómo intervenir el sistema para evitar esa resistencia.

La difusión de innovaciones es un fenómeno complejo y de alta incertidumbre (Peres, Muller y Mahajan 2010). Este fenómeno se caracteriza por presentar dinámicas no lineales (Shepherd, Bonsall y Harrison 2012), interacciones entre los agentes y realimentaciones entre las variables (Struben y Sterman 2008; Meyer y Winebrake 2009). A pesar de que el análisis de la difusión ha sido estudiado por más de 40 años hace falta construir modelos aplicados a industrias específicas en países en desarrollo. Las revisiones recientes en el estudio de la difusión de innovaciones han identificado tres grandes desafíos en esta área de investigación (Atabani et al. 2011; Rao y Kishore 2010; Kiesling et al. 2011; Montalvo y Kemp 2008). El primero es desarrollar modelos aplicados a países en vías de desarrollo. El segundo es incorporar elementos de racionalidad limitada a las teorías. El tercero es reportar el uso de modelos de difusión en aplicaciones prácticas en industrias específicas.

En la industria automotriz, el panorama energético para el transporte particular ofrece múltiples opciones tanto tradicionales como alternativas. Las investigaciones recientes destacan los biocombustibles (Sobrino, Monroy y Pérez 2010), el gas natural (Vergara 2009), la electricidad (Høyer 2008) y el hidrógeno (Baptista, Tomás y Silva 2010; Bento 2010) como energéticos alternativos potenciales. Hasta hoy, existen grandes interrogantes sobre cual opción será la dominante. El estudio de la difusión y adopción de

las opciones alternativas se ha centrado en el análisis de los factores que podrían incentivarlas u obstaculizarlas. En general, los factores pueden clasificarse como lo propone Wejnert (2002) en características de la innovación, características de los innovadores y características del ambiente. En particular, las barreras pueden ser clasificadas como financieras, regulatorias y legales, técnicas y tecnológicas, aceptación pública y disponibilidad del mercado (Browne, O'Mahony y Caulfield 2012; Eppstein et al. 2011; Franco y Figueroa 2008; Montalvo y Kemp 2008; Steenberghen y López 2008; Zubaryeva et al. 2012; Wiedmann et al. 2011).

Las políticas para incentivar la difusión deberían enfocarse en romper los obstáculos identificados. Se ha encontrado que el desafío principal que enfrentan los vehículos con fuentes alternativas es romper las barreras creadas por la industria convencional (Struben y Sterman 2008). Existen opciones políticas para romper la estructura cerrada del mercado (Kwon 2012). Según Steenberghen y López (2008) se requiere una combinación de varias estrategias y medidas para lograr el objetivo. Sin embargo, poco se sabe sobre la efectividad de las políticas propuestas. Las investigaciones se han centrado más en identificar las estrategias que en evaluarlas. Es así como existen pocos estudios que exploren la efectividad de las políticas diseñadas para incentivar la adopción de vehículos con fuentes alternativas en países en desarrollo.

El modelado de las políticas podría ayudar en el análisis del problema identificado. La simulación es un tipo particular de modelado e introduce una nueva forma para pensar sobre procesos sociales y económicos, basados en ideas acerca del comportamiento complejo emergente (Gilbert y Troitzsch 2005). Esta técnica está ganando una creciente aceptación en la comunidad académica para estudios como el que se propone en esta tesis, que involucra un fenómeno complejo. Entre los métodos de simulación existentes se seleccionó el enfoque de dinámica de sistemas para analizar el problema. Este enfoque permite a través de modelos simples aproximarse al estudio de sistemas complejos caracterizados por múltiples ciclos de realimentación y no linealidades. Además, esta metodología permite tener una visión clara y holística que ayuda a entender la estructura del sistema, replicar el comportamiento del mismo y sobre todo evaluar los efectos de las políticas propuestas.

Algunos autores ya han usado dinámica de sistemas para aproximarse al análisis de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en países desarrollados. Struben y Sterman (2008) diseñaron un modelo dinámico de la difusión y competencia de vehículos con fuentes alternativas pero no analizaron detalladamente políticas para incentivar la adopción. Más tarde, Meyer y Winebrake (2009) modelaron la dinámica de la difusión de vehículos impulsados por hidrógeno en países industrializados. Posteriormente, Shepherd et al (2012) desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas para analizar la adopción de vehículos eléctricos en el Reino Unido y se centraron en el análisis de los subsidios. Sin embargo, el comportamiento dinámico del mercado colombiano no se puede inferir a partir del análisis del mercado de países desarrollados. Colombia es un país en desarrollo y esto hace que existan diferencias financieras, políticas, económicas y tecnológicas respecto a los países desarrollados. Este entorno impide explicar el comportamiento del mercado a partir de los modelos existentes.

Esta investigación formula un modelo que vincula dinámicamente la difusión de innovaciones con la toma de decisiones incorporando elementos de racionalidad limitada. Además, pretende, basada en la literatura académica relacionada, desarrollar un modelo de simulación que permita observar la evolución a largo plazo de la adopción de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano. Finalmente, usar el modelo de simulación construido para analizar y evaluar políticas que incentiven la difusión.

La originalidad e importancia de esta investigación está fundamentada en los siguientes puntos:

- Desarrolla un modelo integrador que combina la difusión de innovaciones con un modelo de elección discreta teniendo en cuenta la racionalidad limitada de los consumidores.
- Analiza la evolución a largo plazo de la difusión de vehículos con fuentes alternativas y explorar la transición hacia la movilidad particular baja en carbono en Colombia considerando las diferentes realimentaciones y complejidades del sistema.
- Evidencia el comportamiento del sistema modelado cuando se introducen políticas que incentiven la difusión de estos vehículos a fin de comparar efectos y a partir de ellos definir con cuál política se obtienen mejores resultados.

Para lograr los objetivos propuestos, este documento se desarrolla como sigue. En el Capítulo 1 se expone la situación actual a partir de las tres áreas de investigación que están asociadas al trabajo: panorama energético del sector transporte, difusión de innovaciones y evaluación de estrategias, luego se delimita la investigación. En el Capítulo 2 se selecciona la metodología de investigación. En el Capítulo 3, se aplica la conceptualización del Capítulo 1 y la metodología seleccionada en el Capítulo 2 para desarrollar un modelo novedoso que representa el fenómeno de difusión de vehículos con fuentes alternativas. El Capítulo 4 se muestra el análisis de la simulación a partir de la discusión de los resultados obtenidos tanto para el caso base como para las estrategias aplicadas. El Capítulo 5 recapitula la discusión inicial y resume los elementos más relevantes de la investigación.

1. Problemática de la evaluación de estrategias en el sector transporte

En este capítulo inicialmente se revisa sistemáticamente la literatura. Luego se presentan, de manera general, los principales hallazgos en las tres líneas de investigación que enmarca el problema de maestría. Finalmente, se delimita el trabajo de investigación y se plantean sus objetivos.

1.1 Planeación de la investigación

En esta sección se describe la revisión sistemática de la literatura. A partir de ésta es posible identificar las brechas en las investigaciones actuales con el fin de sugerir nuevas áreas de investigación. Es así como dicha revisión da un marco para justificar nuevas actividades de investigación.

1.1.1 Preguntas de investigación de la revisión de literatura.

Las preguntas de investigación que se usaron para revisar la literatura son las siguientes:

- a. ¿Cuál es la situación actual y las perspectivas de evolución del sector transporte a nivel global?
- b. ¿Cómo se ha estudiado el proceso de difusión de innovaciones?
- c. ¿Cómo se ha estudiado el proceso de adopción de innovaciones?
- d. ¿Cuáles son los factores y atributos más relevantes en la elección de una tecnología, en particular vehículos con fuentes energéticas alternativas?
- e. ¿Cuáles son las barreras de ingreso al mercado para los vehículos particulares con fuentes alternativas?
- f. ¿Cuáles son los mecanismos existentes para incentivar la preferencia vehículos particulares con fuentes alternativas?

Estas preguntas están asociadas a 3 líneas de investigación: la pregunta a está asociada con el panorama energético del sector transporte, las preguntas b y c están relacionadas a la difusión de innovaciones, y las preguntas d, e y f se vinculan con el campo de evaluación de estrategias.

1.1.2 Proceso de búsqueda y criterios de inclusión y exclusión

Con el propósito de responder a las preguntas planteadas anteriormente se desarrolló un proceso de búsqueda que se caracterizó por los siguientes ítems:

- a. Fuentes de información: El proceso de búsqueda inicio con una revisión gruesa en la bases de datos Science Direct y la herramienta bibliográfica Scopus en la que se incluyeron los artículos publicados desde el año 2000 hasta el 2013. Se limitó la búsqueda a dos áreas temáticas: ciencias físicas, en las que se incluyen ciencias computacionales, energía e ingeniería, y ciencias sociales y humanidades para tener en cuenta las áreas de negocios y administración, y ciencias de la decisión.
- b. Cadena de búsqueda: Se realizaron 3 búsquedas para cubrir las diferentes líneas de investigación que abarca la tesis. En la primera búsqueda se usaron como palabras clave “model”, “diffusion”, “adoption” y “technology” abarcando de este modo los modelos de difusión y adopción de tecnologías. En la segunda búsqueda se usaron combinaciones de las palabras “transport sector”, “future trends”, “sustainable”, “alternative fuel vehicles” para analizar las características de sector transporte y sus perspectivas de evolución. Finalmente, en relación con el análisis de estrategias, la búsqueda se efectuó con las palabras clave “assessment strategies”, “promote a diffusion”.
- c. Criterios de búsqueda: Se revisaron los títulos de los documentos para seleccionar de forma manual aquellos afines con el área de investigación. La búsqueda se refinó usando dos criterios. Los artículos más recientes y los artículos más citados.

1.1.3 Evaluación de la calidad

La evaluación de la calidad de los trabajos seleccionados se realizó tomando como referencia los nueve criterios que según Browne y Keeley (2007) permiten para evaluar la confiabilidad de los estudios de investigación. Tales criterios son: calidad, fortalezas de la investigación, replicabilidad, selectividad en los estudios, evidencia de pensamiento crítico, distorsión de la información, condiciones bajo las cuales se desarrolló el estudio, generalización, y sesgos en las mediciones usadas. Se encontró que:

- a. Los estudios de investigación a partir de los cuales se extrae la información para la tesis de maestría fueron publicados en revistas arbitradas, con esto se garantiza que han sido revisados por una serie de expertos relevantes y en consecuencia tienen una buena calidad.
- b. Los autores de los estudios seleccionados resaltan las fortalezas de la investigación en varias partes del documento. En la introducción y las conclusiones, hacen énfasis en los aportes del trabajo realizado. Además, en la parte metodológica dan pistas que sugieren una investigación bien hecha.
- c. Las investigaciones usadas como fuente de información cumplen el criterio de replicabilidad. Existen varios reportes de encuestas de preferencias declaradas que coinciden en los resultados hallados. Varias fuentes describen las barreras de entrada al mercado y las estrategias disponibles para superarlas.
- d. Por otro lado, los autores presentan en su argumentación algo de selectividad. En su discurso evidencian pocos resultados de estudios que podrían ser contradictorios, pero si se apoyan fuertemente en los estudios que conducen a conclusiones similares.
- e. Todas las investigaciones seleccionadas para extraer información evidencian fortalezas en pensamiento crítico. Los argumentos que conducen a las conclusiones presentadas son claros y se basan en fuertes evidencias.
- f. No hay ninguna evidencia que indique que los autores de los estudios seleccionados tuvieran motivos para alterar los resultados de la investigación. Así como tampoco se evidencian sesgos o distorsiones en las encuestas, clasificaciones u otras medidas que apoyaran la investigación.
- g. Las condiciones bajo las cuales se realizaron las investigaciones conservan la realidad. En el caso de la evaluación de estrategias, los estudios seleccionados no

realizan pronóstico sino explicación de los efectos obtenidos como resultado de las políticas aplicadas con anterioridad.

En consecuencia, la información extraída a partir de los estudios de investigación seleccionados es confiable y puede ser usada como soporte en las diferentes etapas de la tesis de maestría.

1.1.4 Recolección de datos

Los datos extraídos de cada trabajo fueron: los autores del trabajo, el año de publicación, el título del trabajo, revista o evento de publicación y los elementos relevantes para dar respuesta a cada una de las preguntas de investigación formuladas.

1.1.5 Desviaciones del protocolo

Además de los artículos seleccionados usando el protocolo de investigación, se obtuvo información de autoridades que tienen una amplia experiencia en los temas de estudio, libros orientados a las líneas de investigación y tesis de maestría y doctorado.

Las autoridades seleccionadas son: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), International Energy Agency (IEA), U.S. Energy Information Administration (EIA) y U.S Department of Energy. Estas autoridades tienen acceso a información actualizada y a datos que deben ser considerados para la investigación. Además, han desarrollado una fuerte reputación en el medio y los autores de estudios de investigación acuden a ellas con frecuencia para soportar sus afirmaciones. Por lo tanto, la información obtenida a través de los estudios publicados por tales autoridades es confiable.

Se incluyeron dos publicaciones por ser investigaciones clásicas en el área de difusión de innovaciones, tales publicaciones son:

- a. El libro “Diffusion of innovations” cuya primera versión fue publicada en 1962 (Rogers 1995), fue escrito por Everett Rogers y ha sido citado más de 49300 veces.
- b. El artículo “A new product growth for model consumer durables” escrito por Frank M Bass y publicado por primera vez en Management Science en 1969 (Bass 2004a), ha sido citado más de 4760 veces. El modelo de difusión desarrollado en este artículo es

ampliamente conocido como el modelo de Bass y ha sido uno de los modelos más aplicados en la ciencia de la administración (Bass 2004b).

1.2 Resultados obtenidos y discusión.

En esta sección se resumen los resultados del proceso de búsqueda y se discuten las respuestas a las preguntas de investigación formuladas a partir de la literatura seleccionada.

1.2.1 Resumen del proceso de búsqueda

En el Anexo A se presentan las publicaciones obtenidas durante el proceso de búsqueda. Se identificaron un total de 57 artículos, 4 informes de autoridades, 1 libro y 6 tesis de maestría y doctorado. Según su línea de investigación se clasifican así: cuarenta y un (41) documentos están asociados a la línea de difusión de innovaciones, cincuenta y cuatro (54) están orientados a al panorama energético del sector transporte y treinta y seis (36) abordan la temática de evaluación de estrategias. Algunos de los 68 documentos caen en más de una categoría. Por año de publicación, su clasificación es la siguiente: 1995 (1), 2000 (1), 2002 (2), 2004 (2), 2006 (2), 2007 (1), 2008 (7), 2009 (2), 2010 (14), 2011 (13), 2012 (17) y 2013 (6). Las publicaciones fueron extraídas de 29 fuentes de información distintas, se destacan por su recurrencia: Energy Policy (13), Journal of Cleaner Production (5) y Technological Forecasting and Social Change (4).

En las siguientes partes de esta sección se usan las publicaciones seleccionadas para dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas.

1.2.2 Respuestas a las preguntas de investigación de la revisión de la literatura

- a. ¿Cuál es la situación actual y las perspectivas de evolución del sector transporte a nivel global?

El sector transporte es el segundo sector que más consume energía a nivel global, aproximadamente el 30% de la cantidad total de energía mundial (Ou, Zhang y Chang 2010). Tradicionalmente ha dependido de combustibles fósiles (Baptista, Tomás y Silva 2010) y es responsable del 23% de las emisiones de dióxido de carbono (IEA 2011).

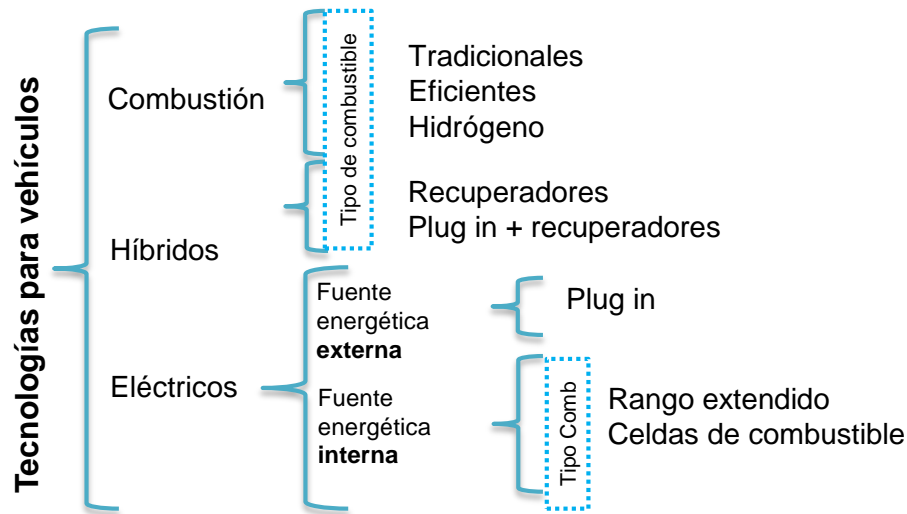
Las estadísticas que estudian la evolución global de este sector proyectan incrementos significativos en la demanda energética. Entre 2006 y 2030 se estima que las tres cuartas partes del incremento en la demanda proyectada de petróleo serán debidas al sector transporte (Atabani et al. 2011). Para el periodo comprendido entre 2008 y 2035 se proyecta un incremento en la demanda del 1.4% anual estimando que los países en vía de desarrollo aumenten el 2.6% anual y los países desarrollados el 0.3% (EIA 2011).

Además de lo anterior, es importante resaltar que el número de vehículos se ha incrementado de 5 millones después de la segunda guerra mundial a 1 billón hoy en día (Atabani et al. 2011). Se espera que llegue a los 2 billones en los próximos 20 años y se triplique en 2050 (Bento 2010). Dicho incremento estará impulsado esencialmente por los países emergentes de rápido crecimiento: China, India y algunos países de Latinoamérica (Ou, Zhang y Chang 2010).

Este crecimiento acelerado del parque automotor traerá importantes consecuencias desde el punto de vista ambiental, económico y social y requerirá una adecuada gestión de la demanda (Bento 2010), profundizando en políticas de uso racional de la energía y reorientando la demanda a través de tecnologías alternativas (Sierzchula et al. 2012). Con el ánimo de responder a estas exigencias globales desde una perspectiva de transporte sostenible se han desarrollado importantes investigaciones asociadas a las tecnologías y fuentes energéticas alternativas en el sector transporte (Sweeting y Winfield 2012; Hickman et al. 2012).

Como resultado de dichas investigaciones, es posible identificar en la literatura dos tecnologías en competencia: los vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos, como una mezcla de ambos aparecen los vehículos híbridos. Las investigaciones recientes destacan los biocombustibles (Sobrino, Monroy y Pérez 2010), el gas natural (Vergara 2009), la electricidad (Høyer 2008; Tie y Tan 2013) y el hidrógeno (Baptista, Tomás y Silva 2010; Bento 2010) como energéticos potenciales. En la Figura 1-1 se resume e ilustra el panorama energético global para vehículos particulares.

Figura 1-1 Panorama energético para vehículos particulares. Adapado de (Franco y Baena 2010).



A nivel global, en el corto plazo se proyecta una gran aceptación de los biocombustibles y gas natural vehicular (De Simio, Gambino y Iannaccone 2013) y a largo plazo una mayor acogida de vehículos eléctricos e hidrógeno (Anandarajah, McDowall y Ekins 2013). Franco y Baena (2010) estudiaron la dinámica de la penetración de vehículos con fuentes alternativas a nivel global. Analizaron los vehículos convencionales, eléctricos, híbridos y las celdas de combustible y encontraron que los vehículos eléctricos son preferidos por los consumidores en el largo plazo pero el parque automotor sigue siendo dominado por los vehículos de combustión tradicional.

Los vehículos eléctricos han sido clasificados como una innovación destructora de la competencia (Sierzchula et al. 2012), están siendo introducidos como consecuencia de mejoras tecnológicas y se espera una gran penetración del mercado (Kley, Lerch y Dallinger 2011). Son considerados una tecnología clave para reducir las emisiones y el consumo energético en el sector transporte (Helmers y Marx 2012) y entre ellos los híbridos son los más destacados, esta preferencia está asociada a los bajos costos de cambio y a que los consumidores no tienen que depender de la disponibilidad de estaciones de reabastecimiento como en el caso de los vehículos impulsados por hidrógeno (Eggers y Eggers 2011).

Los vehículos impulsados por hidrógeno son una opción potencial a largo plazo (Bento 2010). La principal barrera para su uso generalizado es el acceso al reabastecimiento.

Por esta razón la mayoría de los proyectos están relacionados con el sector de transporte público (Baptista, Tomás y Silva 2010).

Finalmente, es importante tener en cuenta que la industria automovilística se ha actualizado a sí misma en pocas décadas (Sierzchula et al. 2012) y se espera que los estándares en economía de combustibles, la información a los consumidores, y los desarrollos en nuevas tecnologías ofrezcan un gran potencial de ahorro energético en el sector transporte (Atabani et al. 2011).

b. ¿Cómo se ha estudiado el proceso de difusión de innovaciones?

La difusión es el proceso por el cual una innovación es comunicada a través de ciertos canales, en un periodo de tiempo a los miembros de un sistema social (Rao y Kishore 2010). Este proceso ha sido descrito como un fenómeno complejo influenciado por muchas variables de decisión y caracterizado por múltiples interrelaciones e interacciones entre los usuarios, el gobierno y la sociedad en general (Meade y Islam 2006). Algunos autores han establecido que el proceso de difusión tiene cinco etapas: conocimiento, interés, evaluación, ensayo y adopción (MacVaugh y Schiavone 2010). Según el tiempo en que se realiza la última etapa, los consumidores pueden clasificarse en innovadores, adoptadores tempranos, mayoría temprana, mayoría tardía, y rezagados (Rogers 1995). Por otro lado se ha afirmado que el éxito del proceso depende la creación de un ambiente apropiado que promueva la difusión y permita alcanzar rápidamente una masa crítica a partir de la cual la difusión es auto-sostenible (Peres, Muller y Mahajan 2010).

La difusión de innovaciones es una dinámica social muy interesante y continúa siendo un tópico relevante de investigación (Meade y Islam 2006). La riqueza investigativa en el modelado y pronóstico de la difusión de innovaciones es impresionante y confirma su importancia como tema de investigación (Kiesling et al. 2011). El estudio de la difusión de las innovaciones comienza en 1903 pero se populariza a mediados del siglo XX permeando una amplia variedad de disciplinas y permitiendo el surgimiento de teórico de modelos que expliquen el fenómeno (Cadavid, Franco y Awad 2012). Este tema ha gozado de un fuerte interés académico y práctico a partir de 1960 donde se desarrollaron los primeros modelos matemáticos (Rao y Kishore 2010; Peres, Muller y Mahajan 2010; Meade e Islam 2006). Dichos modelos capturan la tendencia de la difusión en forma de

ecuaciones diferenciales a partir de tasas de adopción que dependen del contexto, esto es incluyendo factores socioeconómicos, tecnológicos e institucionales que pueden tanto facilitar como dificultar la difusión (Wejnert 2002). En general, estos modelos asumen que el crecimiento de una tecnología en un mercado depende del total de adoptadores potenciales (Rao y Kishore 2010). Uno de los modelos más relevantes de este tipo es el modelo desarrollado por Bass en 1969 en el cual se caracteriza la difusión como un proceso de contagio derivado de influencias externas (que dominan en la primera etapa del proceso) e influencias internas (que dominan en la segunda etapa del proceso), dichas influencias definen la tasa de adopción (Bass 2004b).

En general, los modelos de difusión de innovaciones pueden clasificarse en dos grandes grupos: modelos individuales y modelos agregados (Kiesling et al. 2011). En los modelos individuales la difusión depende de la apreciación de la innovación, las preferencias personales y la rentabilidad percibida. En los modelos agregados la difusión se formula a partir de ecuaciones diferenciales que explican los flujos entre dos subgrupos mutuamente excluyentes, los adoptadores y no adoptadores. El modelado basado en agentes hace parte de los modelos individuales, mientras que los modelos de dinámica de sistemas pertenecen a la categoría de modelos agregados.

Estos modelos pueden clasificarse a su vez en fundamentales, flexibles y refinados (Rao y Kishore 2010). Los modelos fundamentales asumen que la difusión es un proceso con un mercado potencial y coeficientes constantes. Los modelos flexibles suavizan los supuestos de los modelos fundamentales en el punto de inflexión de la difusión. Finalmente, los modelos refinados son dinámicos, incluyen el análisis de múltiples innovaciones y consideran que la difusión no es sólo función del tiempo sino que los coeficientes son función de los parámetros específicos de las tecnologías, es así como analizan la influencia del precio y los cambios tecnológicos asociados a cada innovación. Tales cambios pueden deberse, por ejemplo, a mejoramientos inducidos por experimentación, oportunidades económicas, implementación de investigación y desarrollo en el proceso productivo y políticas económicas y sociales (Rao y Kishore 2010).

Los modelos de difusión de innovaciones han sido usados históricamente para dos fines: descriptivo y predictivo (Peres, Muller y Mahajan 2010). En el primer caso se usan para

describir la difusión en general de una nueva tecnología con el propósito de apoyar el análisis de decisiones estratégicas. En el segundo caso buscan pronosticar el desempeño en el tiempo de la innovación.

Estudios empíricos realizados muestran que los procesos de difusión de innovaciones siguen frecuentemente una forma de S, explicada por la dinámica y la heterogeneidad de la población (Shimogawa, Shinno y Saito 2012).

c. ¿Cómo se ha estudiado el proceso de adopción de innovaciones?

El modelado del proceso de adopción de innovaciones inició hacia 1970 y ha sido un importante campo de investigación durante los últimos años (Cadavid y Franco 2012a). Los modelos que estudian la adopción de innovaciones exploran porqué y cuando ocurre la adopción. Luego, estos modelos incluyen una gran cantidad de factores que influyen en la decisión de adoptar (Montalvo y Kemp 2008).

Los modelos de adopción han evolucionado en el tiempo a partir de la teoría de la acción razonada propuesta por Fishbein y Ajzen en 1975, según esta teoría, el comportamiento de un individuo está determinado por su intención previa a adoptar. Tal intención se define en función de la actitud y las normas subjetivas (Cadavid y Franco 2012b). Basado en la teoría de la acción razonada, Azjen en 1985 propuso la teoría del comportamiento planeado que incluye el control comportamental como otro factor que influye en la intención de adopción (Cadavid y Franco 2012b). Posterior a este, en 1985 Davis propuso el modelo de aceptación tecnológica, según el cual la motivación del individuo respecto al uso de la tecnología depende las características de la tecnología, la utilidad y facilidad de uso percibidas. Este modelo ha tenido múltiples adaptaciones y extensiones, goza de una gran acogida en la comunidad científica y usos reportados en la literatura (Cadavid y Franco 2012a).

Desde una perspectiva de análisis de decisiones, los modelos que estudian la adopción de innovaciones analizan la forma en que los consumidores eligen una innovación entre dos o más alternativas. Entre los modelos desarrollados en esta área del conocimiento se destacan los modelos de toma de decisiones con elección discreta. Los modelos de elección discreta han sido usados en la literatura para describir la toma de decisiones del consumidor (Al-Alawi y Bradley 2013). Estos modelos estiman la probabilidad de que una

alternativa particular sea elegida bajo ciertas características como condiciones demográficas o atributos de las alternativas considerando las preferencias del decisor (Higgins et al. 2012). Entre los diversos tipos de modelos de elección, el análisis de la adopción de innovaciones se ha realizado con modelos de tipo logit multinomial; los cuales asumen que los individuos seleccionan la alternativa que maximice su utilidad.

Los modelos de tipo logit multinomial expresan la probabilidad de que un consumidor elija una alternativa i , entre un conjunto C de j alternativas, como se muestra en la ecuación 1. Donde P_i es la probabilidad de que el decisor elija la alternativa i y U_i es la función de utilidad. La utilidad depende de las características de las alternativas ($X_{i,k}$) y los factores de importancia relativa de cada atributo k (β_k) como se muestra en la ecuación 2. De este modo, desarrollar un modelo de elección discreta de tipo logit multinomial requiere definir las características de las tecnologías y los factores de importancia relativa.

$$P_i = \frac{e^{U_i}}{\sum_{j \in C} e^{U_j}} \quad [1]$$

$$U_i = \sum \beta_k X_{i,k} \quad [2]$$

Los modelos de elección discreta han sido usados para estimar las tasas de adopción de tecnologías y con ellas definir la participación de mercado de cada tecnología. Según Higgins et al (2012) el uso de modelos de elección discreta para analizar la adopción se sustenta en que las decisiones de los consumidores están influenciadas por múltiples criterios y los modelos de elección permiten representar la probabilidad de que el consumidor seleccione una tecnología dada bajo esos criterios. Sin embargo, los autores reconocen en su estudio las limitaciones de estos modelos para capturar el comportamiento social explícito y las relaciones entre los adoptadores potenciales y su entorno. Para Al-Alawi y Bradley (2013) la principal ventaja de los modelos de elección discreta es que permiten analizar la toma de decisiones de los consumidores como grupos más que como individuos y eso los hace transparentes y poco complejos. Esta es la razón principal de su uso generalizado para estudiar el problema de adopción de vehículos con fuentes alternativas.

- d. ¿Cuáles son los factores y atributos más relevantes en la elección de una tecnología, en particular vehículos con fuentes energéticas alternativas?

En la revisión de la literatura, es posible identificar que existen múltiples factores que influyen en la elección de una tecnología en general y en la difusión de vehículos con fuentes alternativas en particular. En la Tabla 1-1 se resumen los diferentes factores considerados por las investigaciones seleccionadas. La Tabla está organizada así: la primera columna clasifica las investigaciones asociadas con difusión de innovaciones en general y difusión de vehículos con fuentes alternativas. La segunda columna muestra la referencia de la investigación con el autor y el año. Y la tercera columna lista los principales factores de influencia identificados en la investigación referenciada.

Tabla 1-1: Principales factores de influencia en la difusión de una innovación.

	Autor	Principales factores de influencia
Difusión de innovaciones en general	Rogers 1995	<u>Incertidumbre</u> <u>Características de la innovación:</u> ventaja relativa, compatibilidad, complejidad, ensayabilidad y observabilidad. <u>Canales de comunicación:</u> comunicación masiva, interpersonal <u>Naturaleza del sistema social</u>
	Wejnert, 2002	<u>Características de la innovación.</u> <u>Características de los innovadores:</u> Estatus, condiciones socioeconómicas, posición en la red social, cualidades personales. <u>Características del ambiente:</u> geográficas, sociales, políticas y globales
	Montalvo y Kemp, 2008	<u>Mecanismos endógenos:</u> Transferencia de información, mejoramientos de las tecnologías, reducciones de precios, economías de escala, competencia <u>Mecanismos exógenos:</u> Cambio en los precios de los energéticos, cambio en el marco regulatorio
	Rao y Kishore, 2010	Características de la tecnología, microambiente, rol del gobierno, tipos de usuarios, estructura del mercado
	MacVaugh y Schiavone, 2010	Condiciones demográficas, condiciones tecnológicas, condiciones sociales, condiciones de aprendizaje
Difusión de vehículos con fuentes alternativas	Brownstone, Bunch y Train, 2000	Velocidad, precio, tiempo de reabastecimiento, costo de combustible, estaciones de reabastecimiento, tiempo de aceleración, emisiones
	Dagsvik, Wennemo, Wetterwald y Aaberge, 2002	Precio, velocidad, autonomía, consumo de combustible
	Struben y Sterman, 2007	<u>Sociales:</u> Normas culturales, experiencias de personas, interacciones sociales <u>Atributos de las alternativas:</u> autonomía, desempeño, disponibilidad de combustible, abastecimiento, impacto ecológico, investigación y desarrollo, economías de escala, curvas de aprendizaje <u>Exposición a diferentes plataformas:</u> mercadeo, mass media, boca a boca
	Yeh, 2007	Estructura del mercado, efectividad de regulaciones e incentivos, infraestructura, <u>políticas gubernamentales, factores económicos</u>
	Melaina y Bremson, 2008	Costo, rendimiento o desempeño, disponibilidad de una recarga adecuada
	Bento, 2010	Precio, eficiencia
	Peres et al., 2010	Externalidades de red, señales sociales
Eggers y Eggers, 2011	Precio de venta, autonomía, momento de entrada al mercado, evolución ambiental, precio de los energéticos	

Continúa en la siguiente página

Continúa de la página anterior

	Autor	Principales factores de influencia
Difusión de vehículos con fuentes alternativas	Zhang et al., 2011	Políticas gubernamentales, precio de los combustibles, grado académico, ingresos, opiniones de los compañeros, costo de mantenimiento, seguridad
	Park, Kim y Lee, 2011	<u>Variables externas:</u> reducciones de precios y estaciones de reabastecimiento
	Mabit y Fosgerau, 2011	<u>Atributos monetarios:</u> Precio, Costo anual <u>Atributos no monetarios:</u> Autonomía, Frecuencia de reabastecimiento, tiempo de aceleración y servicios extra no incluidos en el mantenimiento <u>Características de los innovadores:</u> Género, Ingresos, Edad, Estado civil
	Kang y Park, 2011	<u>Necesidades psicológicas:</u> motivación para buscar la estima y autorrealización a través de la pertenencia a un grupo que ya posee los productos, diferenciarse, deseo de comprar algo nuevo y mejor <u>Valor:</u> Actitud ante elementos de la sociedad y percepción del mundo <u>Percepciones:</u> hacia el producto, hacia las políticas de gobierno (confianza en la formulación de políticas, coherencia política y eficiencia de las políticas) <u>Experiencia:</u> Conocimiento, evaluación y exposición a la promoción de los productos o políticas de gobierno
	Shepherd et al., 2012	Subsidios, autonomía, disponibilidad de punto de carga, tasas de emisión, impuestos fiscales, precio de compra, costos operativos, máxima velocidad, disponibilidad de combustible, emisiones, autonomía, localización de reabastecimiento.
	Higgins et al., 2012	Relación Costo/Beneficio, desempeño, estatus, riesgo, características psicológicas y demográficas
	Egbue y Long, 2012	<u>Demográficos:</u> género, edad, ocupación, educación, ingresos, experiencia, familiaridad con la sostenibilidad, interés <u>Atributos:</u> autonomía, costo, infraestructura de reabastecimiento, seguridad, mantenimiento, emisiones, comodidad, mantenimiento
	Zubaryeva, Thiel, Barbone y Mercier, 2012	<u>Demográficos:</u> Ingresos per cápita, densidad poblacional <u>Ambientales:</u> Emisiones <u>Economía:</u> Ahorros del costo del combustible, incentivos del estado, proyectos existentes, disponibilidad de la infraestructura <u>Energía:</u> Tasa de aprendizaje de la tecnología, seguridad energética. <u>Transporte:</u> Densidad de vehículos (carros/1000 habitantes), forma de desplazamiento
	Ito, Takeuchi y Managi 2013	Velocidad de reabastecimiento, estaciones de reabastecimiento, costo anual de reabastecimiento, precio del vehículo, costo de mantenimiento
	Li et al. 2013	Seguridad energética, ambiente, características de la tecnología, disponibilidad de combustibles y factores demográficos

Fuente: elaboración propia.

A partir de la Tabla 1-1 es posible afirmar que la difusión de una innovación es influenciada por múltiples factores que de forma general pueden ser agrupados, como lo propone Wejnert, en características de la innovación, características de los innovadores y características del ambiente. Siguiendo esta clasificación, en el caso de vehículos con fuentes alternativas, se destacan en cada categoría por su recurrencia en las investigaciones reportadas los siguientes atributos:

- i. *Características de la innovación:* precio de compra, costo del combustible, autonomía, emisiones, disponibilidad de abastecimiento y tiempo de reabastecimiento.
 - ii. *Características de los innovadores:* condiciones socioeconómicas y características demográficas.
 - iii. *Características del ambiente:* Políticas e incentivos, cultura y exposición a diferentes plataformas (mercadeo, comunicación masiva y boca a boca).
- e. ¿Cuáles son las barreras que dificultan el ingreso de vehículos con fuentes alternativas al mercado?

En la revisión de la literatura es posible identificar múltiples factores que actúan como barreras a la penetración de los vehículos con fuentes alternativas en los mercados (Wiedmann et al. 2011). De hecho, las investigaciones sobre vehículos de tecnologías limpias se han enfocado en el análisis de dichas barreras (Cadavid y Franco 2010). En la Tabla 1-2 se resumen algunas de las barreras encontradas en las investigaciones recientes. En la primera columna se presenta el nombre del autor y el año de la investigación, en la segunda columna se listan las barreras reportadas en la investigación analizada.

Tabla 1-2: Barreras al ingreso de vehículos con fuentes alternativas.

Autor	Barreras identificadas
Montalvo, 2008	Economía, mercado, actitudes y valores sociales, oportunidades tecnológicas, marco regulatorio, rol de los consumidores
Franco y Figueroa, 2008	Competitividad, desarrollo e investigación, precio del vehículo, almacenamiento de combustible, seguridad y responsabilidad, costo de las fuentes, estaciones de servicio limitadas
Steenberghen y López, 2008	<u>Políticas:</u> falta de legislación específica <u>Tecnológicas:</u> falta de información técnica, desempeño comparable a un costo comparable <u>Financieras:</u> costos de capital, costo de implementación, costo del combustible relativo al convencional <u>Otras:</u> sistema de oferta y distribución, larga vida útil del vehículo, acceso a la infraestructura, distribución y almacenamiento, disponibilidad de información
Eppstein, Grover, Marshall y Rizzo, 2011	Precio de compra, precio de la gasolina, autonomía de la batería, capacidad de los consumidores de evaluar con precisión los costos de los combustibles alternativos, nivel de comodidad de los consumidores de vehículos en adoptar la nueva tecnología, peso relativo que los consumidores dan a la racionalidad financiera vs. otras razones para ahorrar gasolina

Continúa en la siguiente página

Continúa de la página anterior

Autor	Barreras identificadas
Zubaryeva, Thiel, Barbone y Mercier, 2012	Limitaciones tecnológicas de la batería, altos costos de la batería, falta de conocimiento, altos costos iniciales y baja tolerancia al riesgo, eficiencia energética, precio, beneficios financieros, precio inicial, conciencia ambiental
Kwon, 2012	Costos operacionales
Browne, O'Mahony y Caulfield, 2012	<p><u>Financieras:</u> precio del vehículo, costos operacionales, costos de conversiones o modificaciones, precio de combustible fósil, precio de combustible alternativo, costo de la capacidad de almacenamiento y estaciones, costo de infraestructura, costos de producción, subsidios inadecuados</p> <p><u>Técnicas y disponibilidad del mercado:</u> barreras tecnológicas, barreras de infraestructura, disponibilidad incierta de materia prima, disponibilidad de fuentes alternativas y vehículos, autonomía limitada, promoción y marketing inadecuados, disponibilidad de técnicos calificados</p> <p><u>Institucionales y administrativas:</u> resistencia administrativa, aversión al riesgo de nuevas tecnologías, resistencia al cambio.</p> <p><u>Aceptación pública:</u> deben ofrecer atributos funcionales inferiores a las tecnologías y los energéticos existentes, infraestructura suficiente, mantenimiento, soporte y reabastecimiento no disponible, fuera del alcance del consumidor promedio, preocupación por la seguridad, impactos ambientales, económicos o sociales desfavorables, percibidos en términos de imagen desfavorable, inercia y escepticismo del público, bajo nivel de visibilidad, falta de conciencia.</p> <p><u>Regulatorias y legales:</u> diferencias regulatorias, barreras a la comercialización, desafíos legales potenciales, restricciones de planeación, falta de estándares regulatorios consistentes, señales políticas débiles o inconsistentes</p> <p><u>Fallas políticas o resultados indeseados:</u> impactos económicos, sociales o económicos que pueden ocurrir con la implementación de la política, programas diseñados inadecuadamente.</p> <p><u>Barreras físicas:</u> restricciones en la disponibilidad de materias primas que afectan la producción global</p>

Fuente: elaboración propia.

A partir de la Tabla 1-2 es posible clasificar las barreras en 5 categorías: financieras, regulatorias y legales, técnicas y tecnológicas, aceptación pública y disponibilidad de mercado, para agrupar los diferentes obstáculos que podría tener la difusión vehículos con fuentes alternativas. Siguiendo esta clasificación, se destacan, en cada categoría, por su recurrencia en las investigaciones reportadas las siguientes barreras:

- i. *Financieras:* Precio del vehículo, costo de combustible alternativo frente al convencional, costo de capital, costos operativos
- ii. *Regulatorias y legales:* Marco regulatorio, falta de legislación específica, restricciones de planeación, falta de estándares regulatorios consistentes, señales políticas débiles o inconsistentes
- iii. *Técnicas y tecnológicas:* Competitividad, desarrollo e investigación, almacenamiento de combustible.

- iv. *Aceptación pública*: Actitudes y valores sociales, conciencia ambiental, disponibilidad de información, resistencia al cambio, aversión al riesgo de nuevas tecnologías, bajo nivel de visibilidad, inercia y escepticismo público
 - v. *Disponibilidad de mercado*: Estaciones de servicio limitadas, acceso al sistema de oferta, distribución y almacenamiento.
- f. ¿Cuáles son los mecanismos existentes para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas?

La difusión de vehículos particulares con fuentes alternativas hace parte de los tópicos que aportan a la transición hacia la movilidad sostenible (Shafiei et al. 2013), dicha transición requiere de cambios políticos (Dijk, Orsato y Kemp 2012) e institucionales (Köhler et al. 2009; Markard, Raven, y Truffer 2012).

Los resultados de las investigaciones realizadas han encontrado que el desafío principal para la transición a vehículos con fuentes alternativas consiste en romper las barreras creadas por la industria de los vehículos tradicionales (Struben y Sterman 2008). De hecho, tales barreras constituyen puntos de apalancamiento (Eppstein et al. 2011) con los que se podría incentivar de forma apropiada la penetración de mercado de los vehículos (Zubaryeva et al. 2012). Se espera que a medida que se rompan las barreras se logre una mayor penetración del mercado. Teniendo en cuenta lo anterior, las políticas diseñadas para incentivar la preferencia por vehículos con fuentes alternativas deben estar orientadas en principio a romper dichos obstáculos. En general, las decisiones políticas que consideran tales elementos críticos han tenido un alto nivel de éxito (Egbue y Long 2012).

Existen opciones políticas para romper la estructura cerrada del mercado de vehículos (Kwon 2012). Generalmente se requiere una combinación de estrategias y medidas para aumentar la efectividad y alcanzar el objetivo (Steenberghen y López 2008). Las políticas de largo plazo deben ser adaptativas y abiertas al cambio tecnológico (Bleischwitz y Bader 2010). Según Foxon y Person los dos principios guía para mejorar el proceso de políticas de innovación sostenible son: 1. Simular el desarrollo de la política, y 2. Tener en cuenta la complejidad e interacciones sistémicas de la innovación y el proceso de toma de decisiones aplicando pensamiento sistémico para promover la transición a la

sostenibilidad (Montalvo y Kemp 2008). En la Tabla 1-3 se resumen las principales estrategias identificadas en la literatura.

Tabla 1-3: Estrategias identificadas para superar las barreras.

Autor	Estrategias
Åhman, 2006	<p><u>Soporte a investigación y desarrollo para el vehículo y componentes:</u> Investigación y desarrollo en tecnologías básicas, demostraciones y prototipos, producción y desarrollo temprano</p> <p><u>Soporte a infraestructura para suministro futuro del energético:</u> apoyo financiero, proyectos de estaciones ecológicas</p> <p><u>Soporte al mercado:</u> leasing e incentivos de compra, búsqueda de público, subsidios, marketing</p>
Montalvo, 2008	<p><u>Políticas de comando y control:</u> cargos, impuestos, impuestos de emisión, impuestos al producto, impuestos administrativos, subsidios, depósitos, incentivos financieros, asistencia financiera</p> <p><u>Políticas voluntarias:</u> rol de las comunidades y presión social</p> <p><u>Instrumentos económicos:</u> estándares que limitan la cantidad de emisiones</p>
Steenberghen y López, 2008	<p><u>Incentivos de mercado:</u> Medidas de precio de combustible (incentivos fiscales, impuestos diferenciados), incentivos de impuestos y créditos para tecnologías eficientes</p> <p><u>Políticas de objetivos tecnológicos y eficiencia vehicular:</u> estándares regulatorios, acuerdos voluntarios</p> <p><u>Mejoramiento del sistema completo:</u> Medidas de información (sobre riesgos, incertidumbres y oportunidades), inversiones en investigación y desarrollo</p>
Bleischwitz y Bader, 2010	<p><u>Políticas energéticas:</u> ETS (emission trading scheme), políticas de eficiencia energética, políticas de energía renovable.</p> <p><u>Políticas regulatorias:</u> Impuestos energéticos</p> <p><u>Políticas de gasto público:</u> políticas regionales (cohesión social y económica)</p>
Santos, Behrendt, Maconi, Shirvani, y Teytelboym, 2010	<p><u>Estrategias de tipo fiscal:</u> son impulsadas por el gobierno y definen el marco regulatorio que crea incentivos para que las personas tomen decisiones de transporte sostenible: impuestos, subsidios, cargos y estándares</p>
Santos, Behrendt, y Teytelboym, 2010	<p><u>Estrategias de tipo físico:</u> políticas como un instrumento de infraestructura física. integración con el transporte público, uso de la tierra, construcción de vías y construcción de estaciones de abastecimiento.</p> <p><u>Estrategias de tipo suave:</u> tienen como propósito inducir cambios en el comportamiento informando a los decisores de las consecuencias de sus acciones y persuadiéndolos de forma potencial sobre cambios en el comportamiento. Uso de herramientas publicitarias y mercadeo</p> <p><u>Estrategias de conocimiento:</u> hacen énfasis en el importante rol de la investigación y desarrollo para un modelo sostenible de movilidad para el futuro</p>
Kloess y Müller, 2011	<p><u>Impuestos:</u> al vehículo, al propietario del vehículo y al combustible</p>
Eppstein, Grover, Marshall, y Rizzo, 2011	<p>Etiquetas de precios bajos, Investigación y desarrollo, estimador de costos de combustible fácil de usar, Proveer garantías a las baterías, opciones de arrendamiento de baterías y reposición, usar anuncios publicitarios para aumentar la conciencia ambiental de la población. Reducir los impuestos a VFA, crear impuestos flexibles a la eficiencia del combustible, Incentivos para precios bajos de VFA, Impuestos a la gasolina, mantener los costos de electricidad bajos relativos al precio de la gasolina.</p>
Kwon, 2012	<p>Subsidio al precio de vehículo, subsidio a los costos operativos, gestión del nicho de mercado estratégico</p>
Shepherd, Bonsall, y Harrison, 2012	<p>Subsidios, proyectos demostrativos</p>

Continúa en la siguiente página

Continúa de la página anterior

Autor	Estrategias
Densing, Turton, y Bäuml 2012	Nicho de mercado potencial, política de cambio climático, políticas para garantizar la disponibilidad de combustible
Browne et al., 2012	<u>Instrumentos regulatorios:</u> mandatos de energía renovable, estándares de combustibles bajos en carbono, estándares de emisión de vehículos <u>Instrumentos económicos:</u> subsidios, impuestos, incentivos, préstamos <u>Instrumentos de contratación pública:</u> adquisiciones publicas verdes, vehículos de transporte masivo <u>Instrumentos de colaboración:</u> Acuerdos voluntarios, asociaciones públicas y privadas. <u>Instrumentos de comunicación y difusión:</u> etiquetado de vehículos, campañas de educación y conciencia, programas de capacitación y publicidad en los medios de comunicación.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 1-3 es posible clasificar las estrategias en 5 categorías: fiscales y regulatorias, económicas y financieras, abastecimiento, comunicación y difusión, investigación y desarrollo. Se destacan en cada categoría por su relevancia y recurrencia en las investigaciones analizadas las siguientes:

- i. *Fiscales y regulatorias:* impuestos diferenciados, cargos, estándares, marco regulatorio
- ii. *Económicas y financieras:* subsidios, apoyo financiero, créditos para tecnologías eficientes
- iii. *Abastecimiento:* construcción de infraestructura
- iv. *Comunicación y difusión:* mercadeo, herramientas publicitarias, etiquetado de vehículos y proyectos demostrativos
- v. *Investigación y desarrollo:* mejoramiento de atributos técnicos y tecnológicos

1.3 Delimitación del problema de investigación

En las secciones anteriores se describieron diferentes aspectos de interés asociados a cada una de las líneas de investigación que abarca esta tesis de maestría; aun así es importante puntualizar y enfatizar algunas limitaciones y problemas vigentes:

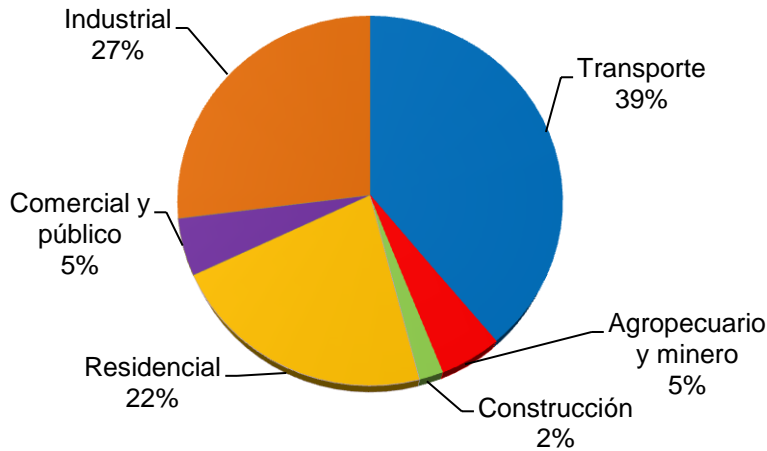
- a. Las características actuales del sector transporte y perspectivas de desarrollo futuro han hecho exista un creciente interés en el área de investigación enfocada en su evolución. Hasta hoy existen grandes interrogantes sobre cuál tecnología será la dominante. Se han desarrollado estudios aplicados a países desarrollados para responder a esta incógnita. Sin embargo, el análisis de países en desarrollo es un caso especial que requiere considerar características específicas de los mercados.

- b. Es posible identificar en la revisión de la literatura un creciente interés por el área de investigación enfocada en la evolución del sector transporte, teniendo en cuenta las características del sector y las perspectivas de desarrollo futuro. En esa línea de acción es posible agrupar las investigaciones preocupadas por la penetración de vehículos con tecnologías limpias al mercado y el estudio de mecanismos para incentivar su difusión.
- c. Los desafíos para la investigación sobre el proceso de difusión de innovaciones consisten en integrar los enfoques de difusión y adopción, desarrollar nuevos modelos o probar los existentes para países en desarrollo, incorporar elementos de racionalidad limitada a las teorías y usar modelos de difusión en aplicaciones prácticas para industrias específicas.
- d. Pese a que se han desarrollado importantes investigaciones en la identificación de estrategias para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas, poco se sabe aún de la efectividad de las políticas propuestas en la reducción de emisiones y en la difusión de los vehículos con fuentes alternativas en los mercados en desarrollo.

En resumen en cada una de las líneas de investigación hay algunos elementos que están por resolver y constituyen la base del problema de investigación que se analiza en esta tesis. En relación al panorama del sector transporte, no se conoce qué tecnología dominará el sector vehículos particulares en países en desarrollo. Asociado a la difusión y adopción de innovaciones es posible identificar que no se sabe cómo será el proceso de difusión de las nuevas tecnologías en países en desarrollo. Y en relación con la evaluación de políticas, no se ha estudiado cuál es la efectividad de los instrumentos diseñados para incentivar la difusión del transporte particular bajo en carbono en países en desarrollo.

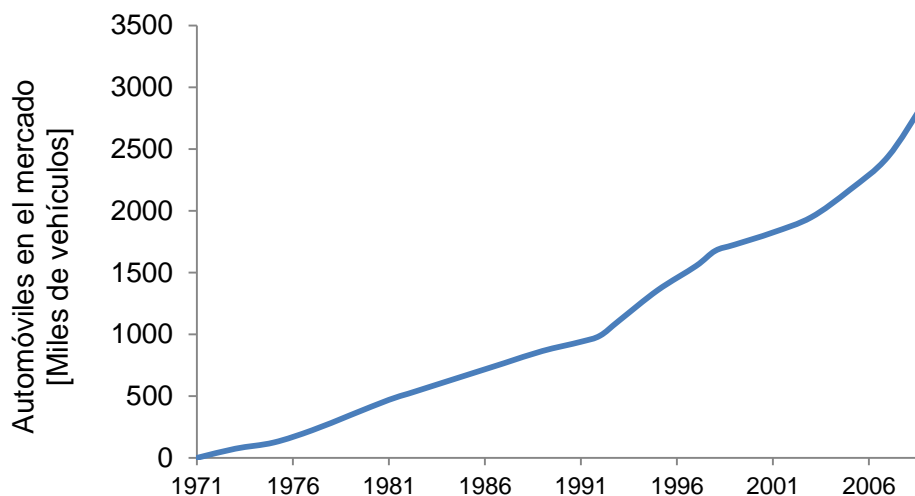
Esta tesis recoge algunos de esos interrogantes y se centra en evaluar mecanismos para incentivar difusión de vehículos particulares con fuentes alternativas en el mercado Colombiano. En Colombia, como se muestra en la Figura 1-2, el sector transporte es el primer sector en consumo energético (39%), seguido de los sectores industrial (27%) y residencial (22%) (UPME 2010a).

Figura 1-2: Distribución sectorial del consumo final de energía. Elaboración propia con datos de (UPME 2010a)



En este mercado, como se muestra en la Figura 1-3, el parque automotor ha tenido un rápido crecimiento en las últimas cuatro décadas. Dicho crecimiento ha sido impulsado esencialmente por el desarrollo económico (UPME 2010b). Además, este sector está caracterizado por una tradicional dependencia de los combustibles fósiles (gasolina y diesel). El consumo de gasolina está principalmente dirigido al movimiento de pasajeros (90.1%) mientras que el consumo de diesel está orientado al movimiento de carga (69.4%).

Figura 1-3: Evolución del parque automotor en Colombia. Elaboración propia con datos de (UPME 2010b)



Este panorama, acompañado por la preocupación acerca del cambio climático y los altos niveles de contaminación y ruido en las ciudades han llevado a considerar los vehículos dedicados y convertidos a gas natural y los vehículos eléctricos de conexión como opciones para la movilidad particular baja en carbono en el futuro (MAVDT 2011). Lo anterior enmarcado en el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 que incluye entre sus retos el desarrollo de esquemas eficientes y sostenibles de movilidad urbana (Colombia 2011; DNP 2011).

Los vehículos convertidos a gas natural fueron introducidos en el mercado hace 15 años, tienen una red de distribución limitada y han sido promovidos por diferentes acuerdos de cooperación entre entidades públicas y privadas (Vergara 2009), hoy se pretende además impulsar la compra de vehículos dedicados a gas. En relación a los vehículos eléctricos de conexión, hasta ahora el sector energético y algunas compañías automovilísticas han firmado acuerdos de cooperación para introducir 250 vehículos al mercado como una prueba piloto, esto tiene el propósito de valorar y analizar la viabilidad del mercado (CODENSA 2011; EPM 2011).

Con base en lo anterior, en esta investigación se estudiará, inicialmente, la dinámica de la difusión de los vehículos dedicados y convertidos a gas y los vehículos eléctricos de conexión en el mercado colombiano, teniendo en cuenta las características actuales del mercado y las expectativas con el ingreso de vehículos eléctricos al sistema. Posteriormente, se evaluarán estrategias para incentivar la difusión de estas tecnologías. Es un problema que vale la pena investigar por las siguientes razones:

- a. Es posible identificar en la revisión de la literatura que existe interés en el tema, está asociado a algunas de las preocupaciones más relevantes de las áreas de investigación.
- b. Además, busca aumentar el entendimiento del fenómeno estudiado: al examinar el impacto del tiempo en la naturaleza del problema a través de un modelo y replicar investigaciones hechas considerando otros entornos y variables.
- c. Finalmente, impactará investigaciones futuras asociadas a la temática en Colombia.

Su alcance delimita un problema de maestría con énfasis en investigación porque su análisis implica el desarrollo de un modelo novedoso que brinda una nueva explicación

del comportamiento del sistema de interés y requiere la aplicación de metodologías de investigación.

1.4 Aproximaciones metodológicas al análisis del problema de difusión de vehículos con fuentes alternativas

La difusión de innovaciones, en general, es un fenómeno complejo, que está caracterizado por agentes que desarrollan diferentes actividades: interactúan entre sí y con su entorno, responden a lo que sucede a su alrededor y pueden hacer cosas a propósito. Además, en el proceso de difusión un cambio en los agentes o sus estrategias afecta el comportamiento futuro del mismo de una manera no predecible. Una de las fuentes de la complejidad es la interacción entre los diferentes agentes que conforman el sistema (Bossomaier y Green 2000). De hecho, en un sistema complejo, las propiedades que emergen en un nivel superior son resultado de las interacciones entre los elementos del mismo (Holland 2002).

En la literatura son varios los autores que se han referido a la difusión de vehículos con fuentes alternativas como un fenómeno complejo. Para Peres, Muller y Mahajan (2010) además de complejo, es un fenómeno de alta incertidumbre. Según Zhang, Gensler y Garcia (2011), es un fenómeno complejo en que se evidencian las interdependencias entre diferentes participantes de la industria automovilística: manufactureros, consumidores y agencias gubernamentales. Por su parte, Shepherd, Bonsall y Harrison (2012) afirman que su complejidad se caracteriza por presentar dinámicas no lineales, interacciones y realimentaciones entre las variables. Según Lee et al (2013) la complejidad de la difusión está asociada a los efectos cíclicos de realimentación entre los atributos de las alternativas y el tamaño del mercado.

El análisis de fenómenos complejos, como el de la difusión de vehículos con fuentes alternativas ha gozado de interés académico y práctico. Dicho análisis requiere la aplicación de una metodología de investigación que considere apropiadamente las características del fenómeno. En esta sección se revisan las aproximaciones metodológicas para el análisis del problema bajo estudio y se selecciona una de ellas como herramienta del proceso de investigación.

El modelado del problema de investigación ayuda a explicar y comprender la dinámica y las características complejas del problema (Epstein 2008). Existen diferentes metodologías de modelado de problemas complejos, como el que se aborda en este estudio, en el cual se explora la transición hacia fuentes energéticas alternativas en transporte. En una revisión reciente, sobre la aplicación de modelos del sistema energético para diseñar una sociedad baja en carbono, desarrollada por Nakata, Silva y Rodionov (2011), se clasifica los modelos existentes según la metodología en: econométricos, macroeconómicos, de equilibrio económico, optimización, simulación y multicriterio. En la Tabla 1-4 se resumen las principales características y usos de cada uno de ellos. La tabla está organizada así: en la primera columna se muestra el tipo de metodología, en la segunda columna las características y en la tercera los usos.

Tabla 1-4: Resumen de las características y usos de modelos clasificados según su metodología

Modelos según metodología	Características	Usos
Econométricos	Aplican métodos estadísticos para extrapolar el comportamiento pasado al futuro	Predecir la tendencia de cierto parámetro en el futuro tan bien como sea posible
Macro-económicos	Se enfocan en la economía completa de una sociedad y la interacción entre sectores con una visión de corto y mediano plazo	Desarrollados con propósitos de exploración para representar las relaciones entre recursos, capital y trabajo.
Equilibrio económico	Son modelos de asignación de recursos que estudian la interacción entre el sector energético y la economía en el mediano y largo plazo.	Estimar el equilibrio entre la oferta y la demanda de recursos en un mercado
Optimización	Optimizar las decisiones, para alcanzar objetivos específicos bajo ciertas restricciones	Desarrollar estrategias óptimas para planear y analizar el sistema con el fin de alcanzar las metas de reducción de emisiones
Simulación	Modelos descriptivos basados en la representación lógica del sistema para reproducir su comportamiento.	Comprender y explicar un fenómeno Reproducir la dinámica histórica de un comportamiento y explorar el futuro Descubrir y formalizar algunas teorías
Multi-criterio	Consideran diferentes criterios cualitativos y cuantitativos en el análisis de las decisiones.	Analizar las decisiones en el sistema.

Fuente: elaboración propia a partir de los trabajos de Nakata et al (2011), y Gilbert y Troitzsch (2005)

Mientras que la Tabla 1-4 describe el panorama general sobre metodologías de modelado de la transición hacia una economía baja en carbono, la Tabla 1-5 presenta un resumen de la literatura relevante en la que se desarrollan modelos para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en los mercados, de tal forma particulariza

los modelos aplicados al problema de investigación. La tabla está organizada como sigue: en la primera columna aparecen los autores, en la segunda el año, en la tercera la metodología usada y en la cuarta el objetivo de la investigación desarrollada.

Tabla 1-5: Resumen de modelos para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas

Autores	Año	Metodología	Objetivo
Anandarajah, G., McDowall, W., y Ekins, P.	2013	Simulación	Estudiar escenarios de largo plazo para la descarbonización del sector transporte con hidrógeno y electricidad
Axsen J, Kurani KS	2010	Multicriterio	Explorar el rol de las influencias sociales en la adopción de vehículos eléctricos de conexión para anticipar el impacto energético de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en California.
Bandivadekar AP.	2008	Multicriterio	Estimar las tasas de penetración de mercado de vehículos con fuentes alternativas en Estados Unidos
Baptista, P., Tomás, M., y Silva, C	2010	Simulación	Analizar el impacto del incremento en la participación del mercado de los vehículos de celdas de hidrógeno en términos del consumo energético y el CO ₂
Bento, N.	2010	Simulación	Analizar la difusión de vehículos de hidrógeno y los vehículos eléctricos.
Brownstone, D., Bunch, D. S., y Train, K	2000	Multicriterio	Analizar las preferencias de los consumidores por vehículos con fuentes alternativas a partir de modelos de elección discreta y encuestas de preferencias reveladas
Cao X.	2004	Simulación y Econometría	Modelar la participación de mercado de vehículos eléctricos híbridos en el mercado, incluyendo pronósticos de precios y predicción de la voluntad de los consumidores con la tecnología
Dagsvik, J. K., Wennemo, T., Wetterwald, D. G., y Aaberge, R	2002	Multicriterio	Analizar la demanda potencial de vehículos con fuentes alternativas
Densing, M., Turton, H., y Bäuml, G.	2012	Simulación	Explorar condiciones para el desarrollo exitoso de vehículos eléctricos con una perspectiva del sistema energético global
Dijk, M., Orsato, R. J., y Kemp, R.	2012	Simulación	Estudiar las trayectorias de una movilidad eléctrica emergente
Egbue, O., y Long, S.	2012	Multicriterio	Identificar las barreras de la difusión de vehículos eléctricos en el mercado a partir de las actitudes, percepciones y las preferencias de los consumidores
Eggers, F., y Eggers, F.	2011	Simulación	Estudiar las tasas de adopción de vehículos eléctricos a partir de sus factores críticos
Eppstein, M. J., Grover, D. K., Marshall, J. S., y Rizzo, D. M.	2011	Simulación	Estimar las tasas de adopción de vehículos eléctricos, definir barreras de entrada y formas de superarlas.
Franco, C. J., y Baena, A.	2010	Simulación	Explorar la dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Autores	Año	Metodología	Objetivo
Franco, C. J., y Figueroa, D.	2008	Simulación	Modelar la penetración de vehículos particulares con fuentes alternativas en el mercado colombiano
Hickman, R., Saxena, S., Banister, D., y Ashiru, O.	2012	Multicriterio	Examinar las tendencias futuras en transporte
Higgins, A., Paevere, P., Gardner, J., y Quezada, G.	2012	Multicriterio	Estimar la participación de mercado de los vehículos eléctricos al 2039 en Australia
Kloess, M., y Müller, A.	2011	Simulación	Explorar el impacto de políticas, precios energéticos y procesos tecnológicos en los vehículos de pasajeros en Australia
Kwon, T.	2012	Simulación	Investigar las barreras de mercado para incrementar la participación de mercado de vehículos con fuentes alternativas y las posibles opciones políticas para superarlos
Lambreson	2009	Simulación y econometría	Examinar la difusión de vehículos eléctricos a partir de los datos de otras innovaciones automovilísticas en Estados Unidos
Mabit, S. L., y Fosgerau, M.	2011	Simulación	Estudiar las decisiones de compra de vehículos con fuentes alternativas
Melaina, M., y Bremson, J.	2008	Simulación	Analiza la barrera de abastecimiento de combustible en la adopción de vehículos con fuentes alternativas: eléctricos e hidrógeno
Ou, X., Zhang, X., y Chang, S.	2010	Econometría	Analizar las tendencias en sector transporte y valorar el potencial de los vehículos con fuentes alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en China
Park, S. Y., Kim, J. W., y Lee, D. H.	2011	Simulación	Analizar los efectos de variables externas en la participación de mercado de vehículos eléctricos híbridos
Shafiei, E., Stefansson, H., Asgeirsson, E. I., Davidsdottir, B., y Raberto, M.	2013	Simulación	Modelar la transición hacia la movilidad sostenible y las tasas de participación de mercado de los vehículos eléctricos en Islandia
Shepherd, S., Bonsall, P., y Harrison, G.	2012	Multicriterio	Evaluar el comportamiento del consumidor y las actitudes hacia vehículos con fuentes alternativas
Sikes K, Gross T, Lin Z, Sullivan J, Cleary T, Ward J.	2010	Multicriterio	Estudio de introducción en el mercado de vehículos eléctricos híbridos de conexión para analizar la difusión de nuevas tecnologías en el mercado estadounidense bajo diferentes condiciones políticas y de mercado
Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., y van Wee, B.	2012	Simulación	Analizar la dinámica de los vehículos con fuentes alternativas a partir del ciclo de vida del producto y las eco innovaciones
Steenberghen, T., y López, E.	2008	Simulación	Estudiar las formas de superar barreras a la implementación de vehículos con fuentes alternativas en Europa
Stephens T.	2010	Simulación	Estimar la demanda de electricidad, la demanda de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la difusión de vehículos eléctricos
Struben, J. , y Sterman, J. D	2008	Simulación y multicriterio	Estudiar la difusión y competencia de vehículos con fuentes alternativas en el mercado ante diferentes escenarios

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Autores	Año	Metodología	Objetivo
Sullivan JL	2009	Simulación	Estimar las tasas de penetración de mercado para vehículos eléctricos híbridos y de conexión bajo diferentes condiciones de mercado, precios de combustibles y precios de vehículos.
Yeh, S.	2007	Simulación	Analizar políticas, instrumentos, incentivos, factores económicos asociados a la difusión de vehículos a gas
Zhang, T., Gensler, S., y Garcia, R.	2011	Simulación	Investigar factores que pueden acelerar la difusión de vehículos con fuentes alternativas

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de la literatura y el trabajo realizado por Al-Alawi y Bradley (2013)

A partir de la Tabla 1-5 es posible identificar que de los 34 estudios referenciados el 71% usa simulación como metodología, seguida de análisis multicriterio con un 28%. Un análisis agregado de las Tablas 1-4 y 1-5 lleva a considerar la simulación como la metodología apropiada para analizar el problema de difusión.

1.5 Objetivos.

En las secciones anteriores se han desarrollado los aspectos fundamentales que deberían tenerse en cuenta para evaluar estrategias con el fin de incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas. A partir de ellos, se establecen los objetivos de investigación que se presentan a continuación.

1.5.1 Objetivo general

Evaluar estrategias para incentivar un transporte particular bajo en carbono en Colombia a partir del análisis de la difusión de vehículos con fuentes energéticas alternativas.

1.5.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- i. Identificar y seleccionar los factores clave (tecnologías, fuentes energéticas, atributos y estrategias) para modelar la difusión de vehículos con fuentes alternativas que impulsen un transporte particular bajo en carbono.
- ii. Establecer los criterios de evaluación de las estrategias para incentivar un transporte particular bajo en carbono en Colombia.

-
- iii. Desarrollar un modelo de simulación para analizar el proceso de difusión de vehículos particulares con fuentes energéticas bajas en carbono en el mercado colombiano.
 - iv. Formular, analizar y comparar los efectos de diferentes estrategias para incentivar el transporte particular bajo en carbono en Colombia de acuerdo a los criterios definidos.

1.6 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se analizaron los aspectos teóricos requeridos para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en los mercados tales como: tecnologías potenciales, barreras de ingreso al mercado, estrategias para incentivar la adopción. Además se plantearon las directrices que guiaron el desarrollo de la investigación. En los capítulos siguientes se muestra el desarrollo de la investigación y se analizan los resultados encontrados.

2. Metodología

En el capítulo anterior se han identificado diferentes elementos que definen el trabajo de investigación:

- inquietudes en el proceso de difusión de nuevas tecnologías en países en desarrollo,
- expectativas con el panorama futuro de vehículos particulares con fuentes alternativas en el mercado colombiano, y
- la falta de herramientas para evaluar la efectividad de los mecanismos diseñados para promover los vehículos con fuentes alternativas en el mercado.

Además se seleccionó la simulación como metodología apropiada para el análisis del problema. En este capítulo, inicialmente se selecciona un método de simulación para continuar con la investigación; en la Sección 2.1. Luego, en la Sección 2.2, se referencian los estudios que se han aproximado al análisis del problema en otros mercados usando el método seleccionado y se explican las limitaciones de dichos modelos para aplicarse al caso colombiano. Finalmente, en la Sección 2.3 se concluye.

2.1 Métodos de simulación para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas

En esta sección, se abordan dos aproximaciones para el modelado del problema identificado teniendo en cuenta que son los enfoques más destacados en las revisiones recientes sobre modelos de difusión de vehículos con fuentes alternativas usando simulación (Al-Alawi y Bradley 2013). Tales enfoques son: dinámica de sistemas y la simulación basada en agentes.

2.1.1 Dinámica de Sistemas

La dinámica de sistemas es un método de simulación para la comprensión y discusión de temas y problemas complejos, permite conservar la riqueza de los procesos reales, se basa en el conocimiento del problema, y revela la diversidad de los comportamientos dinámicos que se derivan de las diferentes políticas (Forrester 1995).

Desarrollar un modelo en dinámica de sistemas requiere seguir un proceso de modelado como el propuesto por Sterman (2000), el cual incluye las siguientes actividades:

- i. Identificación del problema
- ii. Formulación de la hipótesis dinámica
- iii. Construcción de un modelo de simulación
- iv. Validación del modelo
- v. Diseño y evaluación de políticas

La dinámica de sistemas ha sido usada como herramienta metodológica para el análisis de problemas de difusión de innovaciones y entre ellos específicamente algunos asociados con el sector transporte. A continuación se presentan varias justificaciones asociadas al uso de esta metodología presentadas por diferentes autores.

En 1998, Maier justificó la metodología porque representa la estructura fundamental del problema y permite desarrollar modelos para investigar el proceso de difusión. Estos modelos permiten aumentar la comprensión de la complejidad y la dinámica causada por los elementos que influyen sobre ella. Integrando una gran variedad de variables de decisión que se analizan bajo una estructura de mercado competitiva (Maier 1998).

Posteriormente, Milling (2002) justificó la metodología porque a través del modelado del objeto de investigación permite comprender de manera sólida el comportamiento observado y esperado del fenómeno, lo cual es indispensable para el análisis de estrategias.

Según Shepherd et al (2012) el enfoque de dinámica de sistemas es usado en muchas disciplinas para representar la interacción de elementos en sistemas dinámicos complejos y ha sido aplicado extensivamente a gestión de negocios y también en otras áreas como la industria automovilística. El enfoque presentado en su trabajo justifica el uso de dinámica de sistemas en la combinación de la dinámica no lineal de modelos de difusión y ciclos de realimentación. Los procesos de realimentación son modelados con flujos y niveles y son simulados para comprender los impactos de las decisiones y acciones además de hacer un análisis de parámetros endógenos y exógenos.

Por otra parte, Struben y Sterman (2008) justifican el uso de la dinámica de sistemas argumentando que la introducción exitosa de vehículos con fuentes alternativas es más difícil y compleja que la de muchos productos, tal dinámica está condicionada por ciclos de realimentación positivos y negativos incluyendo el boca a boca, la exposición social, el marketing, las economías de escala, el aprendizaje derivado de la experiencia entre otros. Siendo así, se hace necesario capturar un amplio grupo de interacciones y realimentaciones para determinar la dinámica de la difusión de vehículos alternativos y la dinámica de sistemas permite realizar esta tarea.

Posteriormente, Meyer y Winebrake (2009) plantearon que el ambiente de dinámica de sistemas es bueno para evaluar los sistemas de transporte y ha sido regularmente aplicado en la difusión de innovaciones y nuevas tecnologías, este ambiente permite desarrollar un modelo dinámico en el cual es posible explorar la transición de los vehículos convencionales a los alternativos considerando las diferentes realimentaciones y complejidades del sistema.

De manera más reciente, Bhushan (2013) justifica la metodología porque permite incorporar e integrar las variables críticas para mapear su interacción y explicar la dinámica inherente al sistema. Con esta metodología, la difusión es afectada por las variables estructurales del sistema y por influencias externas.

En estos artículos es posible identificar que la justificación del uso de dinámica de sistemas va más allá de la existencia de los sistemas complejos caracterizados por no linealidades, realimentaciones y retardos, implica explicar las relaciones directas con el sistema bajo análisis y las características particulares del problema que lo hacen candidato a ser modelado con dinámica de sistemas.

2.1.2 Simulación basada en agentes

El modelado basado en agentes es un tipo de simulación que se enfoca en la representación de los individuos en el sistema y sus interacciones con otros y el ambiente. Los individuos son llamados agentes y pueden ser personas u organizaciones (Behdani 2012). Este método permite modelar la heterogeneidad de los agentes que puede derivarse de las reglas de decisión y sus atributos. Además, permite representar

los mecanismos de aprendizaje y comportamiento adaptativo, los cuales son importantes cuando se realiza una representación explícita del proceso de toma de decisiones, y adicionalmente, permite modelar aspectos espaciales (Behdani 2012).

Según Gilbert y Troitzsch (2005) desarrollar un modelo basado en agentes requiere seguir 8 pasos de modelado, los cuales son:

- i. Definir los tipos de objetos que serán incluidos en la simulación
- ii. Arreglar los diferentes tipos de objetos en clases jerárquicas
- iii. Definir los estados internos o atributos de cada objeto
- iv. Especificar el ambiente en el cual los objetos están localizados.
- v. Agregar la dinámica.
- vi. Estructurar los objetos y el ambiente en un programa de simulación.
- vii. Validar el modelo.
- viii. Realizar simulaciones y analizar los resultados.

La simulación basada en agentes ha sido usada para estudiar la difusión de múltiples innovaciones en los mercados, incluyendo el análisis de vehículos con fuentes alternativas. A continuación se presentan algunas justificaciones del uso de esta metodología presentadas por diferentes autores:

Zhang, Gensler y Garcia (2011) investigaron los factores que pueden acelerar la difusión de vehículos con fuentes alternativas a través de un modelo basado en agentes considerando que esta metodología provee la oportunidad de considerar las interdependencias inherentes entre los participantes claves en la industria automovilística: fabricantes, consumidores y agencias gubernamentales. Además, permite modelar las interacciones entre los múltiples agentes, cada uno con diferentes objetivos y provee un método para comprender la respuesta de los consumidores y fabricantes ante diversos cambios en el ambiente.

Para Garcia y Jager (2011) los modelos basados en agentes permiten comprender el fenómeno de difusión emergente a nivel macro a partir de las interacciones entre los individuos en un nivel micro. Esta metodología además permite contribuir con una mejor gestión de problemas de mercado reales.

Por otro lado, van Eck, Jager y Leeflang (2011) investigaron el rol de los líderes de opinión en el proceso de adopción de nuevos productos usando un modelo de simulación basado en agentes. Esta metodología es muy útil cuando la población es heterogénea (las reglas de los agentes y las características pueden ser definidas en un nivel individual) o cuando las interacciones entre los individuos es compleja y heterogénea. Así permite enfocarse en el rol de las diferencias individuales y las interacciones para explicar el proceso de difusión de innovaciones.

Otros autores, entre ellos Kiesling et al (2011), justifican la aplicabilidad del modelado basado en agentes puesto que opera a nivel individual y captura la complejidad del fenómeno emergente que es altamente relevante en la investigación de las difusiones. Los estudios anteriores aportan evidencia suficiente para afirmar que la simulación basada en agentes permite a partir de modelos desagregados estudiar la difusión de las innovaciones en los mercados.

En esta sección se han descrito dos técnicas de simulación con las cuales se ha estudiado el problema de investigación que abarca esta tesis. A continuación se comparan y se selecciona una de ellas para continuar con el estudio.

2.1.3 Comparación entre los métodos de simulación y elección del método a utilizar

Algunos autores han comparado la dinámica de sistemas y la simulación basada en agentes para el análisis de problemas sociales en general, entre ellos se destacan los trabajos de Rahmandad y Sterman (2008), Kiesling et al (2011) y Behdani (2012). En particular, para modelos de difusión de vehículos con fuentes alternativas, la revisión realizada por Al-Alawi y Bradley (2013) describe las características de cada uno de los métodos con que se ha estudiado el problema. Los principales aportes de estos estudios en la comparación de los métodos de simulación se resumen en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Resumen comparativo de las principales características de los métodos de modelado

Dinámica de sistemas	Simulación basada en agentes
Enfoque Top down	Enfoque Bottom up
Homogeneidad de las entidades del sistema, promedio que representa la población	Entidades heterogéneas.
Visión agregada de las interacciones en un sistema complejo	Los agentes pueden interactuar con el ambiente, con otros y tomar decisiones autónomas
Orientada al sistema, se enfoca en el modelado del sistema observable	Orientado al individuo, se enfoca en el modelado de las entidades y las interacciones entre ellos
El comportamiento dinámico del sistema se deriva de los ciclos de realimentación	El comportamiento dinámico del sistema emerge de las interacciones entre los agentes y sus decisiones individuales
La formulación matemática del sistema es a través de ecuaciones diferenciales que representan “niveles o flujos”	La formulación matemática del sistema es por “Agente y ambiente”
Usan la información a nivel de mercado	Requieren información de tipo individual

Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos de Rahmandad y Sterman(2008), Kiesling et al. (2011), Behdani(2012) y Al-Alawi y Bradley (2013)

La elección del método a utilizar se realizó a través de la comparación de las alternativas descritas en función de las características del problema bajo análisis y los factores requeridos para dar cumplimiento a los objetivos de investigación. Se calificaron las alternativas con valores de 1 a 3 donde 3 significa que el método es muy fuerte para este tipo de estudios, 2 significa que el método permite aproximarse al estudio pero no es su fuerte y 1 significa que el método no permite aproximarse al estudio. En la Tabla 2-2 se resumen los factores comparados. En ella se observa que la dinámica de sistemas resulta ser el más apropiado para cumplir con los requisitos de la investigación.

Los resultados del proceso comparativo indican que, para estudiar el problema de investigación descrito en el capítulo anterior, es pertinente desarrollar un modelo en dinámica de sistemas que permita analizar el comportamiento dinámico en el tiempo de la difusión de las nuevas tecnologías y evaluar diferentes políticas para incentivar la preferencia de los consumidores por vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano.

Tabla 2-2: Evaluación de los métodos de modelado para cumplir con los requisitos de la investigación

Requisitos de la investigación	DS	SBA
Comprender las características complejas del sistema bajo análisis	3	3
Tener una visión clara y holística del sistema bajo análisis	3	2
Estudiar las relaciones de causalidad entre las variables que afectan el sistema bajo análisis para entender la estructura del mismo.	3	2
Estudiar el proceso de elección de las tecnologías teniendo en cuenta los atributos de cada una.	2	3
Observar la dinámica de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado.	3	2
Analizar de la evolución del sistema a partir de los patrones de comportamiento	3	2
Evaluar políticas que afectan el sistema de forma endógena y exógena	3	2
Total	20	16

Fuente: Elaboración propia

El modelo será en dinámica de sistemas porque este método permite aproximarse al estudio de sistemas complejos caracterizados por múltiples ciclos de realimentación y no linealidades, además, permite tener una visión clara y holística que ayuda a entender la estructura del sistema y replicar el comportamiento del mismo con el objetivo de evaluar los efectos de las políticas propuestas.

Teniendo en cuenta que la difusión de tecnologías alternativas en el sector transporte puede analizarse a través de los ciclos de realimentación y retardos, la dinámica de sistemas se convierte en una herramienta de vital importancia para entender cómo funciona el sistema y los efectos que produce un cambio en sus variables. Esta herramienta permite visualizar las relaciones entre las variables de una manera más clara y simplificada, objetivo que es difícil de alcanzar si se estudiara a través de otros métodos debido a la complejidad y la multitud de factores que interactúan en el análisis de un sistema como este. Como resultado se facilita la generación de ideas y el diseño de políticas para que apoyen la toma de decisiones.

2.2 Estudios previos del análisis de la difusión de vehículos con fuentes alternativas usando el método seleccionado

En la sección anterior se seleccionó la dinámica de sistemas como método de simulación para abordar el problema de investigación que se analiza en esta tesis. En esta sección, se revisarán los modelos que han usado ese método para aproximarse al análisis de la evolución del sector transporte y se destacarán los aportes conceptuales de dichos modelos en la formulación, finalmente se identificarán las limitaciones que impiden explicar el análisis del mercado colombiano con los modelos existentes.

Algunos autores ya han usado la dinámica de sistemas para aproximarse al análisis de la evolución de sector transporte a partir del análisis de la adopción de vehículos con fuentes alternativas en países desarrollados. Entre ellos se destacan los trabajos de Struben y Sterman (2008), Meyer y Winebrake (2009) y Shepherd et al (2012). A continuación se describen los hallazgos más relevantes de esos modelos:

Struben y Sterman (2008) diseñaron un modelo dinámico de la difusión y competencia de vehículos con fuentes alternativas que vincula la evolución de la flota automotriz, diferentes tecnologías, análisis del comportamiento del consumidor y recursos complementarios. A pesar de que los autores no analizaron detalladamente estrategias para incentivar la difusión, afirman que los programas de marketing y subsidios deben permanecer durante largos periodos para que la difusión sea auto-sostenible.

Más tarde, Meyer y Winebrake (2009) modelaron la dinámica de la difusión de vehículos impulsados por hidrógeno en países industrializados. En su investigación encontraron que el desarrollo de una infraestructura de distribución apropiada es un elemento clave para incentivar una rápida difusión tecnológica.

Posteriormente, Shepherd et al (2012) desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas para analizar la difusión de vehículos eléctricos en el Reino Unido y se centraron en el análisis de los subsidios. Los resultados de la investigación indican que los subsidios en sí mismos tienen poco efecto sobre la decisión de adopción, pero, cuando se introducen

en un escenario de mercadeo, juegan un rol importante para una trayectoria de difusión exitosa.

Sin embargo, el comportamiento dinámico del mercado colombiano no se puede inferir a partir del análisis del mercado de países desarrollados teniendo en cuenta que Colombia es un país en desarrollo. Según Rouvinen (2006) el tiempo de adopción tecnológica y las tasas de penetración difieren considerablemente entre países desarrollados y en desarrollo. Las diferencias de entre los países asociados a las características culturales (Lee, Trimi y Kim 2013), nivel de ingresos, regulaciones y políticas influyen en los patrones de la difusión de una innovación (Lundvall et al. 2009; Da Silveira 2001). Todos estos elementos afectan las tasas de penetración en la industria (Chinn y Fairlie 2010) y tienen implicaciones en el desarrollo de estrategias para incentivar la difusión. Vale la pena considerar que los países en desarrollo son típicamente adoptadores tardíos, dado que como no son desarrolladores de las tecnologías, cuando la innovación tecnológica llega al país se han resuelto algunas incertidumbres asociadas con estándares y diseños dominantes, en consecuencia tienen patrones de difusión diferentes (Rouvinen 2006).

El análisis de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano requiere considerar esencialmente los siguientes puntos:

- En Colombia no se están desarrollando vehículos con fuentes alternativas. En consecuencia, no tiene sentido hablar de la influencia de la base instalada de vehículos o de subsidios del gobierno para mejorar los atributos tecnológicos de las alternativas como se muestra en los modelos de Struben y Sterman (2008), Meyer y Winebrake (2009) y Shepherd (2012).
- Las condiciones económicas, sociales, el marco regulatorio, la política e infraestructura del país son diferentes a las de un país desarrollado, en consecuencia, el entorno en el que se presenta la difusión es distinto.

Estas características impiden explicar el comportamiento del mercado a partir de los modelos diseñados para países desarrollados. Como consecuencia, el análisis del mercado colombiano requiere desarrollar un modelo original y novedoso que incorpore los elementos teóricos relevantes usados por otros investigadores para analizar otros mercados y que además considere las características específicas del mercado colombiano.

En Colombia, Franco y Figueroa (2008) realizaron una primera aproximación al análisis de la penetración de vehículos particulares con fuentes alternativas de energía al mercado colombiano. En su investigación, los autores incluyeron cinco fuentes energéticas: gasolina, diesel, etanol, gas natural vehicular y electricidad y estudiaron tres barreras de entrada: precio del vehículo, costo del energético y cantidad de estaciones de servicio. Encontraron que el corto plazo el mercado seguirá siendo dominado por los vehículos convencionales, seguidos del etanol E85 y una posible masificación del gas natural vehicular. Sin embargo, los autores no hacen explícita la consideración de elementos de racionalidad limitada para el modelado del proceso de toma de decisiones del consumidor.

Este contexto hace que la evaluación de políticas para incentivar el transporte particular bajo en carbono en Colombia implique el desarrollo de un modelo nuevo que considere diferentes atributos de las tecnologías, múltiples barreras de entrada e incorpore elementos de racionalidad limitada para explicar de forma adecuada el fenómeno de difusión.

2.3 Conclusiones del capítulo

En el capítulo anterior, se delimitó la problemática de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano como primer paso para evaluar las estrategias que permitan incentivar su adopción. En este capítulo, inicialmente se estudiaron las metodologías existentes a partir de sus características y usos. Además se exploraron tres métodos de modelado con sus ventajas y desventajas y se seleccionó la dinámica de sistemas como método apropiado para el análisis del problema en el mercado colombiano. Luego, se analizó la forma en que se ha abordado el problema en otros mercados, se identificaron algunas limitaciones que impiden la aplicación de los modelos existentes para el análisis del caso colombiano y se justificó la necesidad de desarrollar un modelo novedoso para estudiar el problema. En el próximo capítulo se describe el modelo de dinámica de sistemas construido para analizar la difusión de los vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano.

3. Modelo dinámico para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas

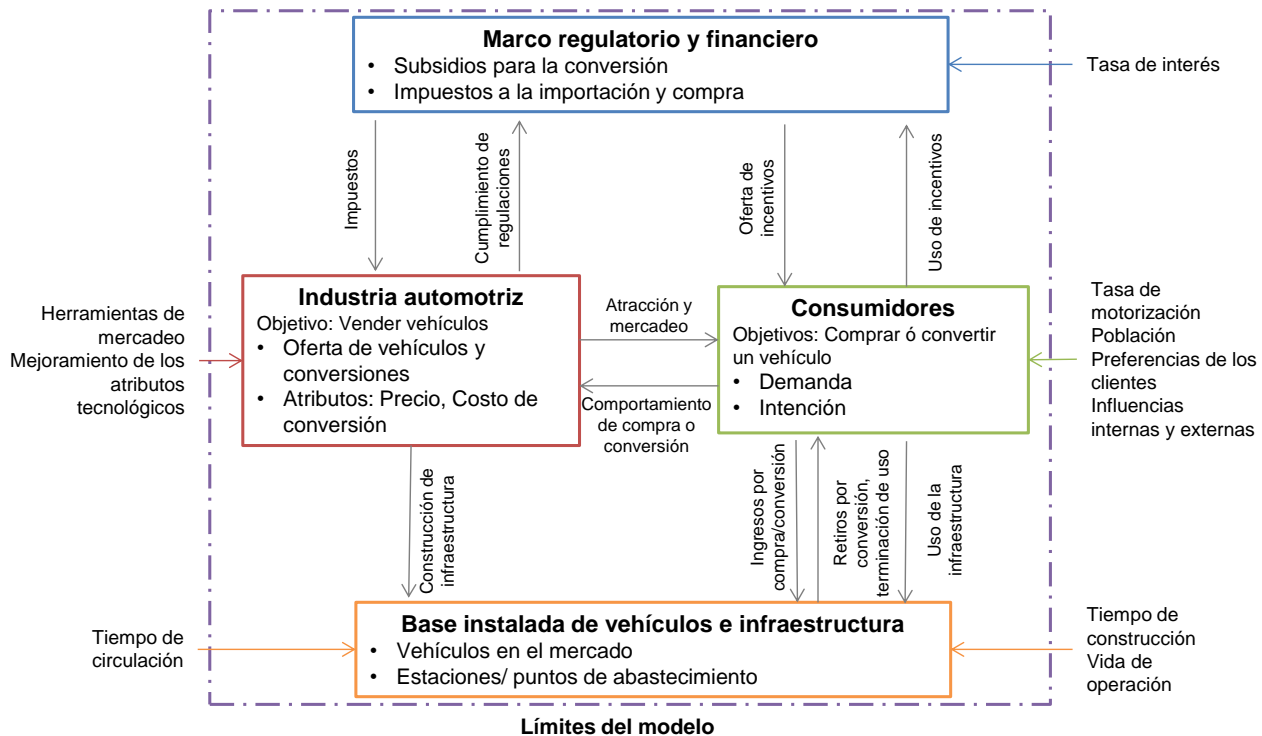
En el capítulo anterior se seleccionó la dinámica de sistemas como método de modelado para abordar el problema de investigación. Teniendo en cuenta que ningún modelo es una representación completa de la realidad sino una representación parcial que depende el uso previsto que las personas tienen para él (Pidd 1999), es posible afirmar que la delimitación del problema, presentada en el primer capítulo, orienta el diseño y construcción del modelo de simulación que se desarrolla en este capítulo, con el fin de analizar y proyectar el comportamiento dinámico de las variables más significativas del sistema bajo análisis. El modelo construido como resultado de este proceso, permitirá evaluar estrategias para promover la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano.

El objetivo de este capítulo es presentar los primeros cuatro (4) pasos del proceso de modelado. Para lograrlo, inicialmente, en la Sección 3.1 se usa la contextualización presentada en el capítulo 1 para presentar los límites del modelo. Luego, en la Sección 3.2 se formula la hipótesis dinámica básica que representa el problema de estudio. Posteriormente, en la Sección 3.3 se muestra la estructura dinámica a través de la presentación del modelo en el diagrama de flujos y niveles. Más adelante, en la Sección 3.4 se realiza el proceso de validación del modelo. Finalmente en la Sección 3.5 se concluye el trabajo realizado en el capítulo.

3.1 Límites del modelo

El modelo de simulación desarrollado vincula dinámicamente dos actores – “Industria automotriz” y “Consumidores” – que interactúan entre sí y con el entorno – “Base instalada de vehículos e infraestructura” y “Marco regulatorio y financiero” – así como parámetros endógenos y exógenos como se ilustra en la Figura 3-1.

Figura 3-1: Visión general del modelo. Inspirado en Walther et al (2010)



Este diagrama de bloques fue construido tomando como referencia la estructura presentada por Walther et al (2010) en el artículo *“Impact assessment in the automotive industry: mandatory market introduction of alternative powertrain technologies”*. En dicho artículo se desarrolló un modelo de simulación en dinámica de sistemas para examinar las estrategias fundamentales que los fabricantes de vehículos podrían usar para cumplir las nuevas regulaciones impuestas en el estado de California. En esta tesis de investigación se ajustó el diagrama de bloques, al renombrar algunos elementos, incluir nuevas variables, eliminar algunas de las existentes, agregar nuevas relaciones de interacción y suprimir otros vínculos, de modo que el diagrama modificado reflejara adecuadamente los límites del modelo construido, incluyendo los elementos requeridos para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado Colombiano. Un resumen de los cambios realizados se presenta en el Anexo B.

Vale la pena aclarar que el trabajo presentado por Walther et al (2010) únicamente fue usado como referencia para la construcción del diagrama de bloques que explica de manera gráfica la delimitación del sistema. Esto significa que el modelo de simulación construido como parte de esta tesis, y que se presenta en las secciones posteriores, es

completamente original y novedoso y no se parece al desarrollado por Walther et al (2010). En las cuatro subsecciones siguientes, se describe con mayor precisión cada uno de los componentes y se mencionan las relaciones de interacción existentes entre ellos.

3.1.1 Industria

El objetivo de la industria automovilística es vender o convertir vehículos. Para lograrlo, la industria ofrece sus productos y los promociona usando diferentes herramientas de mercadeo y comunicación. La industria automotriz a nivel mundial es el principal actor de la investigación y desarrollo orientada al mejoramiento de los atributos de las tecnologías aprovechando los efectos de las curvas de aprendizaje. En Colombia, la industria automotriz no es fabricante de vehículos con fuentes alternativas, luego los mejoramientos tecnológicos para las nuevas tecnologías son variables exógenas. La industria se relaciona con los demás módulos del sistema de formas diversas: debe cumplir el marco regulatorio y financiero establecido en el mercado, interactúa con los consumidores a través de las decisiones compra y la conversión y construye infraestructura para el abastecimiento de combustible de los vehículos en el mercado.

3.1.2 Consumidores

El objetivo de los consumidores es comprar o convertir un vehículo. Esas decisiones están influenciadas esencialmente por la atracción y familiaridad con las alternativas disponibles en el mercado. Los consumidores se relacionan con los demás módulos del sistema de formas diversas: Sus decisiones alteran la base instalada de vehículos, son los usuarios directos de la infraestructura, reciben información de la industria a través de herramientas de mercadeo que pueden influir en sus decisiones y acceden a los incentivos definidos por el marco regulatorio y financiero

3.1.3 Base instalada e infraestructura

Este componente integra la cantidad de vehículos en el mercado y la infraestructura necesaria para abastecerlos de combustible. En este módulo, la variable exógena tiempo de circulación influye sobre la base instalada. El tiempo de construcción y la vida útil de las estaciones afecta la infraestructura. La cantidad de estaciones se ve influenciada por

la construcción de infraestructura que realiza la industria. La base instalada cambia según las decisiones de compra y conversión que realizan los consumidores.

3.1.4 Marco regulatorio y financiero

En este módulo se recogen elementos esenciales para el desarrollo de políticas fiscales y financieras. La definición de la política de impuestos a la importación y las compras afecta las decisiones de los dos módulos con los que se relaciona: industria y consumidores. Los subsidios para la compra o conversión están orientados a los consumidores.

En cada uno de los módulos descritos se han mencionado distintos elementos que componen el sistema. Como parte del proceso de delimitación del sistema, es posible clasificar todos los elementos considerados para la construcción del modelo de simulación en dos categorías según la naturaleza dinámica del elemento en el tiempo: variable o parámetro. A su vez, las variables se pueden agrupar en dos categorías: endógenas, exógenas. Esta clasificación general permite evidenciar cuales son las variables y parámetros que se seleccionaron para desarrollar el modelo de simulación. En la Tabla 3-1 se presenta una doble clasificación de los elementos considerados, por columnas aparece la categoría del elemento: endógeno o exógeno. Por filas se presenta la clasificación según su naturaleza dinámica del elemento en el tiempo: variable o parámetro.

Tabla 3-1: Clasificación de los elementos considerados en la construcción del modelo

Elemento	Endógeno	Exógeno
Variable	Vehículos en el mercado	Tasa de motorización
	Compras	Población
	Conversiones	Autonomía
	Retiros	Base gravable (Precio)
	Oferta	Costos operacionales
	Probabilidad de compra	Emisiones
	Probabilidad de conversión	
	Cantidad estimada de vehículos en el mercado	
	Demanda potencial	
	Demanda esperada por tecnología	
	Atracción compra	
	Atracción conversiones	
	Intención compra	
	Intención conversión	
	Población con intención de comprar	

Continúa de la página anterior

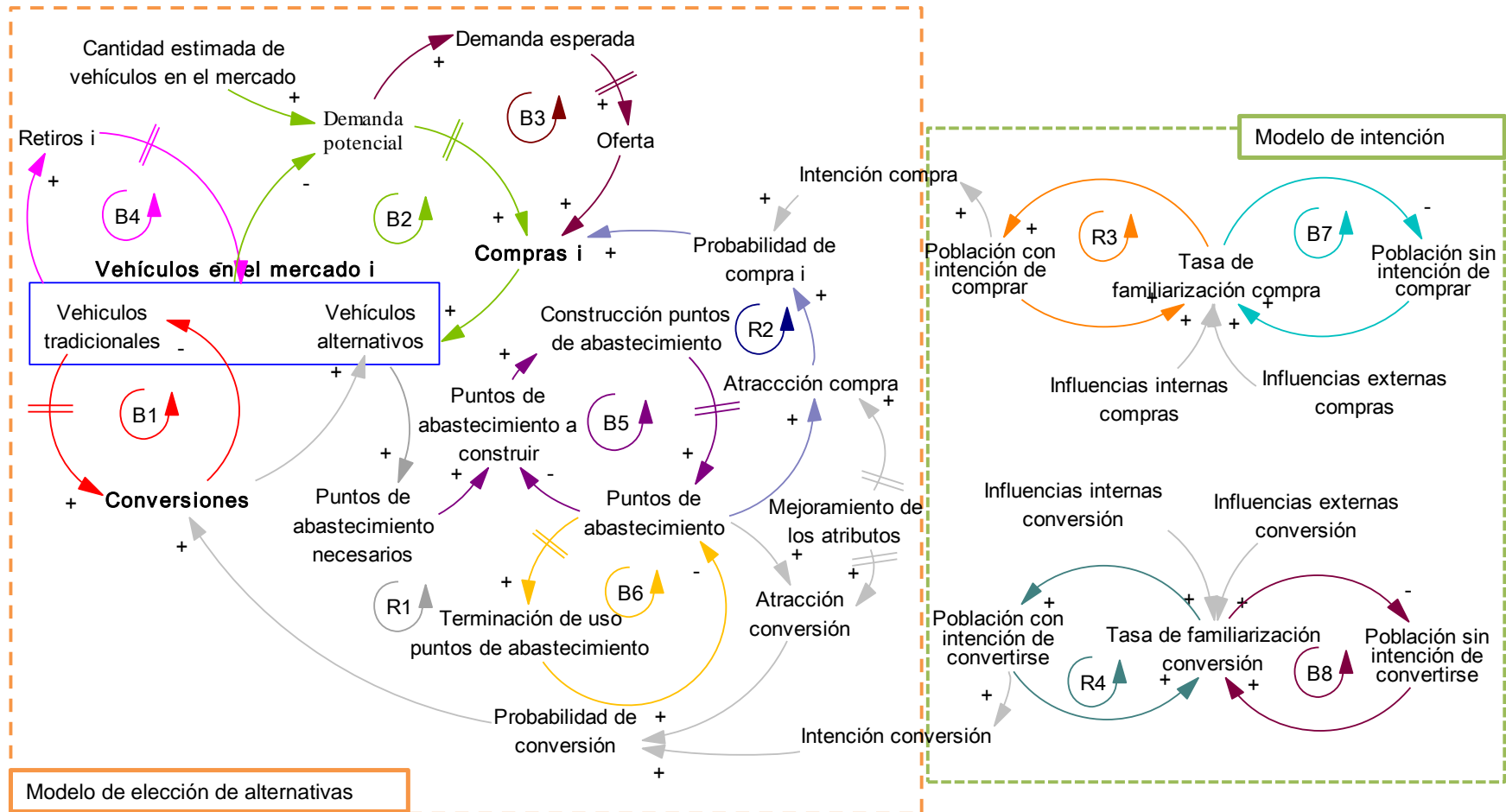
Elemento	Endógeno	Exógeno
Variable	Población con intención de convertirse	
	Tasa de familiarización compra	
	Tasa de familiarización conversión	
	Puntos de abastecimiento	
	Puntos de abastecimiento a construir	
	Puntos de abastecimiento necesarios	
	Construcción de puntos de abastecimiento	
Parámetro	Terminación de uso puntos de abastecimiento	
		Tiempo de circulación
		Vida de operación
		Tiempo de construcción de los puntos de abastecimiento
		Relación puntos de abastecimiento/vehículo
		Influencias externas
		Influencias internas
		Parámetros Beta
		Costo de conversión
		Tasa de interés
		Tiempo de amortización
	Tiempo de importación	
	Tiempo de abastecimiento	
	Impuestos (Precio)	

3.2 Hipótesis dinámica básica

En esta sección se presenta la estructura causal desarrollada para explicar el comportamiento de la difusión de vehículos con fuentes alternativas. En la Figura 3.2 puede observarse que la dinámica del sistema esta descrita por doce (12) ciclos de realimentación a través de los cuales se relacionan los diferentes elementos considerados en el modelado. En la figura se muestran cuatro (4) ciclos de refuerzo, en los cuales todas las relaciones causales son positivas, en consecuencia un cambio positivo refuerza el efecto en todas las variables del ciclo, y ocho (8) ciclos de balance en los cuales el número de relaciones causales negativas es impar, es decir, el cambio positivo contrarresta el efecto inicial de modo que el sistema se autoajusta.

Adicionalmente, en la Figura 3-2 se puede notar que el modelo construido es una herramienta que integra la intención de la población hacia la innovación con un modelo de elección de alternativas para analizar la difusión de vehículos particulares con fuentes alternativas. Los ciclos B1-B6, R1, R2 y algunas variables auxiliares definen el modelo de elección, mientras que los ciclos R3, R4, B7 y B8 representan el modelo de intención.

Figura 3-2: Estructura básica de realimentación de la difusión de vehículos con fuentes alternativas.



En esta figura se ilustran los doce ciclos de realimentación que definen la dinámica del sistema. En la parte derecha, enmarcado en color verde se observa el modelo de intención. En la parte izquierda, enmarcado en color naranja se delimita el modelo de elección de alternativas. En el recuadro azul, ubicado en la parte izquierda del diagrama, se ilustra la doble connotación que tienen los vehículos en el mercado (vehículos tradicionales y vehículos alternativos).

Las variables que enlazan los dos modelos son la Intención de compra y la Intención de conversión, que como se muestra en capítulos posteriores, son variables altamente influyentes en el éxito de la difusión pues filtran el proceso de decisión. En lo que resta de esta sección se describe y se analiza en detalle cada uno de los componentes del modelo a partir de los ciclos asociados. Las figuras de esta sección fueron elaboradas con ayuda del Software Vensim® PLE for Windows Version 5.11A from Ventana Systems, Inc.

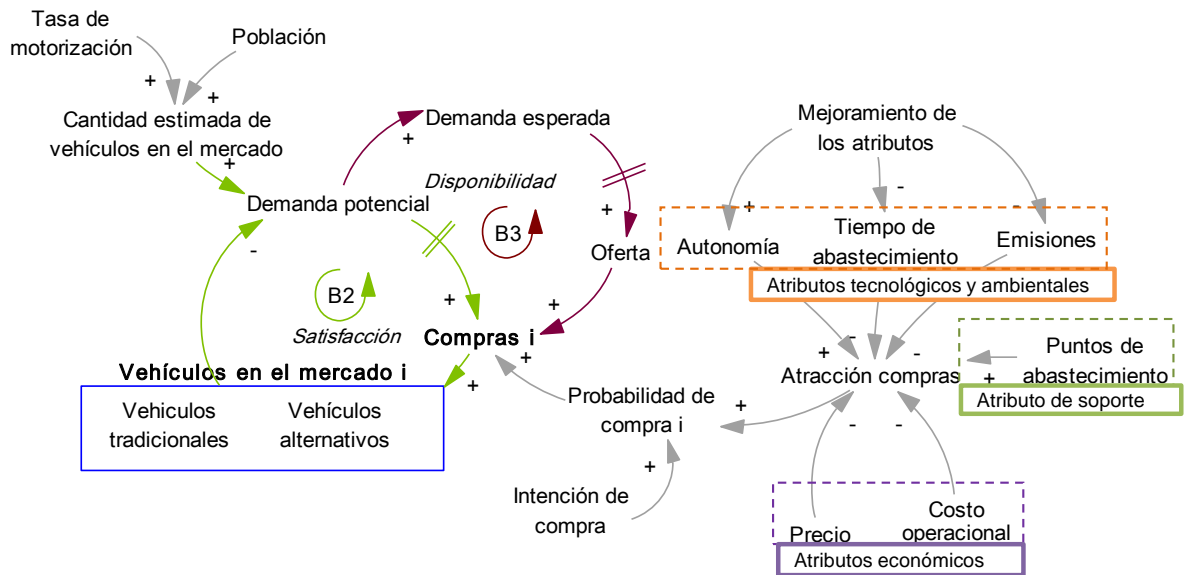
3.2.1 Modelo de elección de alternativas

El modelo de elección de alternativas permite entender cómo las decisiones modeladas; compras y conversiones, afectan la evolución del sistema de interés. Este modelo tiene en cuenta características de las alternativas, características de los decisores y también características del entorno como factores que afectan la decisión de adoptar la nueva tecnología. Además, en el modelo se incluyen los puntos de abastecimiento como uno de los elementos de la infraestructura de soporte requeridos para una difusión exitosa. En esta subsección se explica la construcción gradual de la hipótesis dinámica que define el modelo de elección de alternativas a partir de un análisis detallado de los seis ciclos de balance y dos ciclos de refuerzo que lo componen.

En la Figura 3-3 se observa una visión aislada del primer ciclo de balance “Cambio”. En esta figura vale la pena notar que los vehículos en el mercado fueron clasificados en dos categorías principales; vehículos tradicionales, que incluyen los vehículos impulsados por combustibles fósiles y vehículos alternativos representados por los vehículos dedicados y convertidos a gas y los vehículos eléctricos de conexión.

La dinámica de las conversiones, que se explica por el ciclo “Cambio” (B1), depende de la cantidad de vehículos tradicionales que hay en el sistema y la probabilidad de conversión. Tal probabilidad es una función de la intención que la población tenga con la conversión y la atracción de las conversiones, esta última representa la atracción derivada de los atributos de las alternativas. El ciclo B1 muestra uno de los dos efectos de incrementar las conversiones, este es una reducción de los vehículos tradicionales en el mercado. El otro efecto, se produce al mismo tiempo, y corresponde a un aumento de los vehículos alternativos.

Figura 3-4: Dinámica de las compras



El ciclo “Satisfacción” (B2), ilustra la forma en que se satisface la demanda potencial a través de las compras y describe un arquetipo de búsqueda de metas con oscilaciones, en el cual la demanda potencial es una diferencia entre la cantidad estimada de vehículos en el mercado y la cantidad real de vehículos en el mercado. A través de las compras de vehículos de diferentes tecnologías, el sistema busca llevar la cantidad de vehículos en el mercado hasta la meta establecida. La meta “cantidad estimada de vehículos en el mercado” es dinámica y se modeló como una función de la población y la tasa de motorización.

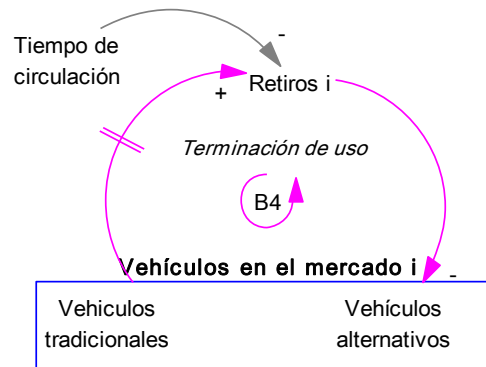
La oferta de vehículos en el mercado se modeló como función de la demanda esperada para cada tecnología retardada por el tiempo de importación. Las relaciones descritas se presentan en el ciclo “Disponibilidad” (B3). Este ciclo también es un arquetipo de búsqueda de metas en el cual la oferta busca la meta “cantidad estimada de vehículos en el mercado” para lograr de este modo satisfacer las compras en cada periodo del tiempo.

La probabilidad de compra de cada tecnología es una función de la intención de compra que los consumidores tengan con las alternativas disponibles en el mercado y la atracción de las compras que se deriva de los diferentes atributos. La atracción de las compras, como en el caso de las conversiones, se modeló a través de un modelo de elección discreta de tipo logit multinomial, en este caso, se incluyó el precio del vehículo

como un atributo económico y se eliminó el costo de la conversión. Los demás atributos (tecnológicos y ambientales, de soporte y económicos) se conservaron para el proceso de cálculo. También, al igual que en las conversiones, el mejoramiento de los atributos de las alternativas aumenta su atracción.

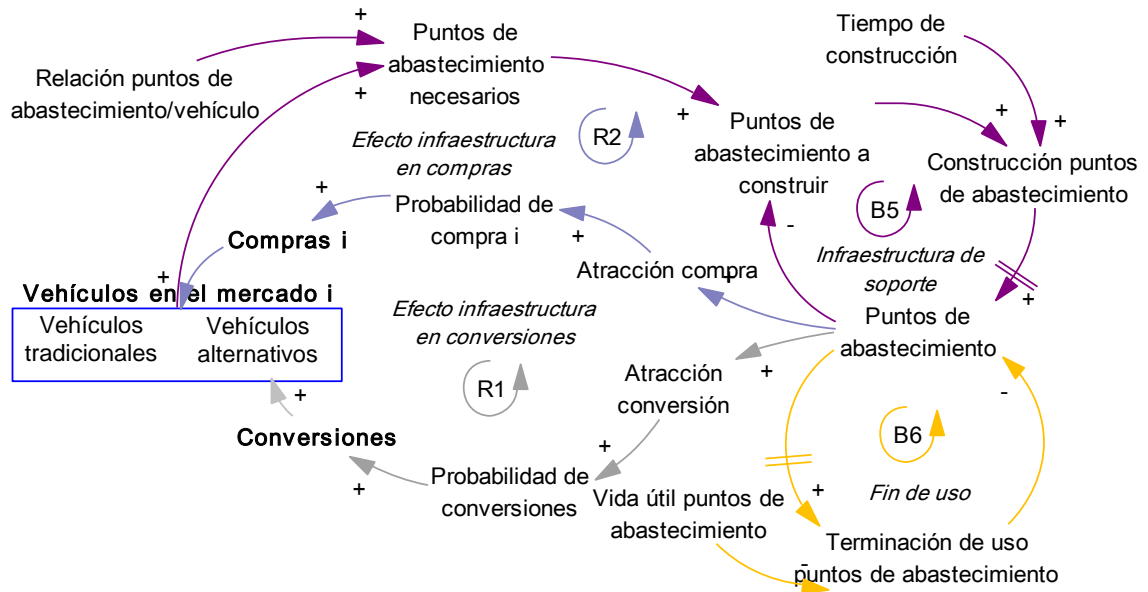
La Figura 3-5 describe el ciclo de balance “Terminación de uso” (B4), con el cual se explica la dinámica de los retiros, en él se evidencia que la flota automotriz se renueva a medida que se retiran los vehículos del mercado según su tiempo de circulación. Luego, los retiros del sistema son una función retardada de los vehículos en el mercado por el parámetro tiempo de circulación.

Figura 3-5: Dinámica de los retiros del sistema



La dinámica de la infraestructura fue modelada a partir de dos ciclos de balance (B5 y B6) y dos ciclos de refuerzo (R1 y R2) como se ilustra en la Figura 3-6. El ciclo “Infraestructura de soporte” (B5) está asociado a un arquetipo de búsqueda de metas con oscilaciones. En él se refleja la forma en que el sistema lleva la cantidad de puntos de abastecimiento al nivel deseado que se representa en la variable puntos de abastecimiento necesarios. Este ajuste es gradual dado que la construcción de los puntos de abastecimiento es una función que depende de los puntos de abastecimiento a construir retardada por el tiempo de construcción. En este punto vale la pena notar que los puntos de abastecimiento necesarios son una meta dinámica al ser función de la cantidad de vehículos en el mercado y la relación puntos de abastecimiento/vehículos. El ciclo de balance “Fin de uso” (B6) indica que los puntos de abastecimiento se vuelven obsoletos con el tiempo y al cumplir su vida útil termina su periodo de uso, con lo cual se retiran del sistema.

Figura 3-6: Dinámica de la infraestructura



Los ciclos de refuerzo R1 y R2 permiten estudiar el efecto que tiene la infraestructura en las conversiones y compras respectivamente. Para comprender el efecto es necesario recordar que los puntos de abastecimiento son un atributo considerado por el decisor para definir la atracción por las alternativas. En consecuencia, a medida que se incrementa la cantidad de puntos de abastecimiento disponibles en el mercado para una tecnología específica, esta se vuelve más atractiva dado que cuenta con infraestructura de soporte. Luego, aumenta la probabilidad de ser elegida entre el conjunto de alternativas disponible y con el tiempo al incrementar la base instalada de la tecnología será necesario ampliar nuevamente la infraestructura. De este modo, la cantidad de puntos de abastecimiento desempeña un papel influyente para los patrones de difusión de la innovación y su dinámica tiene una estrecha relación con el arquetipo éxito de los exitosos.

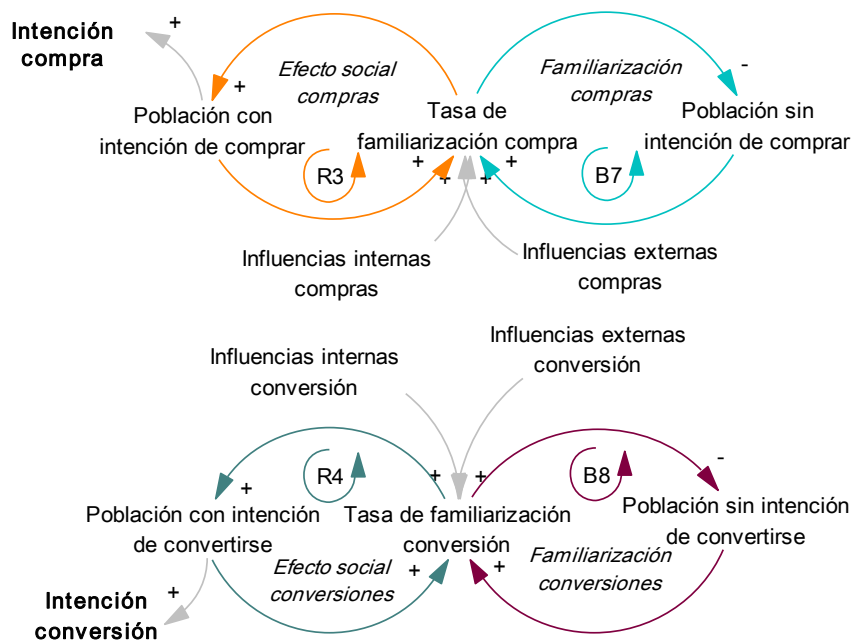
3.2.2 Modelo de intención

El modelo de intención permite entender como la población que no conoce las tecnologías se va familiarizando con ellas a través de influencias internas y externas de manera similar a un proceso de contagio. En el análisis de la difusión de vehículos con fuentes alternativas, algunos autores han modelado la intención de los consumidores hacia las tecnologías alternativas. Entre ellos, Brown (2013) ha asociado el modelado de la intención con una forma de cuantificar la voluntad de los consumidores por considerar

o explorar las opciones alternativas. Para Struben y Sterman (2008) la voluntad de considerar una tecnología captura el proceso emocional a través del cual los consumidores ganan información acerca de la tecnología, la comprenden y sienten interés por considerarla en su conjunto de elección. Afirman además que esa voluntad depende de influencias internas e influencias externas (Struben y Sterman 2008). En esta subsección se explica la hipótesis dinámica que define el modelo de intención a partir del análisis detallado de los cuatro ciclos de realimentación que lo componen.

La dinámica de la intención de la población con las compras y conversiones se modeló siguiendo un proceso de difusión de Bass como se ilustra en la Figura 3-7. Los ciclos “Efecto social compras” (R3) y “Familiarización compras” (B7) describen la dinámica para el proceso de compra, de forma paralela, los ciclos “Efecto social conversiones” (R3), y “Familiarización conversiones” (B7) describen la dinámica para las conversiones. Estos ciclos permiten incluir en el modelado características del sistema social en el que se desarrolla el proceso de difusión. Los ciclos de efecto social permiten entender como las personas que no conocen las tecnologías alternativas ni tienen intención de comprarlas o convertirse se familiarizan con las innovaciones a través de otros miembros en el sistema social. Los ciclos de familiarización ayudan a comprender la forma en que las herramientas de publicidad y mercadeo favorecen la difusión del conocimiento de las tecnologías entre el mercado potencial.

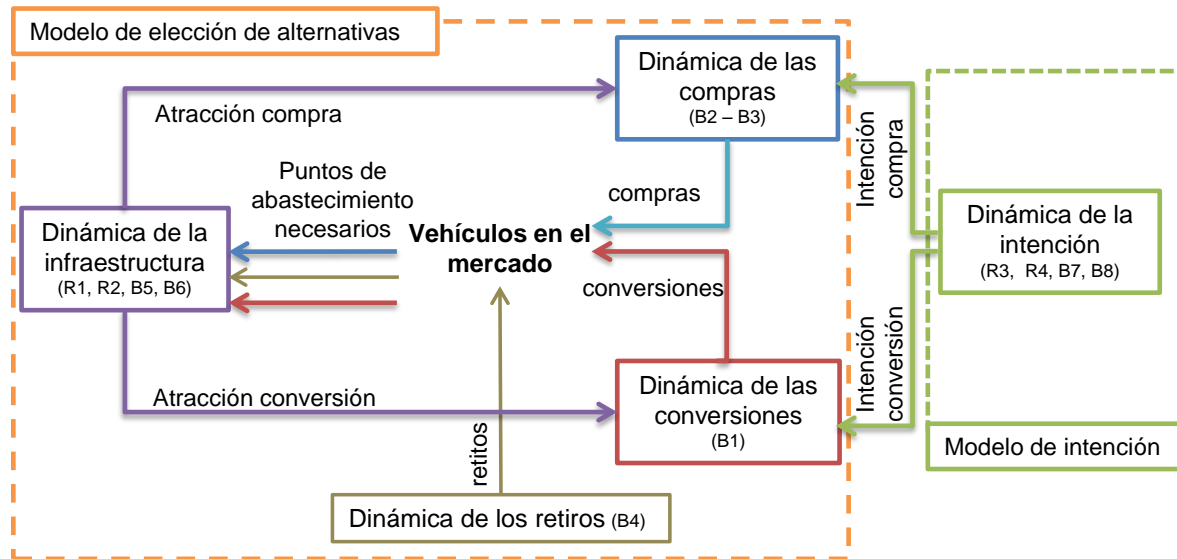
Figura 3-7: Dinámica de la intención de compra y la intención de conversión



Como resultado de este proceso de modelado es posible calcular la Intención de compra y la Intención de conversión de la población en cualquier momento del tiempo de simulación como la fracción de la población que tiene la intención de comprar o convertirse respecto al mercado potencial. En este punto, vale la pena recordar que estas variables son las que unen el modelo de intención con el modelo de elección discreta de alternativas, dado que difícilmente se adopta una innovación si no se conoce o no se tiene la intención de considerarla en el conjunto de elección. Esta es la razón por la cual la intención de compra afecta la probabilidad de compra y la intención de conversión afecta la probabilidad de conversión.

Para resumir esta sección, en la Figura 3-8 se ilustran de manera gráfica las interacciones entre las cinco dinámicas que se analizaron anteriormente: compras, conversiones, retiros, infraestructura e intención. Cada una de las dinámicas tiene un color asociado: azul para la dinámica de las compras, rojo para la dinámica de las conversiones, café para la dinámica de los retiros, morado para la dinámica de la infraestructura y verde para la dinámica de la intención. Las flechas de colores definen las relaciones existentes entre las dinámicas conservando la convención descrita anteriormente. Entre paréntesis aparecen los ciclos que definen cada una de las dinámicas.

En la Figura 3-8 puede observarse que la dinámica de la intención se relaciona con la dinámica de las compras y la dinámica de las conversiones a través de la intención de compra y conversión respectivamente. Estas relaciones son las que vinculan el modelo de intención (enmarcado en color verde) con el modelo de elección de alternativas (enmarcado en color naranja). Por otro lado, la dinámica de la infraestructura se relaciona con la dinámica de las compras y la dinámica de las conversiones a través de la atracción de las compras y la atracción de las conversiones respectivamente dado que los puntos de abastecimiento son uno de los atributos considerados en el cálculo de estas variables. A su vez, las dinámicas compras, conversiones y retiros modifican la cantidad de vehículos en el mercado, y en consecuencia afectan la dinámica de la infraestructura a través de los puntos de abastecimiento necesarios.

Figura 3-8: Interacción de las dinámicas del sistema.

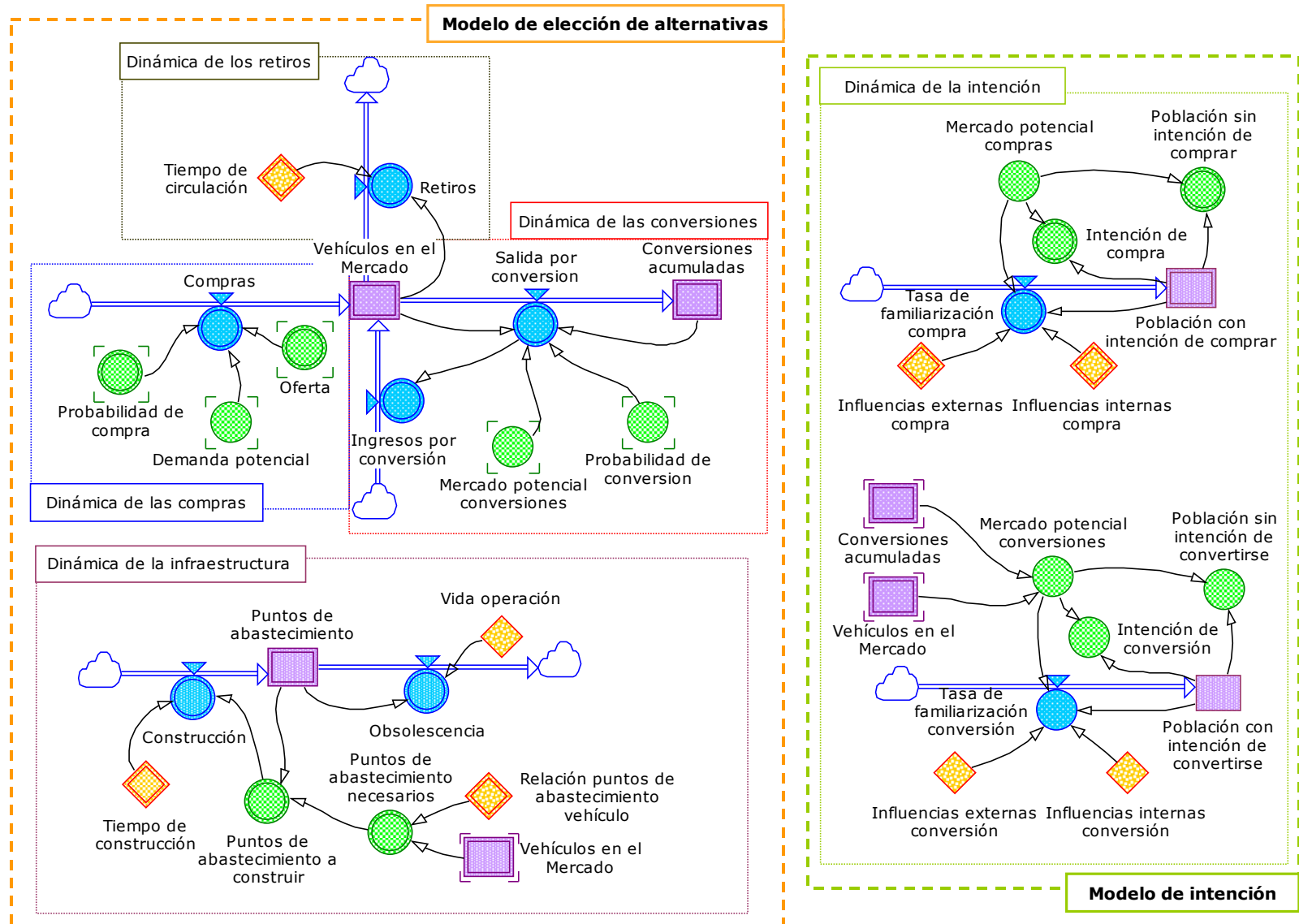
En la siguiente sección se continúa con el proceso de modelado al formalizar la hipótesis dinámica, descrita en esta sección, a través de ecuaciones diferenciales que consideran las variables de estado o niveles y los flujos asociados.

3.3 Estructura dinámica

En la primera sección de este capítulo se delimitó el sistema para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas a través de cuatro módulos que se relacionan entre sí. En la segunda sección se realizó la descripción de la hipótesis que reúne los diferentes elementos a través de los cuales se explican cinco dinámicas (compras, conversiones, retiros, infraestructura e intención) que en conjunto componen la dinámica general del sistema. En esta sección se analiza, a través de ecuaciones, la estructura del modelo de simulación.

En la construcción de un modelo en dinámica de sistemas es común distinguir entre variables de inventario (o niveles) y variables de flujo (o tasas). El nivel de cada variable es definido en términos de las variables de flujo asociadas. La Figura 3-9 ilustra la estructura del sistema que representa la hipótesis dinámica, planteada en la sección 3.2 a través de niveles y flujos. Puede observarse, el modelo de elección de alternativas (enmarcado en color naranja) con las cuatro dinámicas que lo componen (compras, retiros, conversiones e infraestructura), y el modelo de intención (enmarcado en color verde) completamente definido con la dinámica de la intención.

Figura 3-9: Estructura dinámica del modelo de difusión de vehículos con fuentes alternativas



En la Figura 3-9 es posible identificar cinco (5) variables de nivel: vehículos en el mercado, conversiones acumuladas, puntos de abastecimiento, población con intención de comprar y población con intención de convertirse, estas son las variables de estado del sistema. La Figura 3-9 también ilustra la relación entre los niveles definidos y las cinco dinámicas descritas en la sección anterior. En la parte superior derecha de la figura se evidencia que en el nivel vehículos en el mercado se relacionan tres dinámicas: compras, conversiones y retiros, en la parte inferior izquierda se ilustra que el nivel puntos de abastecimiento está asociado con la dinámica de la infraestructura, finalmente, en la parte derecha se muestra que los niveles población con intención de comprar y población con intención de convertirse se relacionan con la dinámica de la intención.

Adicionalmente a estas relaciones, el modelo de la Figura 3-9 muestra diferentes procesos de decisión, entre los cuales se destacan las compras y conversiones. Cada proceso es modelado con una regla de decisión, esto es, la definición de como los agentes del sistema actúan y deciden de acuerdo a los modeladores. En lo que resta de esta sección se explican las reglas de decisión del modelo y luego se describe el sistema de ecuaciones que define la estructura dinámica asociada a cada nivel.

3.3.1 Reglas de decisión del modelo

Las reglas de decisión del modelo fueron formuladas con base en la teoría de la racionalidad limitada por dos razones esencialmente. En primer lugar existe una motivación en el modelado asociada al hecho de aproximarse adecuadamente a la realidad mediante la construcción de un mejor modelo y en segundo lugar lograr una mejor comprensión de las decisiones.

La dinámica de sistemas permite incorporar la racionalidad limitada en el modelado. De hecho, la racionalidad limitada y la dinámica de sistemas tienen orígenes comunes (Größler 2004). Hacia 1972, Simon recomendó simular su teoría de racionalidad limitada, pero no hizo referencia a dinámica de sistemas (Simon 1972). En 1958, Forrester escribió sobre los avances en toma de decisiones como uno de los pilares de la dinámica de sistemas y hacia 1989 hizo referencia a racionalidad limitada (Forrester 1958). Morecroft fue el primero que hizo referencia explícita a los dos conceptos en 1983, planteó que la racionalidad limitada es un constituyente implícito de los modelos de

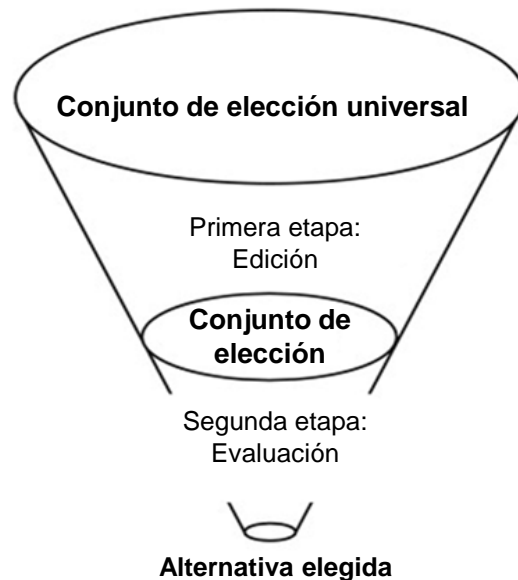
dinámica de sistemas y debe ser considerada en la construcción del modelo (Morecroft 1983). Posteriormente, Moxnes (1998) y, Sweeny y Sterman (2001) encontraron que las personas no piensan sistémicamente y como consecuencia acuden a heurísticos simples para tomar las decisiones.

La dinámica de sistemas usa la teoría de decisiones para especificar los flujos de información del modelo y el proceso de toma de decisiones. En general, este proceso está condicionado por filtros de información asociados a las características cognitivas, determinantes organizacionales y ambientales (Morecroft 1992). Tales filtros pueden ser usados para construir las reglas de decisión en un modelo. Según Dyner y Franco (2004) un consumidor escoge determinado producto dependiendo de sus deseos y de sus oportunidades reales, las cuales están limitadas por el conocimiento que éste tenga de tales oportunidades.

En relación con la decisión del consumidor en la elección de vehículos, la hipótesis de las primeras investigaciones era que las personas realizaban un proceso de búsqueda de información extensivo y riguroso, seguido de un proceso de decisión elaborado que finaliza con una elección óptima. Con el tiempo, se encontró que las personas realizan una búsqueda de información limitada y siguen un proceso de decisión heurístico que deriva en una elección satisfactoria (Mueller y De Haan 2009). Esta hipótesis incorpora de manera implícita tres elementos de racionalidad limitada: la información limitada de las alternativas disponibles, la limitación cognitiva del individuo y el proceso de elección satisfactorio (Simon 1972; Simon 2000)

En general, el proceso de toma de decisiones consta de dos etapas: edición y evaluación (Kahneman 2002; Mueller y De Haan 2009), como se ilustra en la Figura 3-10. En la primera etapa se eliminan alternativas desconocidas, como resultado se obtiene un conjunto de elección. En la segunda etapa se realiza la identificación de la mejor alternativa usando una regla compensatoria multi-atributo y el resultado es la elección. El conjunto universal de elección es el conjunto de todas las alternativas disponibles en el mercado mientras que el conjunto de elección es el conjunto de alternativas consideradas por el decisor.

Figura 3-10: Proceso de toma de decisiones en dos etapas. Adaptado de (Mueller y De Haan 2009)



La información al consumidor hace posible que las alternativas superen el filtro de la primera etapa y sean consideradas en el conjunto de elección cuando se toma la decisión. En la etapa de edición, el decisor usa los sesgos para manejar la información disponible y formar las heurísticas que usará en la segunda etapa. Después, en la etapa de evaluación, el decisor identifica la alternativa satisfactoria.

Las decisiones del consumidor en el modelo construido son las compras y las conversiones. Ambas dependen esencialmente de la probabilidad de compra y la probabilidad de conversión, a su vez, estas probabilidades son función de la intención y la atracción de compra y conversión respectivamente.

En cada caso, compra o conversión, la intención es el filtro de la primera etapa del proceso de decisión, con lo cual delimita el conjunto de elección y fue modelada a partir de la dinámica de la intención. Por su parte, la atracción de compra y la atracción de conversión en cada periodo de tiempo fueron modeladas usando dos modelos de elección discreta de tipo logit multinomial como se muestra en las ecuaciones 3 y 4.

$$Ac_i = \frac{e^{\sum \beta_j X_{ij}}}{\sum e^{\sum \beta_j X_{ij}}} \quad [3]$$

Donde

Ac_i es la atracción de compra para cada tecnología i

β_j es la importancia relativa de cada atributo j

X_{ij} es el atributo j de la tecnología i

i 1: vehículos tradicionales

2: vehículos dedicados a gas natural vehicular

3: vehículos eléctricos

j 1: autonomía

2: tiempo de abastecimiento

3: puntos de abastecimiento-disponibilidad

4: precio

5: costos operacionales

6: emisiones

$$Aco_i = \frac{e^{\sum \beta_j X_{ij}}}{\sum e^{\sum \beta_j X_{ij}}} \quad [4]$$

Donde

Aco_i es la atracción de conversión para cada tecnología i

β_j es la importancia relativa de cada atributo j

X_{ij} es el atributo j de la tecnología i

i 1: vehículos tradicionales

2: vehículos convertidos a gas natural

j 1: autonomía

2: tiempo de abastecimiento

3: puntos de abastecimiento-disponibilidad

4: costo anual equivalente

5: emisiones

En la ecuación 4, la atracción de conversión para los vehículos tradicionales (Aco_i) únicamente tiene sentido si se interpreta como la atracción que tiene la población por no cambiarse a otra tecnología, es decir no convertir el vehículo tradicional a uno impulsado por gas natural.

3.3.2 Ecuaciones que definen la estructura dinámica del nivel vehículos en el mercado

La cantidad de vehículos en el mercado se modifica por la interacción tres dinámicas: compras, las conversiones y los retiros. Es así como los vehículos en el mercado (V_i) acumulan (integran) los flujos netos de las Compras (C_i), los Ingresos por conversión (I_i), las Salidas por conversión (S_i) y los Retiros (R_i). En la Tabla 3-2 se presenta la formulación del sistema de ecuaciones que define el nivel vehículos en el mercado y los flujos asociados. Cada ecuación tiene comentarios explicativos en la parte inferior y las unidades en la parte derecha.

Tabla 3-2: Formulación de las ecuaciones asociadas al nivel vehículos en el mercado.

Formulaciones y comentarios	Unidades
$\frac{dV_i}{dt} = C_i + I_i - S_i - R_i$	vehículos/año
Los vehículos actuales (V_i) aumentan en el tiempo a través de las compras (C_i) y los ingresos por conversión (I_i), y disminuyen a través de las salidas por conversión (S_i) y los retiros (R_i)	
$C_i = \text{Min}(D * Pc_i, O_i)$	vehículos/año
La decisión de compra en cada periodo es una función de la demanda potencial (D), la probabilidad de compra (Pc_i) y la oferta (O_i).	

Continúa de la página anterior

Formulaciones y comentarios	Unidades
$S_1 = \begin{cases} mc * Pco - Ca & V_1 > 0 \\ 0 & V_1 \leq 0 \end{cases}$	vehículos/año
<p>Para analizar las conversiones de vehículos de gasolina a gas natural vehicular fue necesario separar la variable conversiones en dos: salidas por conversión(S_i) e ingresos por conversión(I_i). Las salidas por conversión (S_1) dependen de los vehículos a gasolina en el mercado (V_1), el mercado potencial de conversiones (mc) la probabilidad conversión (Pco) y las conversiones acumuladas (Ca). Los ingresos por conversión en cada periodo de tiempo son iguales a las salidas por conversión de ese periodo ($I_4 = S_1$)</p>	
$R_i = \frac{V_i}{tc}$	vehículos/año
<p>Los retiros dependen de los vehículos en el mercado (V_i) y el tiempo de circulación(tc)</p>	
$\frac{dCa}{dt} = S$	vehículos/año
<p>Las conversiones acumuladas (Ca) se incrementan en el tiempo con el flujo salidas por conversión (S)</p>	

3.3.3 Ecuaciones que definen la estructura dinámica del nivel puntos de abastecimiento

Los puntos de abastecimiento en cada periodo del tiempo se explican por la dinámica de la infraestructura. Esta dinámica considera la construcción y obsolescencia como los únicos dos flujos que afectan el nivel de puntos de abastecimiento. En la Tabla 3-3 se presenta la formulación del sistema de ecuaciones que define el nivel bajo análisis y los flujos asociados, esta tabla tiene la misma estructura que la Tabla 3-2.

Tabla 3-3: Formulación de las ecuaciones asociadas al nivel puntos de abastecimiento

Formulaciones y comentarios	Unidades
$\frac{dPa_i}{dt} = Ct_i - Ob_i$	estaciones/año
<p>El flujo de entrada construcción (Ct_i) incrementa la cantidad puntos de abastecimiento para cada tecnología(Pa_i) mientras que el flujo de salida obsolescencia (Ob_i) la reduce.</p>	
$Ct_i = \frac{Pa_i}{tc}$	estaciones/año
<p>La construcción (Ct_i) es una función de los puntos de abastecimiento a construir (Pa_i) y el tiempo de construcción (tc). Los puntos de abastecimiento a construir se calcularon, en cada periodo, como la diferencia entre los puntos de abastecimiento existentes y los necesarios. Estos últimos se definen a partir de la relación requerida entre puntos de abastecimiento y vehículos.</p>	
$Ob_i = \frac{Pa_i}{vo}$	estaciones/año
<p>La obsolescencia (Ob_i) relaciona los puntos de abastecimiento existentes (Pa_i) con su vida de operación (vo)</p>	

La dinámica de los puntos de abastecimiento sólo se analizó para los vehículos impulsados por gasolina y gas natural bajo el supuesto de que los vehículos eléctricos de conexión se carguen en las casas.

3.3.4 Ecuaciones que definen la estructura dinámica de los niveles asociados a la intención

La dinámica de la intención permite entender el comportamiento de los niveles población con intención de compra y población con intención de conversión. Dichos niveles se modifican por el flujo tasa de familiarización de compra y conversión respectivamente. En la Tabla 3-4 se presentan las ecuaciones que definen el comportamiento de los niveles bajo análisis, esta tabla tiene la misma estructura que la Tabla 3-2.

Tabla 3-4: Formulación de las ecuaciones asociadas los niveles población con intención de compra o conversión

Formulaciones y comentarios	Unidades
$\frac{dPf_i}{dt} = T_{f_i} \frac{dPfc}{dt} = Tfc$	personas/año
<p>El flujo de tasa de familiarización compra (T_{f_i}) permite entender la forma en que la población se va familiarizando con las tecnologías alternativas. A su vez, el flujo tasa de familiarización de conversión ayuda a explicar la forma en que la población eleva su intención de conversión (Tfc). Dado que se trata de un único flujo de entrada, en cada caso, el comportamiento de los niveles es creciente hasta que se familiariza el mercado potencial.</p>	
$T_{f_i} = p_i m + (q_i - p_i) Pf_i - q_i / m Pf_i^2$ $Tfc = p_c mc + (q_c - p_c) Pfc - q_c / mc Pfc^2$	personas/año
<p>En un caso genérico, la tasa de familiarización (Tf) es una función que depende del mercado potencial (m), el coeficiente de innovación (p) relacionado con influencias externas, el coeficiente de imitación (q) relacionado con influencias internas y la población con intención en cada periodo de tiempo (Pf). Como resultado de este modelado, la intención de compra o conversión en cada periodo de tiempo se define como la fracción de la población con intención respecto al mercado potencial.</p> <p>En el análisis de las compras, el mercado potencial (m) corresponde a la población que comprará un vehículo nuevo durante el periodo de simulación. En el caso de las conversiones, el mercado potencial (mc) se refiere a la cantidad de personas que poseen un vehículo tradicional junto a las personas que ya han convertido su vehículo.</p> <p>Los valores de los parámetros p y q varían para cada tecnología. Los valores p_i y q_i están asociados a los vehículos dedicados a gas y vehículos eléctricos para el análisis de la intención de compra. Los valores p_c y q_c están relacionados con los vehículos convertidos a gas.</p>	

En el Anexo C Formulación del modelo de simulación en Powersim se presentan las ecuaciones usadas para modelar todas las variables y parámetros del modelo, con esta formulación queda completamente definido el modelo estudiado y se garantiza la replicabilidad del mismo.

3.4 Validación

La validación de modelo constituye un paso muy importante en la metodología de dinámica de sistemas (Barlas 1996); porque permite estudiar si el modelo construido refleja razonablemente el comportamiento del sistema real y adicionalmente si se comporta de manera similar y consistente con este. Es posible identificar en la literatura una serie de pruebas que permiten mejorar desde varios aspectos, el desempeño de los modelos construidos y que pretenden esquematizar el comportamiento real de algún fenómeno en particular, con ellas se busca aumentar la confianza en los resultados del modelo. A continuación se presentan las pruebas realizadas asociadas a las tres etapas del proceso de validación: pruebas directas a la estructura, pruebas de estructura orientadas al comportamiento y pruebas de comportamiento. En el Anexo D se presentan los soportes de las pruebas realizadas.

3.4.1 Pruebas directas a la estructura

Estas pruebas permiten evaluar la validez de la estructura del modelo por comparaciones directas entre el conocimiento del sistema real con la estructura, no incluyen simulación. Entre ellas se destacan pruebas de consistencia dimensional y confirmación de parámetros.

a. Consistencia dimensional

Cada uno de los niveles, flujos, parámetros y variables que fueron considerados en el modelo están relacionados de tal forma que siempre existe consistencia dimensional. Para asegurar esta consistencia inicialmente se realizó una revisión detallada de las ecuaciones del modelo. Posteriormente, se usó como herramienta de verificación el Software PowerSim 8 considerando que esta herramienta tiene como prerrequisito para realizar las simulaciones que el modelo tenga consistencia dimensional. Como consecuencia, se concluye que el modelo construido supera la prueba de consistencia dimensional.

b. Confirmación de parámetros y variables exógenas

Los parámetros usados en el modelo tienen un claro significado con la vida real y son consistentes con el conocimiento numérico y descriptivo del sistema. Todos ellos fueron obtenidos o estimados a partir de fuentes de información confiables entre ellas: revistas

de alta calidad científica y entidades públicas encargadas de registrar y analizar los diferentes datos estadísticos. En la construcción del modelo se incorporaron además diferentes variables exógenas, los valores de estas variables fueron obtenidos desde diferentes fuentes de información. En el Anexo D se explica cada uno de los parámetros y variables usadas en el modelado, los valores y las fuentes de información de los datos.

3.4.2 Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento

Estas pruebas permiten validar la estructura indirectamente, involucran simulación que puede ser aplicada al modelo completo o a submodelos. Con ella se puede observar si el nivel de agregación del modelo es adecuado para el propósito del mismo. Entre ellas se destacan pruebas límites del modelo, condiciones extremas, errores de integración y análisis de sensibilidad. En esta sección se presenta cada una de esas pruebas.

a. Límites del modelo

Esta prueba busca responder las siguientes preguntas: ¿Cuál es el límite del modelo?, ¿Las cuestiones importantes se tratan endógenamente?, ¿Qué variables importantes han sido consideradas exógenamente o excluidas? (Stermán 2000). En la primera sección de este capítulo (3.1 Límites del modelo) se dio respuesta de manera implícita a estos interrogantes y se explicó la delimitación del modelo analizado.

b. Condiciones extremas

Esta prueba examina la respuesta del modelo ante valores extremos de los parámetros o variables. De este modo, permite encontrar fallas en la estructura del modelo y también puede revelar variables omitidas. El modelo superó las siguientes condiciones extremas:

- Demanda potencial igual a cero
- Intención de compra de vehículos con fuentes alternativas igual a cero
- Intención de conversión igual a cero
- Cantidad de vehículos tradicionales igual a cero
- Oferta de vehículos con fuentes alternativas igual a cero

El análisis detallado de cada una de las pruebas realizadas se presenta en el Anexo D

c. Errores de integración

Los modelos en dinámica de sistemas son resueltos por métodos de integración y con esta prueba se verifica si los resultados del modelo son sensibles a la selección del tiempo de paso y del método de integración. El análisis detallado de esta prueba se presenta en el Anexo D. Se encontró el comportamiento de las variables modeladas es poco sensible a cambios en el método de integración y el tamaño de paso. Teniendo en cuenta lo anterior, el análisis de los resultados del modelo, que se presenta en el capítulo siguiente, se realiza considerando el tiempo de paso de 1 año, puesto que es más acorde a la realidad del sistema modelado, y el método de integración Runge-Kutta cuatro (RK4), para tener una mayor precisión en la integración.

d. Análisis de sensibilidad

El objetivo del análisis de sensibilidad es determinar si se perciben cambios significativos en los datos numéricos o en el comportamiento del sistema con algunas variaciones en los valores iniciales del modelo. Los incrementos o reducciones en los valores de las variables con mayor incertidumbre permiten determinar la sensibilidad de los resultados del modelo frente a dichos cambios.

En el Anexo D se presenta el análisis de sensibilidad realizado a algunos coeficientes Beta, a las influencias internas y a las influencias externas. Se sensibilizaron estos parámetros dado que están directamente relacionados con las reglas de decisión del modelo. Las variaciones en los coeficientes Beta afectan directamente la atracción mientras que cambios en las influencias externas o internas afectan la intención. Por un lado, se encontró que la atracción es poco sensible a cambios en los coeficientes beta y se siguen reproduciendo los mismos comportamientos de las variables en el tiempo. Por otro lado, se encontró que la intención es más sensible a cambios en las influencias internas que las externas; dicha sensibilidad se hace más notoria en la segunda etapa del proceso de difusión. Este comportamiento puede explicarse por la estructura del modelo de Bass en la cual durante los primeros años de la difusión, la mayor parte de la dinámica está asociada a influencias externas y posteriormente a influencias internas.

El análisis de sensibilidad realizado permitió validar la robustez del comportamiento del modelo ante cambios en algunos de los parámetros clave y además dio algunas pistas

sobre los puntos de apalancamiento del sistema que serán usados en el análisis de estrategias que se presenta en el siguiente capítulo.

3.4.3 Pruebas de comportamiento

Entre las pruebas de comportamiento, se destaca la prueba de patrón de comportamiento. Con esta prueba se evalúa si el modelo genera el modo de referencia observado en el sistema real, para hacerlo se puede acudir a herramientas cuantitativas como medidas de estadística descriptiva y herramientas cualitativas como al análisis de la forma de las variables, asimetrías y amplitudes relativas (Sterman 2000). En el Anexo D se presenta la evaluación cualitativa y cuantitativa de la capacidad del modelo construido para reproducir el comportamiento histórico de las conversiones y a la vez se valida la regla de decisión para las conversiones con el propósito de ilustrar la importancia de incluir la racionalidad limitada en el modelado.

El análisis desarrollado permitió evidenciar que un modelo construido considerando racionalidad limitada tiene mejor capacidad para reproducir el modo de referencia. Estos resultados, a su vez reafirman la importancia de incluir racionalidad limitada en el modelado y validan la regla de decisión del modelo dando soporte y relevancia a las variables asociadas a la intención.

3.5 Conclusiones del capítulo

En el capítulo anterior se presentaron diferentes aproximaciones metodológicas para acercarse al estudio de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en los mercados como primer paso hacia la evaluación de estrategias para incentivar la difusión. En este capítulo se abordó el proceso de modelado del cual se resaltan los siguientes elementos:

- Se aplicó el pensamiento sistémico para la generación de nuevo conocimiento sobre la difusión de vehículos particulares con fuentes alternativas en Colombia que puede ser usado por los agentes del sistema para identificar las relaciones causales, comprender el fenómeno y proponer estrategias que modifiquen la dinámica básica.
- Se desarrolló un modelo de simulación en el que se consideran las interrelaciones entre los agentes que influyen en el sistema y su entorno. Esto permitió una mayor comprensión de los procesos de decisión en el sistema y de las interacciones entre las distintas variables que gobiernan su comportamiento.

- Se analizó la validez del modelo para explicar el fenómeno estudiado y se realizaron sensibilidades para evaluar la robustez del comportamiento ante algunos parámetros clave y considerar aspectos específicos en los que se tenía incertidumbre o no se tenía información suficiente disponible. Con lo anterior se realizó el proceso para construir confianza en el modelo desarrollado.

En relación al modelo construido vale la pena resaltar que:

- Es una abstracción y simplificación de la realidad que captura la esencia del sistema en forma tal que permite aumentar la comprensión del fenómeno.
- Usa parámetros que tienen interpretaciones intuitivas y claras para quien los lee.
- Puede ser modificado, extendido y aplicado en otros casos luego de realizar algunas adaptaciones asociadas al entorno y las preferencias de los individuos.
- Es una herramienta útil para entender los efectos de las variables de decisión en el proceso de difusión con el propósito de explorar políticas orientadas a incentivar la adopción de vehículos con fuentes alternativas en el mercado.

Hasta ahora, se ha presentado el desarrollo un modelo novedoso a partir del cual es posible estudiar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano y analizar estrategias que incentiven su adopción. Sin embargo no se han mostrado los resultados del modelo aplicado el caso de estudio, ni se ha demostrado en la práctica sus bondades para el análisis de estrategias. Estos elementos se presentarán en el siguiente capítulo.

4. Modelado del mercado colombiano

Varios aportes de esta tesis han surgido en el capítulo anterior. Ellos están relacionados con el desarrollo de un modelo novedoso para estudiar el fenómeno de difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano. Sin embargo, ese desarrollo tiene sentido cuando se estudian los resultados del modelo construido y se evidencian las aplicaciones prácticas que se obtienen como fruto de tal modelo.

Así, el objetivo central de este capítulo es demostrar la aplicación del modelo propuesto para el análisis de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano y evaluar estrategias para incentivar la difusión. Con el cumplimiento de este objetivo, se logran los siguientes aportes:

- Se estudia la evolución del mercado de vehículos particulares en el tiempo y se avanza en la comprensión de la dinámica del sistema, al presentar los resultados del modelo que permite explicar la dinámica existente y su relación con diferentes variables del mercado.
- Se analiza la influencia de las diferentes estrategias que intervienen en la decisión del consumidor cuando elige comprar un vehículo con fuentes alternativas o convertir su vehículo a uno impulsado por gas natural.
- Se evalúan estrategias que pretenden alterar la evolución de la dinámica analizada, con base en criterios definidos. Esto permite, entre otras cosas, definir con cuál mecanismo se obtienen mejores resultados.

Este capítulo está organizado como sigue: En la Sección 4.1 se analiza el caso base. En la Sección 4.2 se realiza el análisis de estrategias. En la Sección 4.3 se concluye.

4.1 Análisis del caso base

El caso analizado en esta investigación incluye cuatro tecnologías en competencia: los vehículos tradicionales de combustión interna y los vehículos con fuentes alternativas electricidad y gas natural, en el caso del gas se incluyen los vehículos dedicados y los convertidos. Las características de las diferentes alternativas que se analizaron fueron: precio, costos operacionales, costo anual equivalente (para las conversiones), emisiones, autonomía, tiempo de abastecimiento y estaciones de abastecimiento. Además de lo anterior se incluyeron los procesos de mejoramiento de algunos atributos vía investigación y desarrollo.

El periodo de simulación comienza en el año 2012. El horizonte de tiempo en el que se evaluó el modelo fue de 20 años con paso anual, un periodo prudente para evaluar los procesos de realimentación. El modelo fue implementado en Powersim Studio 8 Academic from Powersim Software AS. Las gráficas y análisis de resultados fueron desarrolladas con ayuda de MS Excel.

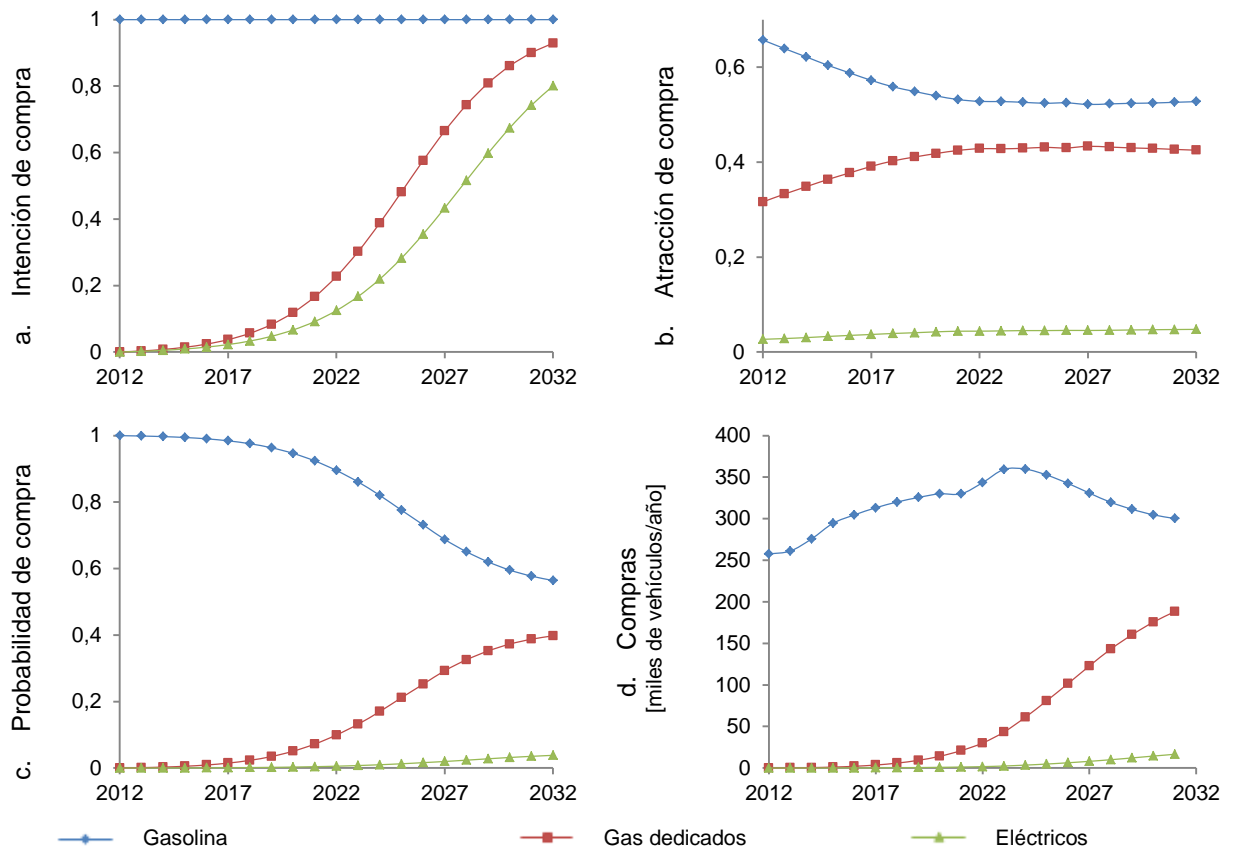
El análisis del caso base está dividido en tres secciones con las cuales se estudian los resultados del modelo a partir de la dinámica de las compras (Sección 4.1.1), la dinámica de las conversiones (Sección 4.1.2) y los efectos que estas tienen sobre el nivel vehículos en el mercado (Sección 4.1.3).

4.1.1 Análisis de la dinámica de las compras

El análisis de la dinámica de las compras requiere estudiar los resultados obtenidos para la intención y la atracción como determinantes de la probabilidad de compra. En la Figura 4-1 se ilustra el comportamiento en el tiempo de cada una de estas variables.

La intención de compra (Figura 4-1a) describe un comportamiento creciente característico de los proceso de difusión. El crecimiento es lento en los primeros años y a partir del 2022 se vuelve más pronunciado. Durante toda la simulación, la intención de compra es mayor para los vehículos dedicados a gas que para los vehículos eléctricos, en los primeros años se debe a que las influencias externas son mayores para esta tecnología, luego el fenómeno se debe a las influencias internas que también son mayores para los vehículos dedicados a gas.

Figura 4-1: Dinámica de las compras en el caso base



La dinámica de la atracción (Figura 4-1b) permite evidenciar que los vehículos con fuentes alternativas se van volviendo más atractivos en el tiempo, este fenómeno está asociado al mejoramiento de sus atributos. La figura permite notar que los vehículos a gasolina son los más atractivos y además que hay una gran diferencia entre la atracción de los vehículos eléctricos y las demás tecnologías.

Como una combinación de la intención y la atracción, la gráfica de la probabilidad de compra (Figura 4-1c) evidencia que durante los primeros años, la probabilidad de elegir un vehículo con fuentes alternativas es muy baja. Sin embargo, esta probabilidad va creciendo en el tiempo a medida que los vehículos se vuelven más atractivos y aumenta la intención de compra de la población. A pesar de dichos cambios, la probabilidad de comprar un vehículo a gasolina supera considerablemente las demás probabilidades.

El efecto conjunto de estas variables se observa en la dinámica de las compras (Figura 4-1d). Es posible ver que durante los primeros 10 años simulados, casi no hay compras de vehículos con fuentes alternativas. Ese comportamiento cambia un poco a partir del 2017, donde se observa el tiempo de despegue de la difusión para vehículos dedicados a gas y a partir del año 2022, donde se nota el tiempo de despegue de la difusión para vehículos eléctricos. El análisis del patrón de comportamiento para las compras de vehículos a gasolina muestra que esta tecnología captura la mayor proporción del mercado potencial durante todo el periodo simulado, la reducción de la pendiente en los últimos años se asocia a incremento de las compras de vehículos con otras tecnologías. Al final de la simulación, del total de compras realizadas en el mercado, el 59.4% fueron de vehículos a gasolina, el 37.3% fue de vehículos dedicados a gas y el 3.3% fue de vehículos eléctricos. Esto indica que la mayoría de las personas, cuando desean comprar un vehículo, tiene como primera opción los vehículos convencionales.

4.1.2 Análisis de la dinámica de las conversiones

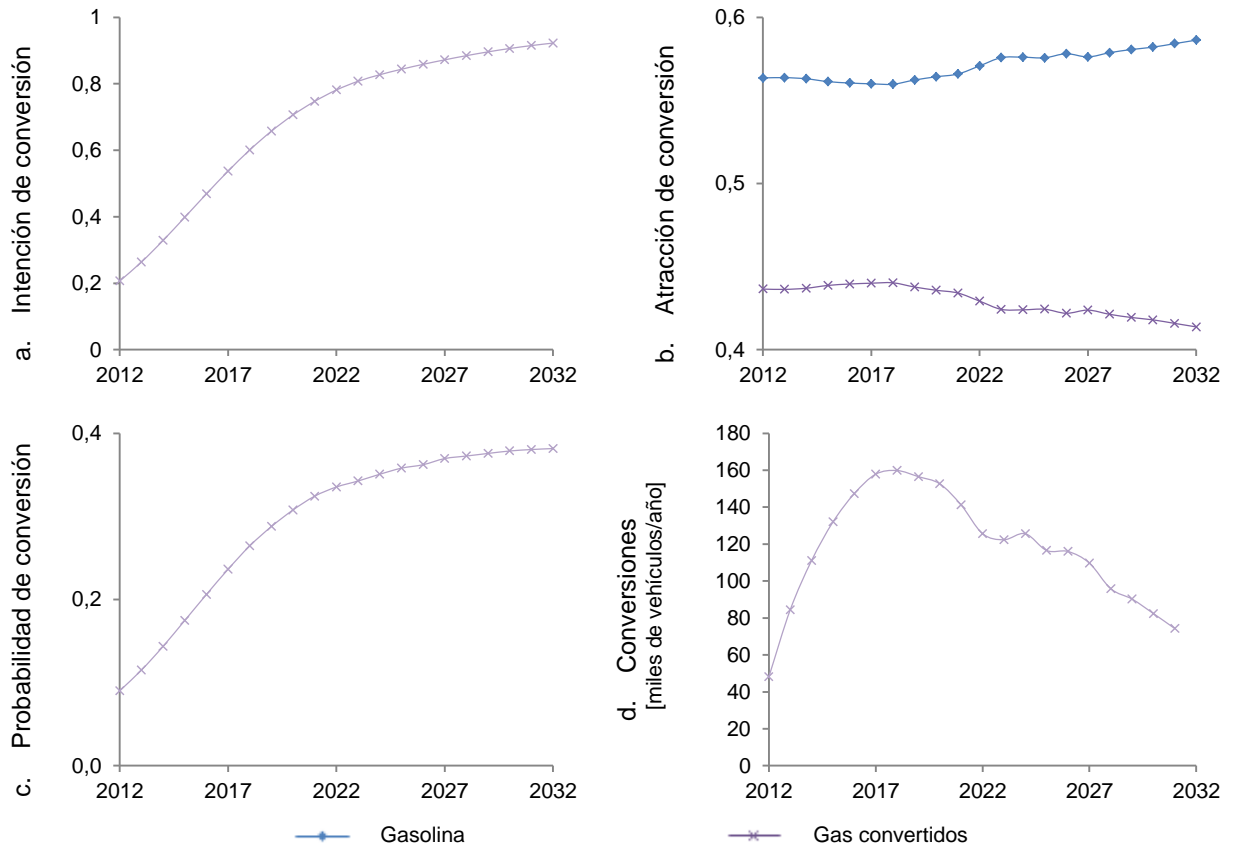
El análisis de la dinámica de las conversiones implica revisar los resultados obtenidos para la intención y la atracción como determinantes de la probabilidad de conversión. En la Figura 4-2 se muestra el comportamiento en el tiempo de cada una de estas variables.

La intención de conversión (Figura 4-2a) describe una dinámica creciente asociada a la segunda etapa del proceso de difusión, en la cual, la mayor proporción del comportamiento se debe a las influencias internas y se va alcanzando el mercado potencial. Por su parte, la atracción de conversión ilustra un comportamiento oscilatorio (Figura 4-2b) que se debe a la evolución de los atributos de las tecnologías en el tiempo especialmente al efecto de las curvas de eficiencia tecnológicas en los costos operacionales de las alternativas.

Como una combinación de la intención y la atracción, la probabilidad de conversión (Figura 4-2c) describe un comportamiento creciente con algunas oscilaciones a partir del año 2022. El crecimiento se debe a la dinámica de la intención y las oscilaciones se relacionan con dinámica de la atracción. De este modo, las conversiones (Figura 4-2d) muestran un comportamiento creciente hasta el año 2018, donde se da el primer punto

de inflexión. A partir de esa fecha el comportamiento oscilatorio decreciente está relacionado con la dinámica de la atracción y la satisfacción del mercado potencial.

Figura 4-2: Dinámica de las conversiones caso base

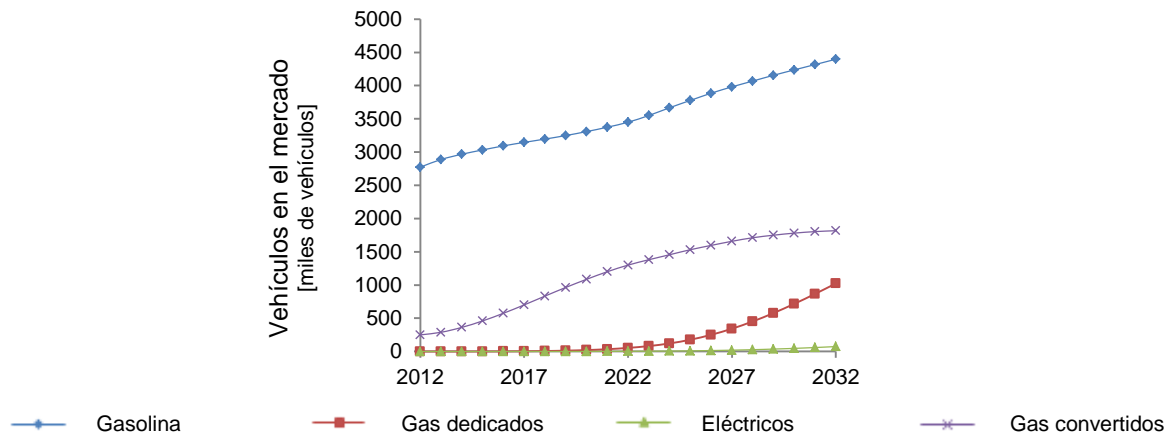


4.1.3 Análisis del nivel vehículos en el mercado

Los resultados del modelo para la cantidad de vehículos en el mercado se muestran en la Figura 4-3. Estos resultados indican que bajo las condiciones actuales, en los próximos 20 años el mercado colombiano seguirá siendo dominado por los vehículos convencionales. La cantidad de vehículos a gasolina permanece como la base del mercado en toda la simulación y describe un comportamiento creciente que cambia de pendiente a partir del 2022 debido a tasa de motorización. La cantidad de vehículos convertidos a gas natural también describe un comportamiento creciente, sin embargo, puede notarse que va reduciendo de pendiente debido a la satisfacción del mercado potencial.

La Figura 4-3 ilustra que los vehículos dedicados a gas y los vehículos eléctricos tienen una muy lenta difusión durante los primeros 10 años lo que se traduce en una baja participación del mercado. Sin embargo, ese comportamiento cambia para los vehículos a gas desde el 2022 cuando empiezan a capturar una mayor proporción del mercado. El porcentaje de participación en el mercado para cada tecnología al final de la simulación es 60.14% para vehículos a gasolina, 24.85% para vehículos convertidos a gas, 14.00% para vehículos dedicados a gas y 1.01% para vehículos eléctricos. Esto refleja una fuerte dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas. En este escenario de difusión, las emisiones totales de CO₂ durante el periodo simulado son $1.42 \cdot 10^{10}$ grCO₂.

Figura 4-3: Vehículos en el mercado en el caso base



Es importante resaltar tres elementos que se evidenciaron durante toda la simulación. En primer lugar, estricta dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas. Lo anterior podría deberse a las barreras del mercado creadas por la larga trayectoria de la industria de vehículos convencionales, esta trayectoria permite que gocen de mayor atracción e intención y en consecuencia una mayor probabilidad de elección. En segundo lugar, es posible notar dominancia de los vehículos dedicados a gas sobre los vehículos eléctricos, este fenómeno está asociado a la mayor atracción de compra que tiene esta tecnología en todo el periodo analizado. Finalmente, se evidencia un crecimiento recurrente en las compras de vehículos de todas las categorías. Esto indica que en los próximos 20 años, el mercado no habrá alcanzado aún su nivel de saturación con lo cual la tasa de motorización en Colombia será cada vez mayor.

4.2 Análisis de estrategias

En el Capítulo 1 se identificaron las barreras existentes para la difusión de vehículos con fuentes alternativas en los mercados. Tales barreras fueron clasificadas en: regulatorias y legales, financieras, técnicas y tecnológicas, aceptación pública y disponibilidad de mercado. Por otro lado, se hizo evidente a partir de la revisión de la literatura que las estrategias desarrolladas para incentivar la difusión deben estar orientadas a superar los obstáculos identificados. Además, se clasificaron las estrategias en: fiscales y regulatorias, económicas y financieras, abastecimiento, comunicación y difusión e investigación y desarrollo.

Inicialmente en la Sección 4.2.1 se definen los criterios con los cuales se compararán las estrategias modeladas. Luego, se analizan estrategias orientadas a superar cuatro tipos de barreras: regulatorias y legales, financieras, de aceptación pública y disponibilidad de mercado. Se excluye el análisis de las barreras técnicas y tecnológicas dado que en Colombia no se desarrollan las tecnologías. El análisis de las estrategias se enriquece con la solución a preguntas de tipo ¿Qué pasaría si...? de esta forma para cada una de las estrategias analizadas se evalúa un escenario en el cual se rompe por completo la barrera que intenta superar. Las relaciones entre estrategias modeladas y barreras a superar se presentan en la Tabla 4-1. La tabla está organizada así: en la primera columna aparecen las estrategias modeladas, en la segunda aparecen las barreras a superar con cada estrategia y en la tercera la sección en la que se desarrolla el análisis de la estrategia.

Tabla 4-1: Panorama de las estrategias modeladas

Estrategia modelada	Barrera a superar	Sección
<i>Fiscal y regulatoria</i> Exenciones de impuestos: 3,10 y 20 años ¿Qué pasaría si los precios fueran iguales?	<i>Regulatoria y legal:</i> impuestos <i>Financiera:</i> precio	4.2.2
<i>Económica y financiera</i> Subsidios a la conversión 35% ¿Qué pasaría si el costo de conversión fuera 0 pesos?	<i>Financiera:</i> costo de conversión	4.2.3
<i>Comunicación y difusión</i> Herramientas de mercadeo para elevar la intención ¿Qué pasaría si la intención fuera 1?	<i>Aceptación pública:</i> desconocimiento	4.2.4
<i>Abastecimiento</i> Separar el tiempo de carga del tiempo de espera para la carga Construcción de infraestructura de soporte ¿Qué pasaría si los tiempos de carga fueran similares y la disponibilidad de abastecimiento fuera el 100%?	<i>Disponibilidad de mercado:</i> infraestructura de abastecimiento tiempo de carga	4.2.5

Posteriormente, en la Sección 4.2.6 se realiza un análisis comparativo de todas las estrategias modeladas. Finalmente, en la Sección 4.2.7 se realiza el análisis combinado de algunas estrategias teniendo en cuenta que algunos autores, entre ellos Steenberghen y López (2008), han planteado que es necesaria una combinación de medidas para lograr el objetivo de romper con las barreras de entrada al mercado.

4.2.1 Criterios para evaluar las estrategias

El análisis de la implementación de estrategias para intervenir un sistema social requiere como paso previo la definición de los criterios con los cuales se compararán los resultados tras la aplicación de la estrategia. En esta sección se realiza la selección de tales criterios. El estudio de la difusión de una innovación a partir de modelos agregados, como el construido en esta tesis, se basa en analizar el patrón de comportamiento de la difusión en el tiempo. Luego, el primer criterio de evaluación es el patrón de comportamiento. Dicho patrón puede ser estudiado de forma cualitativa y de forma cuantitativa.

Por un lado, la metodología elegida para el análisis del problema (dinámica de sistemas) facilita el análisis cualitativo y permite explicar los efectos de las estrategias a partir de los cambios en la atracción y la intención y en consecuencia sobre las compras y conversiones. Las estrategias diseñadas para mejorar los atributos de las tecnologías superando barreras regulatorias y legales, financieras y disponibilidad de mercado modifican la atracción y las estrategias diseñadas para superar las barreras de aceptación pública modifican la intención.

Por otro lado, en la revisión de la literatura es posible identificar indicadores numéricos que facilitan el análisis cuantitativo. En la Tabla 4-2 se presentan algunos de los indicadores cuantitativos usados por diferentes autores para analizar la difusión. En la primera columna aparece el nombre del indicador, en la segunda aparece el significado, en la tercera la unidad de medida y finalmente, en la cuarta columna la referencia que usó el indicador.

Tabla 4-2: Indicadores cuantitativos para evaluar la difusión de una innovación

Indicador	Definición	Unidad de medida	Referencia
Tasa de adopción	Es la velocidad relativa con la cual una innovación es adoptada por los miembros de un sistema social. Es un indicador numérico de lo precipitosa o pendiente que es la adopción.	adopciones/ periodo	(Rogers 1995)
Velocidad de la difusión	Tiempo toma la innovación para ser adoptada por cierto número de personas	Años	(Da Silveira 2001)
Participación de mercado	Mide la proporción de mercado que tiene la innovación al final del periodo analizado	% de cada tecnología	(Propfe et al. 2013)

Para facilitar el análisis de los resultados únicamente se seleccionó como indicador cuantitativo la participación de mercado dado que su cálculo está basado en el estado final del sistema. De este modo es una medida del efecto final de la estrategia aplicada.

Además, teniendo en cuenta que las estrategias implementadas tienen el propósito de incentivar un transporte particular bajo en carbono, se incluye como criterio adicional el potencial de reducción de emisiones para cada tecnología. Dado que las emisiones de vehículos nuevos se reducen como resultado del mejoramiento tecnológico en cada periodo de tiempo, fue necesario desagregar el nivel vehículos en el mercado según la edad, de modo que los cálculos fueran más realistas. Para cada estrategia se midió el potencial de reducción de emisiones como el porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ respecto al caso base.

De acuerdo a lo anterior, el análisis de las estrategias usa como criterios la evaluación cualitativa y cuantitativa del patrón de comportamiento y el potencial de reducción de emisiones.

4.2.2 Estrategia fiscal y regulatoria

Según el EIA (2013), el apoyo político es crítico para promover la difusión de vehículos con fuentes alternativas en los mercados y las primeras medidas deberían intentar que los vehículos sean competitivos en precio. Entre las medidas que pueden aplicar los gobiernos para lograr este objetivo se encuentran las exenciones de impuestos. En Colombia, el precio de compra de un vehículo nuevo tiene tres tipos de impuestos: aranceles, impuesto al consumo e impuesto al valor agregado. En la Tabla 4-3 se muestra el porcentaje base de cada impuesto aplicado a cada tecnología.

Tabla 4-3: Impuestos a los vehículos en Colombia (CONFIS 2011; MAVDT 2011; Colombia 2002; Colombia 2005; MME 2010)

	Aranceles	Impuesto al consumo	Impuesto al valor agregado
Gasolina	35%	8%	16%
Gas dedicados	35%	8%	16%
Eléctricos	35%	19%	16%

El gobierno colombiano, a través del Consejo Superior de Política Fiscal (CONFIS) y con el Decreto 2658 de 2011 de los Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de Comercio y de Hacienda, aprobó la disminución del arancel al 0% para vehículos eléctricos y vehículos dedicados a gas natural por tres años iniciando el 2012 (CONFIS 2011). Además, con la reforma tributaria 1607 de 2012 se aprobó la eliminación del impuesto al consumo para vehículos con tecnologías limpias. De este modo, con la aplicación de la estrategia de exención de impuestos, se intenta que los vehículos con fuentes alternativas sean más competitivos en precio.

Las tasas impositivas afectan de forma directa el precio que deben pagar los consumidores, luego, las exenciones de impuestos representan una reducción en el precio que se traduce en una mayor atracción de los consumidores hacia las tecnologías limpias. Vale la pena recordar que la probabilidad de elegir una tecnología depende también de la intención de adoptarla, esto significa que aunque la tecnología sea atractiva, no será elegida si no hay intención suficiente para considerarla en el conjunto de elección.

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta sección se analiza con base en los definidos criterios tres escenarios: en el primero se evalúa la estrategia actual (0% aranceles por 3 años y 0% impuesto al consumo), en los otros dos se analizan los efectos de la política cuando las exenciones de aranceles se conservan por un periodo de tiempo mayor. Al final de la sección se responde a la pregunta ¿Qué pasaría si los precios fueran iguales?

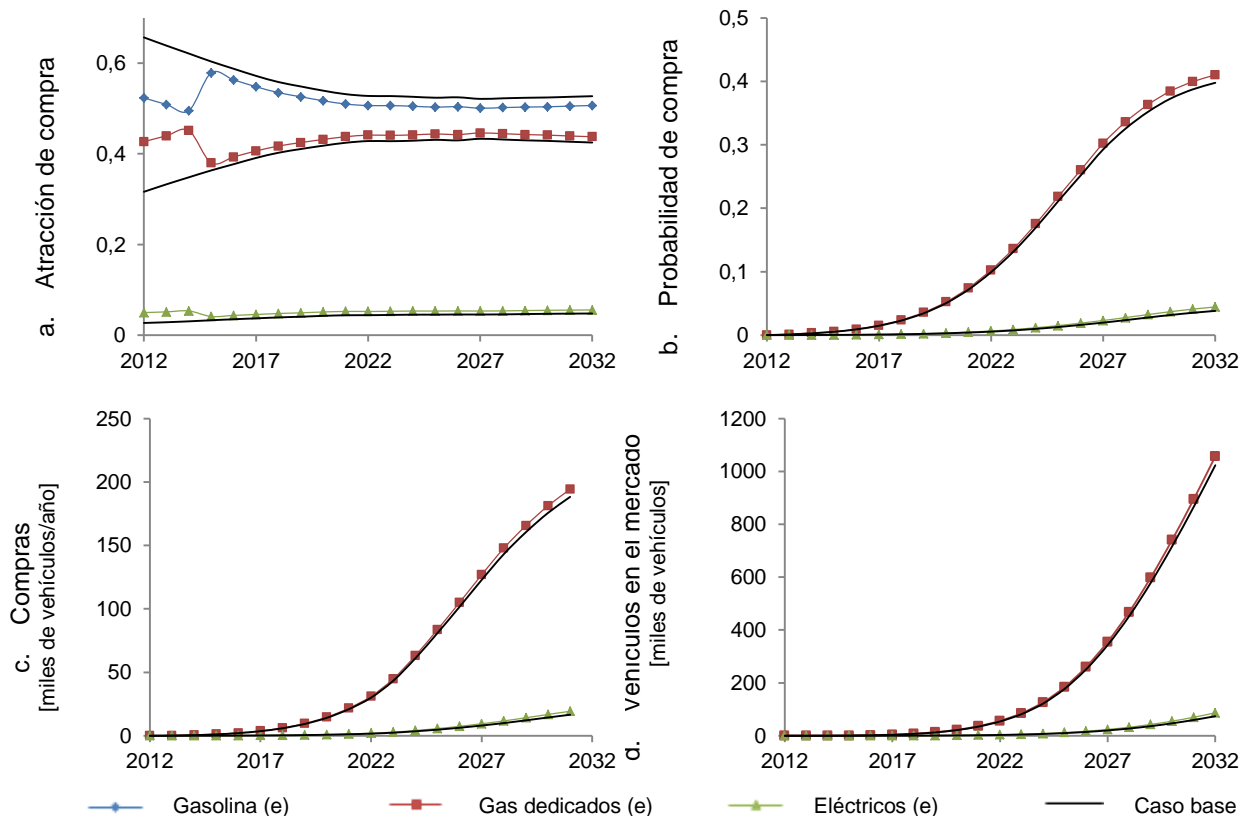
- **Escenario 1:** Exención de aranceles por 3 años y eliminación del impuesto al consumo.

La exención de impuestos se traduce en una mayor atracción para los vehículos dedicados a gas y los vehículos eléctricos durante el tiempo que dura el incentivo. En la Figura 4-4 se presentan los resultados obtenidos en forma comparativa al caso base. En

la Figura 4-4a se observa que a partir del año 2016, la eliminación de la exención arancelaria representa una reducción en la atracción para estas tecnologías. La evolución de esta variable a partir de ese año se debe al mejoramiento tecnológico de los atributos y a la dinámica de la infraestructura. En la Figura 4-4b se puede notar que los cambios en la atracción no tienen efectos significativos en la probabilidad de compra, lo anterior es debido a que la intención permanece igual y durante los primeros años es muy baja. El efecto del incentivo en las compras de los vehículos con fuentes alternativas se presenta en la Figura 4-4c, en ella se observa que las compras no varían representativamente y en consecuencia, la cantidad de estos vehículos en el mercado tampoco tiene grandes variaciones como se muestra en la Figura 4-4d.

Al final del periodo simulado, la participación de mercado para cada una de las tecnologías es 59.62% gasolina, 14.46% dedicados a gas, 1.18% eléctricos y 24.74% convertidos a gas. Estos porcentajes reflejan que después de aplicar la estrategia se sigue presentando una fuerte dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas.

Figura 4-4: Resultados de la estrategia de exención de impuestos en el escenario 1



Por otro lado, con la aplicación de la estrategia fiscal, bajo este escenario de difusión, las emisiones totales de CO₂ durante el periodo simulado se reducen en 0.05% respecto al caso base

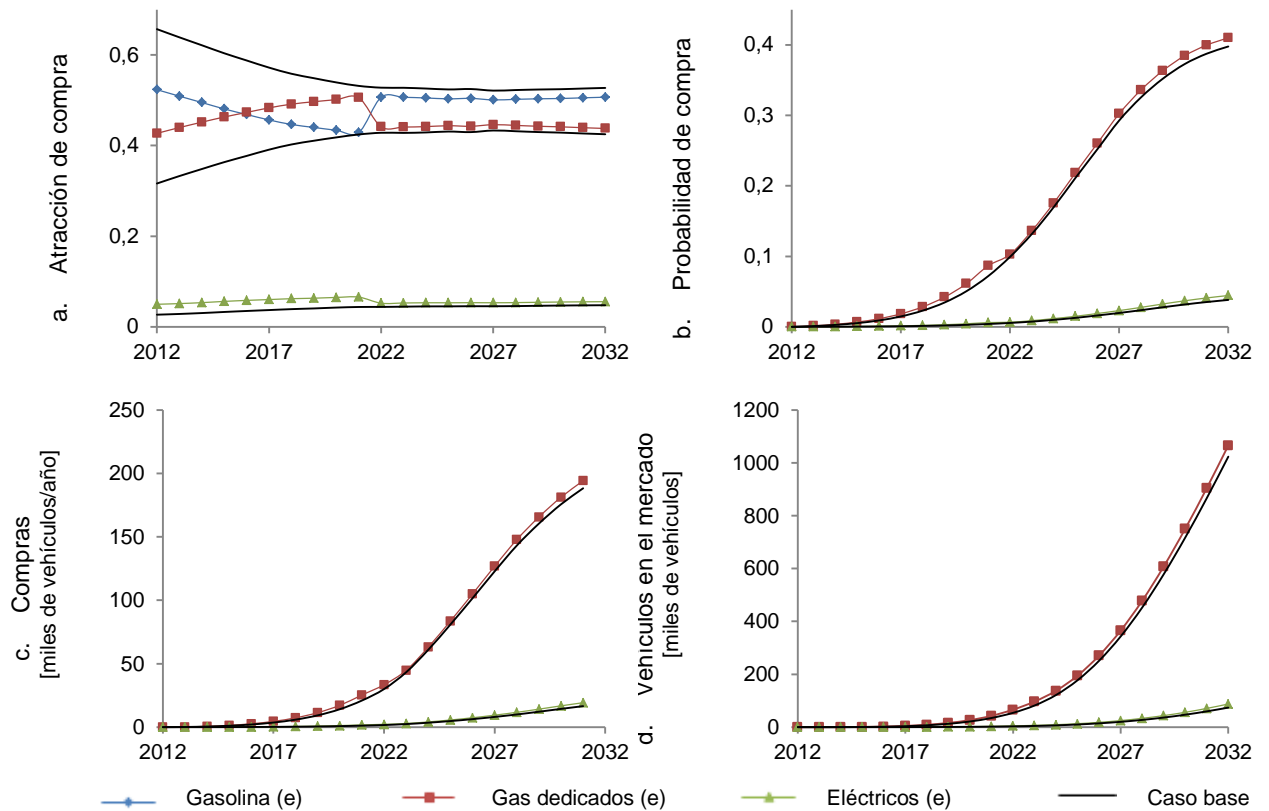
- **Escenario 2:** Exención de aranceles por 10 años y eliminación del impuesto al consumo.

En la Figura 4-5 se presentan los resultados obtenidos cuando la exención de aranceles se conserva por un periodo de 10 años. En la Figura 4-5a puede observarse que con la medida, la atracción de los vehículos con fuentes alternativas se incrementa respecto al caso base, de hecho, la atracción para los vehículos dedicados a gas supera las demás desde el 2016 hasta el 2021 debido a que en ese periodo es la tecnología con menor precio. A partir del año 2022 las curvas describen un comportamiento similar al del escenario anterior. Como consecuencia, la probabilidad de compra de las tecnologías (Figura 4-5b) se modifica parcialmente durante los años del incentivo, debido a que la intención permanece igual que en el caso base. Las compras no tienen grandes variaciones como se ilustra en la Figura 4-5c con lo cual tampoco se dan grandes cambios en el nivel vehículos en el mercado (Figura 4-5d).

En este escenario, al final del periodo simulado, la participación en el mercado de cada tecnología es 59.54% gasolina, 14.18% dedicados a gas, 1.20% eléctricos, 24.69% convertidos a gas. Estos porcentajes siguen mostrando dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas reflejando lentos procesos de difusión en cada una de las tecnologías.

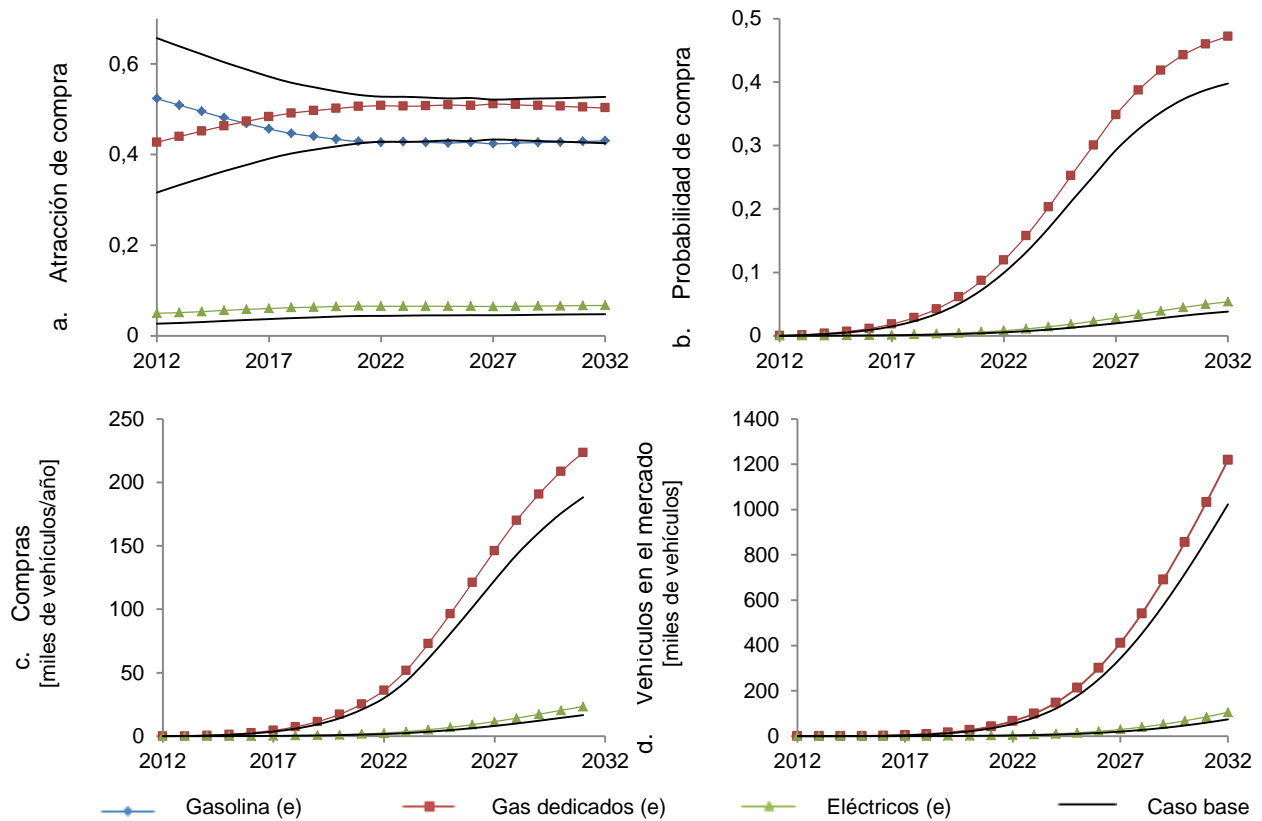
En relación con el potencial de reducción de emisiones, bajo este escenario, las emisiones totales de CO₂ durante el periodo simulado se reducen en 0.07% respecto al caso base.

Figura 4-5: Resultados de la estrategia de exención de impuestos en el escenario 2



- **Escenario 3:** Exención de aranceles por 20 años y eliminación del impuesto al consumo.

Cuando la exención de aranceles es por 20 años (periodo simulado), la curva de atracción de los vehículos dedicados a gas supera las demás a partir del año 2016, esto se evidencia en la Figura 4-6a, y se debe esencialmente a que es la tecnología con menor precio a partir de ese año. Los vehículos eléctricos también resultan favorecidos, e incrementan su atracción respecto al caso base. Sin embargo, estas variaciones no tienen mayor efecto sobre la probabilidad de compra en los primeros años (Figura 4-6b), dado que la intención es muy baja. La Figura 4-6c permite evidenciar que las compras vehículos con fuentes alternativas se incentivan con la aplicación de la estrategia y esto se refleja en la cantidad de vehículos en el mercado (Figura 4-6d).

Figura 4-6: Resultados de la estrategia de exención de impuestos en el escenario 3

Con las condiciones que ofrece este escenario, al final del periodo simulado, la participación en el mercado de cada tecnología es 57.62% gasolina, 16.67% dedicados a gas, 1.44% eléctricos, 24.27% convertidos a gas. Esto refleja que tras aplicar la estrategia en un periodo de 20 años se sigue presentando una fuerte dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas.

En relación con el potencial de reducción de emisiones, bajo este escenario, las emisiones totales de CO₂ durante el periodo simulado se reducen en 0.15% respecto al caso base.

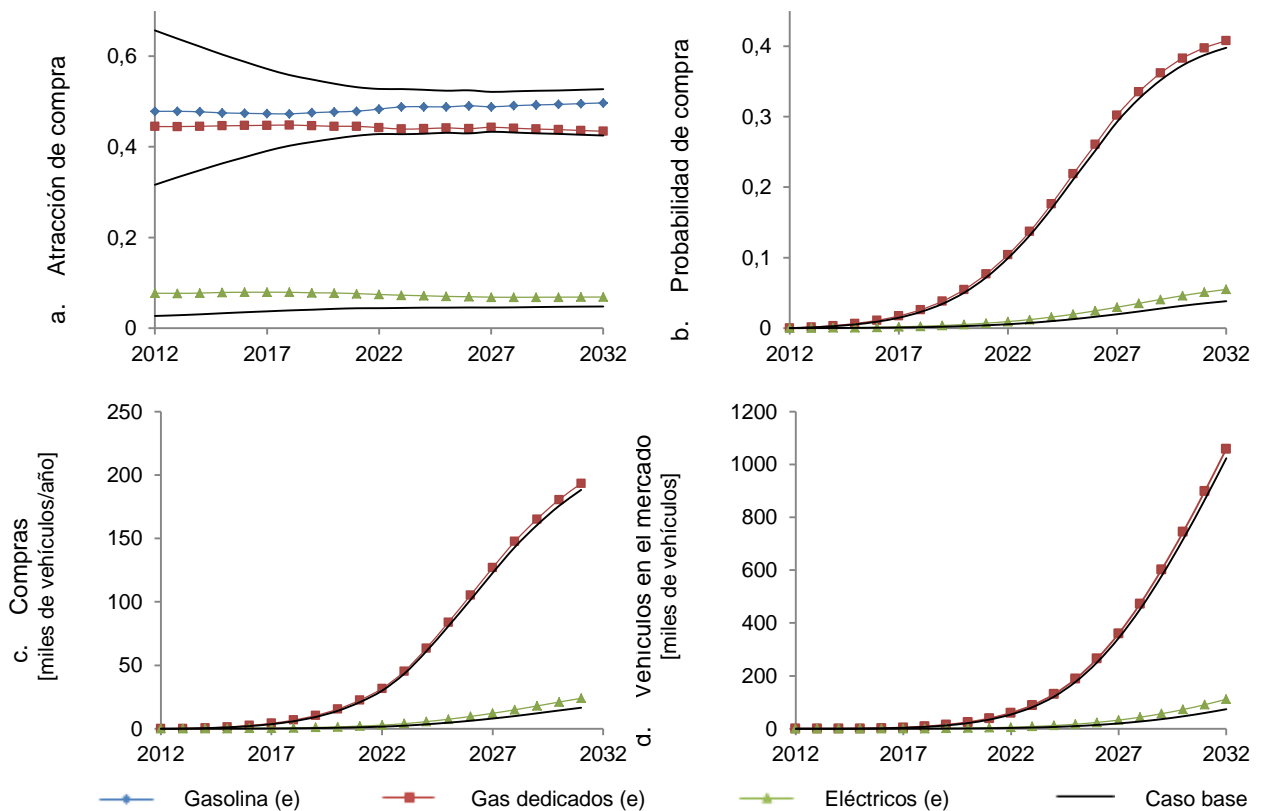
A partir de los resultados obtenidos, es posible afirmar que la política fiscal del gobierno colombiano no es significativamente efectiva para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado si se implementa en un periodo de 3 años y de manera aislada. A medida que se incrementa el periodo de implementación de la política, el panorama se muestra un poco más favorable para los vehículos con tecnologías

limpias. Sin embargo, la implementación independiente de esta estrategia no es suficiente para elevar la participación en el mercado de forma representativa.

▪ **¿Qué pasaría si los precios fueran iguales?**

En el caso hipotético de que los precios de las tecnologías fueran iguales durante todo el periodo simulado, se obtienen los resultados que se presentan en la Figura 4-7. En la Figura 4-7a se observa que la atracción de los vehículos con fuentes alternativas se incrementa respecto al caso base, sobre todo durante los primeros años, cuando las diferencias de precios son más grandes. A partir del año 2022 los cambios en la atracción son mayores para los vehículos eléctricos en comparación con el gas, evidenciando que igualar los precios resulta ser una estrategia más favorable para los vehículos eléctricos que tenían los más altos precios. Sin embargo, aun cuando se rompe la barrera del precio la atracción de los vehículos eléctricos sigue siendo baja debido, entre otros factores, al obstáculo que impone el altísimo tiempo de abastecimiento de esta tecnología.

Figura 4-7: Resultados cuando se rompe la barrera del precio



La Figura 4-7b muestra que los cambios en la atracción de los primeros años no tienen mayores efectos en la probabilidad de compra dada la baja intención que existe durante ese periodo. Como consecuencia, las compras de los vehículos tampoco varían de forma apreciable en ese periodo como se ilustra en la Figura 4-7c. Finalmente, la Figura 4-7d refleja que los cambios en la cantidad de vehículos en el mercado se hacen más notorios para los vehículos eléctricos.

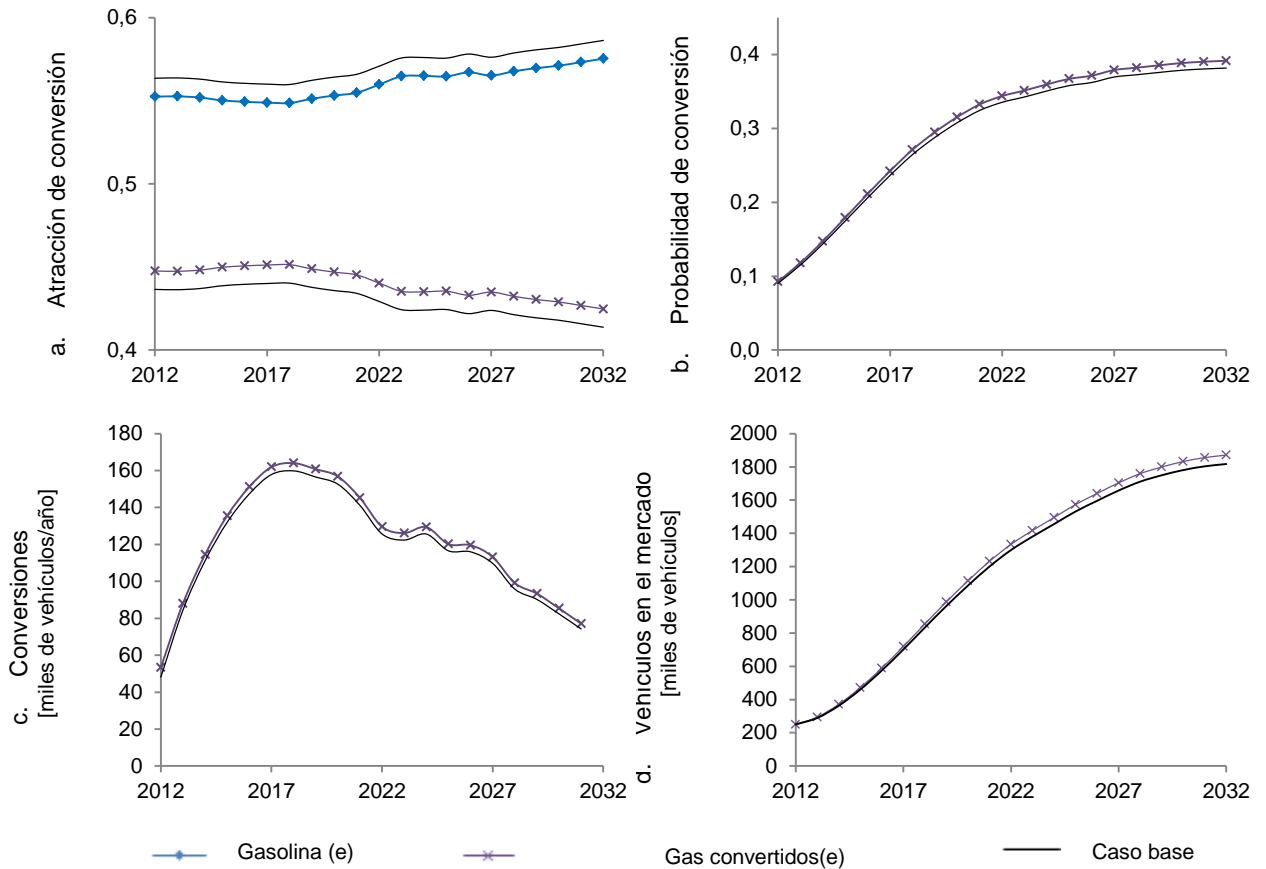
En este escenario, la participación de mercado para cada tecnología al final de la simulación es 59.34% gasolina, 14.48% dedicados a gas, 1.53% eléctricos, 24.65% convertidos a gas. Finalmente, las emisiones de CO₂ se reducen un 0.14% respecto al caso base.

4.2.3 Estrategia económica y financiera

En Colombia, se han desarrollado campañas de subsidios para incentivar la conversión de vehículos a gas teniendo en cuenta que este mercado es uno de los más importantes para el desarrollo del gas natural en el país (UPME 2010b). En general, los subsidios han consistido en un bono para la conversión que cubre el 35% del costo total de la conversión del vehículo (Vergara 2009). En esta sección se analiza el subsidio a la conversión, como una estrategia para romper la barrera financiera del costo de conversión, y se examina su potencial para elevar la tasa de conversión en el mercado. Luego se responde a la pregunta ¿Qué pasaría si el costo de la conversión fuera 0 pesos?

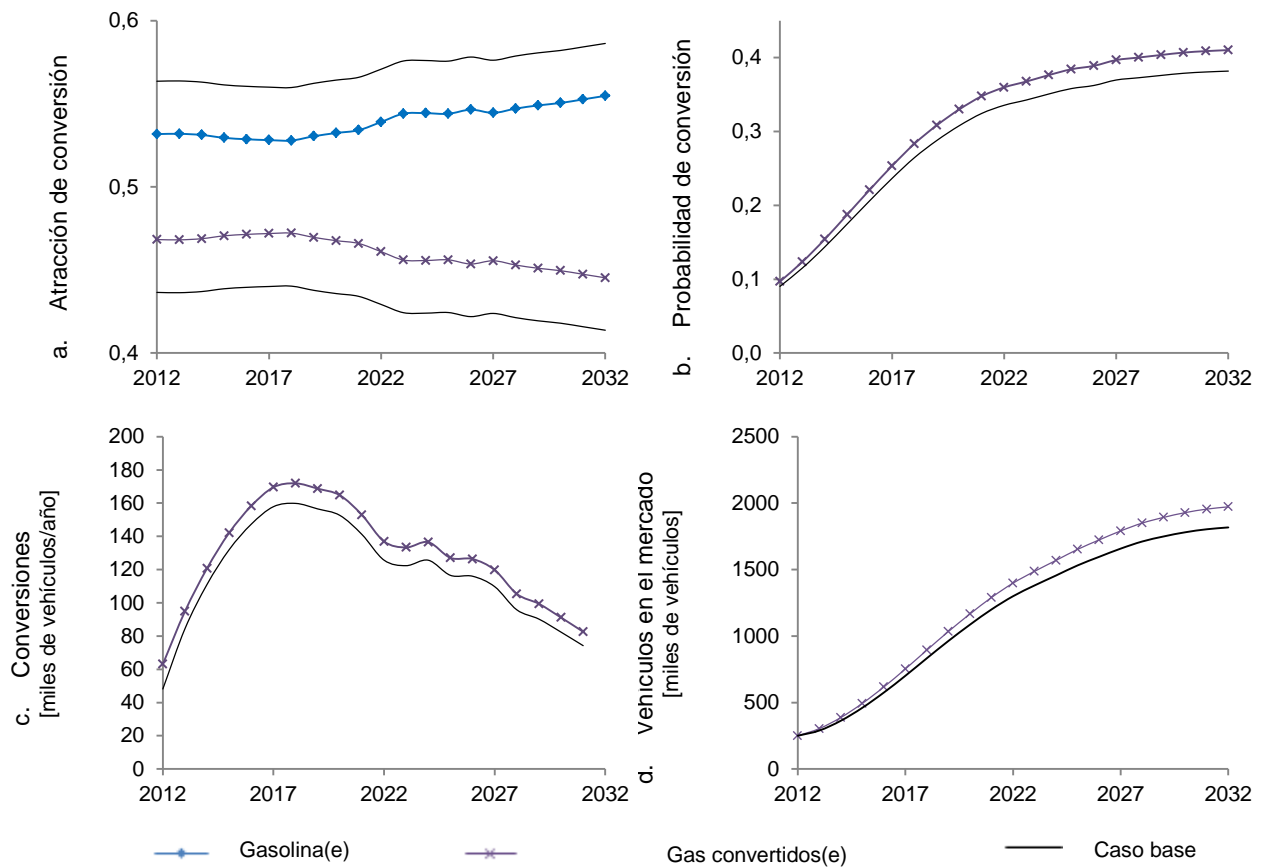
En la Figura 4-8a se observa que la estrategia del subsidio tiene efectos apreciables sobre la atracción de conversión para vehículos dedicados a gas que desplaza la curva hacia arriba y sigue reproduciendo el mismo comportamiento que en el caso base, en consecuencia la probabilidad de conversión (Figura 4-8b), las conversiones (Figura 4-8c) y la cantidad de vehículos dedicados a gas en el mercado (Figura 4-8d) describen cambios en sus dinámicas al desplazar sus curvas. De este modo, la participación de mercado para cada una de las tecnologías al final de la simulación es 59.40% gasolina, 14.00% gas dedicados, 1.01% eléctricos y 25.59% gas convertidos. Por otra parte, con la aplicación de la estrategia se reducen las emisiones de CO₂ 0.13% respecto al caso base.

Figura 4-8: Resultados con subsidio a la conversión



▪ **¿Qué pasaría si el costo de la conversión fuera 0 pesos?**

En un caso hipotético en el que las conversiones no tienen costo asociado, la atracción de conversión se incrementa durante todo el periodo simulado como se ilustra en la Figura 4-9a, este efecto se compensa con una reducción en la atracción de no convertirse. Los cambios descritos tienen efectos apreciables en la probabilidad de conversión (Figura 4-9b) que desplaza su curva hacia arriba, en consecuencia se notan variaciones en las conversiones (Figura 4-9c) y en la cantidad de vehículos en el mercado (Figura 4-9d). Los efectos que se observan gráficamente se reafirman numéricamente con un incremento en la participación en el mercado de los vehículos dedicados a gas en un 8.5% respecto al caso base. Al final del periodo simulado, la participación de mercado para cada tecnología es 28.02% gasolina, 14.00% gas dedicados, 1.01% gas convertidos y 26.97% gas convertidos. Con la aplicación de esta estrategia las emisiones de CO₂ se reducen un 0.37% respecto al caso base.

Figura 4-9: Resultados sin costo de conversión

Los resultados obtenidos indican que el subsidio incrementa la atracción de conversión a gas natural. Sin embargo, aun cuando el costo de la conversión sea cero, la dinámica de las conversiones desplaza su curva pero reproduce el mismo comportamiento en el tiempo, evidenciando que la decisión de convertirse no depende únicamente de ese atributo. Estos hallazgos son consistentes con los encontrados por Vergara (2009) quien estudió el programa de conversión a gas natural vehicular desarrollado por EPM con apoyo de ECOPEPETROL, su estudio se enfocó en investigar las razones por las cuales las personas deciden convertir sus vehículos y analizar los efectos del subsidio. Como resultado relevante de la investigación se encontró que el 57% de las personas que recibieron el subsidio hubieran convertido sus vehículos sin el incentivo.

4.2.4 Estrategia de comunicación y difusión

En esta sección se analiza una estrategia para aumentar la intención de los consumidores hacia las tecnologías limpias considerando que los consumidores deben tener intención hacia un producto y obtener información sobre él para incluirlo en su

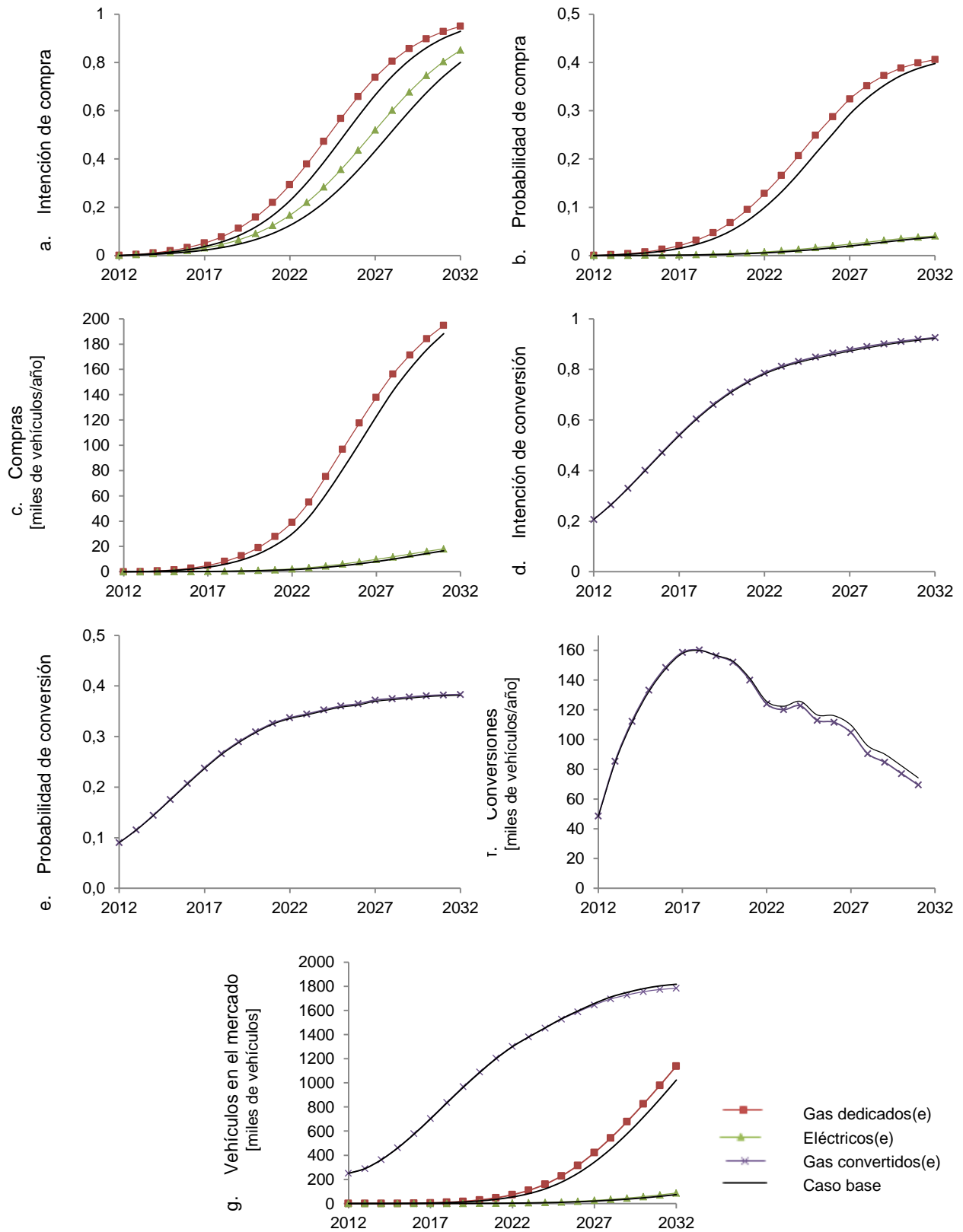
decisión de compra. Al final de la sección se responde a la pregunta ¿Qué pasaría si la intención de compra y conversión fuera 1?

Según Rogers (1995) cualquier factor que afecte la eficiencia del proceso de comunicación puede también alterar la velocidad con la cual un nuevo producto se difunde. Las herramientas de publicidad y mercadeo pueden afectar la eficiencia del proceso de comunicación durante la primera etapa del proceso de difusión (Tellefsen y Takada 1999; Peres, Muller, y Mahajan 2010). En ese periodo, la mayoría del conocimiento relacionado con el producto es transmitido a través de medios de comunicación masivos. De modo que la comunicación permite crear la intención inicial para que los consumidores tomen sus decisiones de compra. Estas relaciones están implícitas en el modelo de Bass que se usó para modelar la dinámica de la intención y se asocian al coeficiente de influencias externas.

En la literatura, (Tellefsen y Takada 1999) fue el primer estudio en reportar evidencia empírica de que cuando el mass media incrementa, el valor del coeficiente de influencias externas se eleva y de este modo se modifican los patrones de difusión de las tecnologías. Sin embargo, hasta ahora no se sabe exactamente en qué proporción se da el cambio del coeficiente. Luego, en esta investigación se supone que a través de diferentes medidas de publicidad y mercadeo se logra incrementar el coeficiente asociado a las influencias externas un 40% respecto al caso base y se analizan los efectos.

Los resultados de aplicar la estrategia se muestran en la Figura 4-10. La intención de compra para cada una de las tecnologías incrementa durante todo el periodo simulado como se ilustra en la Figura 4-10a. En consecuencia, la probabilidad de compra se eleva como se muestra en la Figura 4-10b. De este modo, las compras de vehículos con tecnologías limpias crecen, especialmente las de vehículos dedicados a gas (Figura 4-10c). Vale la pena notar que en las Figura 4-10a, b y c se observa un desplazamiento de las curvas hacia arriba conservándose los patrones de comportamiento en el tiempo. El análisis de las conversiones permite afirmar que su dinámica no es muy sensible a cambios en el coeficiente asociado a las influencias externas. En consecuencia, la intención, probabilidad y conversiones no varían de forma apreciable con la aplicación de la estrategia como se ilustra en la Figura 4-10 c,d y f.

Figura 4-10: Resultados de política de comunicación



El resultado conjunto de estas variaciones sobre la cantidad de vehículos en el mercado permite evidenciar que hay un leve desplazamiento para las curvas de vehículos dedicados a gas y vehículos eléctricos (Figura 4-10g). Sin embargo, los cambios continúan reflejando lentos procesos de difusión. Con las condiciones que ofrece este escenario, al final del periodo simulado, la participación en el mercado de cada tecnología es 58.84% gasolina, 15.58% dedicados a gas, 1.19% eléctricos, 24.39% convertidos a gas. Esto refleja que tras aplicar la estrategia se sigue presentando dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas.

En relación con el potencial de reducción de emisiones, bajo este escenario, las emisiones totales de CO₂ durante el periodo simulado se reducen en 0.09% respecto al caso base.

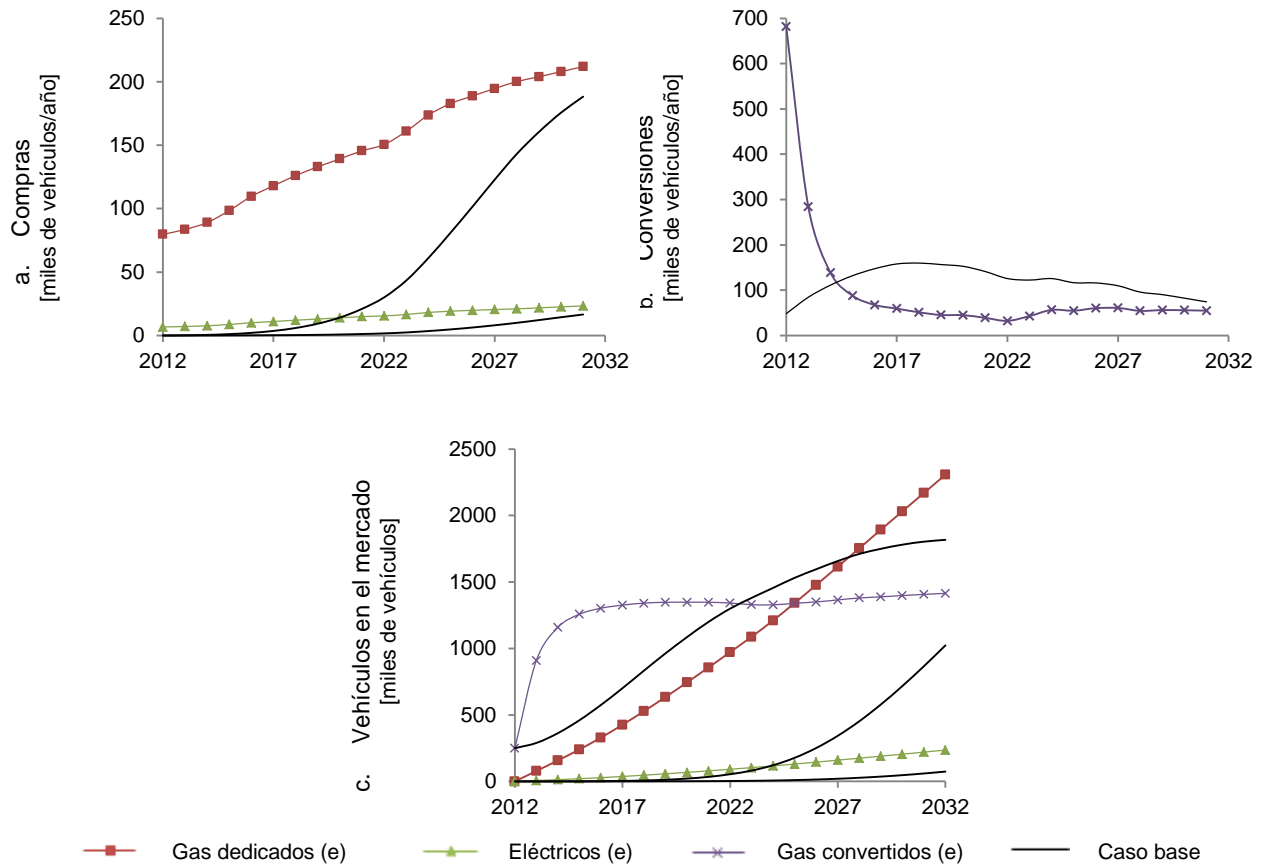
▪ **¿Qué pasaría si la intención de compra y conversión fuera 1?**

En este escenario, se rompe la barrera de la intención de modo que todas las tecnologías tienen intención de compra y conversión igual a 1 durante el periodo simulado y en consecuencia, la probabilidad de compra y conversión es igual a la atracción. Los resultados indican que las compras de vehículos a gas se incentivan mucho más que las compras de vehículos eléctricos, dado que estos últimos tienen muy poca atracción durante todo el periodo simulado (Figura 4-11a). La dinámica de las conversiones, en la Figura 4-11b, ilustra que toda la población atraída en cada periodo se convierte. Las conversiones decrecen hasta el 2022 porque se va alcanzando el mercado potencial, el cambio de comportamiento de ese año se debe a la tasa de motorización. La dinámica de las conversiones a partir del 2023 se asocia esencialmente a variaciones en la atracción. En consecuencia de las compras y las conversiones, la dinámica de los vehículos en el mercado se modifica de forma apreciable (Figura 4-11c), por ejemplo, la cantidad de vehículos convertidos a gas se estabiliza y es superada por la cantidad de vehículos dedicados a gas.

Con las condiciones que ofrece este escenario, al final del periodo simulado, la participación en el mercado de cada tecnología es 45.87% gasolina, 31.55% dedicados a gas, 3.23% eléctricos, 19.35% convertidos a gas. Esto refleja que tras aplicar la estrategia se sigue presentando dominancia de los vehículos convencionales sobre las

demás tecnologías, sin embargo se logra reducir su participación en el mercado. Finalmente, las emisiones de CO₂ se reducen un 2.60% respecto al caso base.

Figura 4-11: Resultados cuando la intención es 1



A partir de los resultados encontrados en esta sección es posible concluir que modificar la intención de los consumidores hacia las tecnologías alternativas influye en los resultados del proceso de difusión. Las herramientas de publicidad y mercadeo, cuyo efecto se incluyó a través de cambios en influencias externas, resultaron ser más efectivas para incrementar las compras de vehículos alternativos que para modificar las conversiones.

4.2.5 Estrategia de abastecimiento

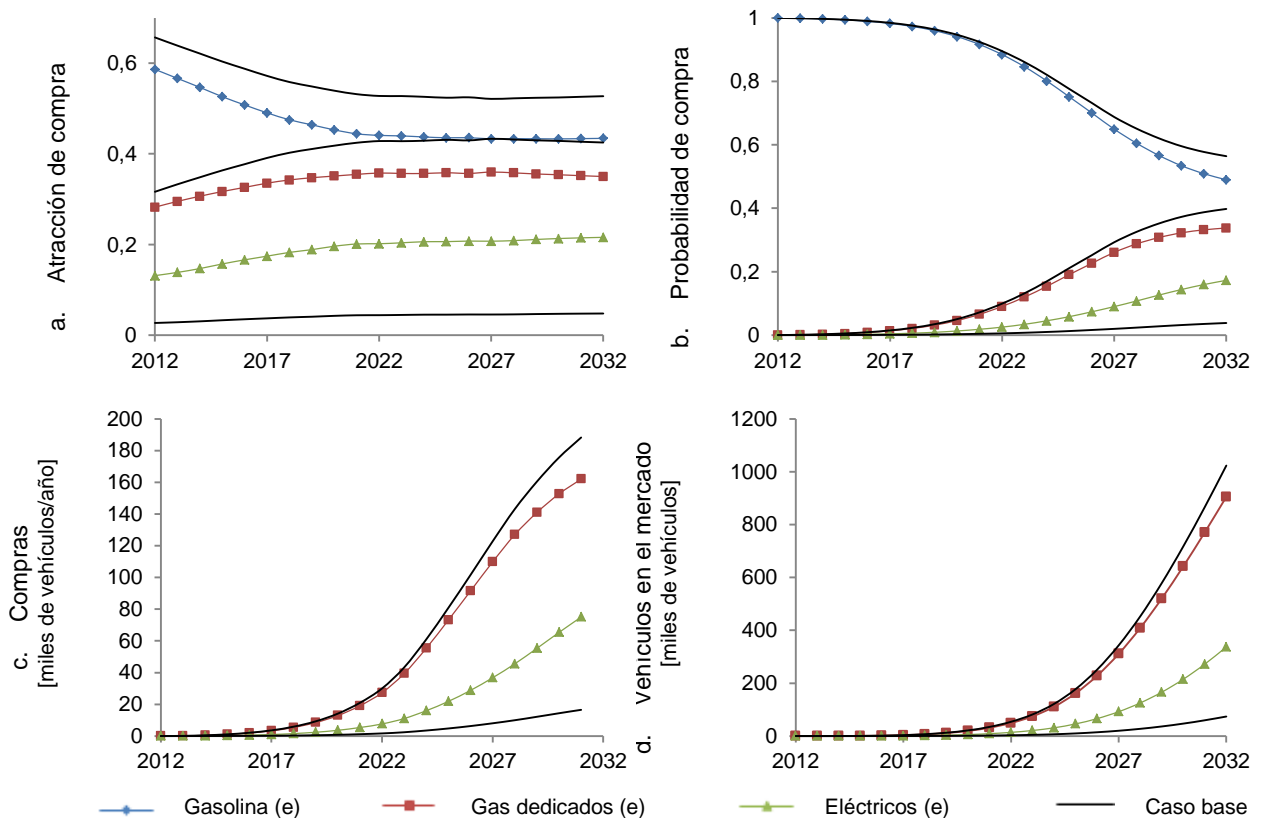
En esta sección, se modela un par de escenarios en los cuales se pretende romper la barrera de disponibilidad de mercado asociada al tiempo de abastecimiento a través de cambio en los hábitos de consumo (escenario 1) y construcción de infraestructura de

soporte (escenario 2). Las estrategias se orientan a los vehículos eléctricos dado que los vehículos a gas tienen tiempos de carga similares a los vehículos a gasolina y una infraestructura de abastecimiento que crece según la cantidad de vehículos en el mercado. Al final de la sección se responde a la pregunta ¿Qué pasaría si los tiempos de carga fueran similares y la disponibilidad de puntos de abastecimiento fuera 100%?

- **Escenario 1:** Cambio en hábitos de consumo: Separando el tiempo de carga del tiempo de espera para la carga

Con esta estrategia se pretende que a través de diferentes medios de comunicación y difusión se logre que la población realice un cambio en los hábitos de consumo y sea consciente de la importancia de poner a cargar el vehículo eléctrico cuando llegue a casa. De este modo, este escenario supone que el tiempo de carga real (360 minutos) se convierte en un tiempo de carga percibido de 5 minutos correspondiente al tiempo que se demora el consumidor en poner a cargar el vehículo o el tiempo de espera para iniciar la carga. Los resultados obtenidos tras aplicar esta estrategia se ilustran en la Figura 4-12.

Figura 4-12: Resultados con cambio en los hábitos de consumo



En la Figura 4-12a se observa que la atracción de vehículos eléctricos se incrementa considerablemente respecto al caso base durante todo el periodo simulado. Este crecimiento se compensa con una reducción en la atracción de las otras tecnologías. Con la aplicación de la estrategia se logra que las curvas de atracción estén más cerca. De estos cambios, la probabilidad de compra de vehículos eléctricos es la que tiene mayores variaciones como se observa en la Figura 4-12b. A su vez, las probabilidades de compra de vehículos a gas y vehículos a gasolina se reducen. Como resultado de estas variaciones, la dinámica de las compras para vehículos eléctricos se modifica aumentando su pendiente mientras que para los vehículos a gas se reduce (Figura 4-12c). En consecuencia, la cantidad de vehículos eléctricos se incrementa durante toda la simulación (Figura 4-12d).

En este escenario, al final del periodo simulado, la participación en el mercado de cada tecnología es 58.50% gasolina, 12.38% dedicados a gas, 4.61% eléctricos, 24.51% convertidos a gas. Estos porcentajes siguen mostrando dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas, aunque se acelera el proceso de difusión de los vehículos eléctricos. En relación con el potencial de reducción de emisiones, bajo este escenario, las emisiones totales de CO₂ durante el periodo simulado se reducen en 0.76% respecto al caso base.

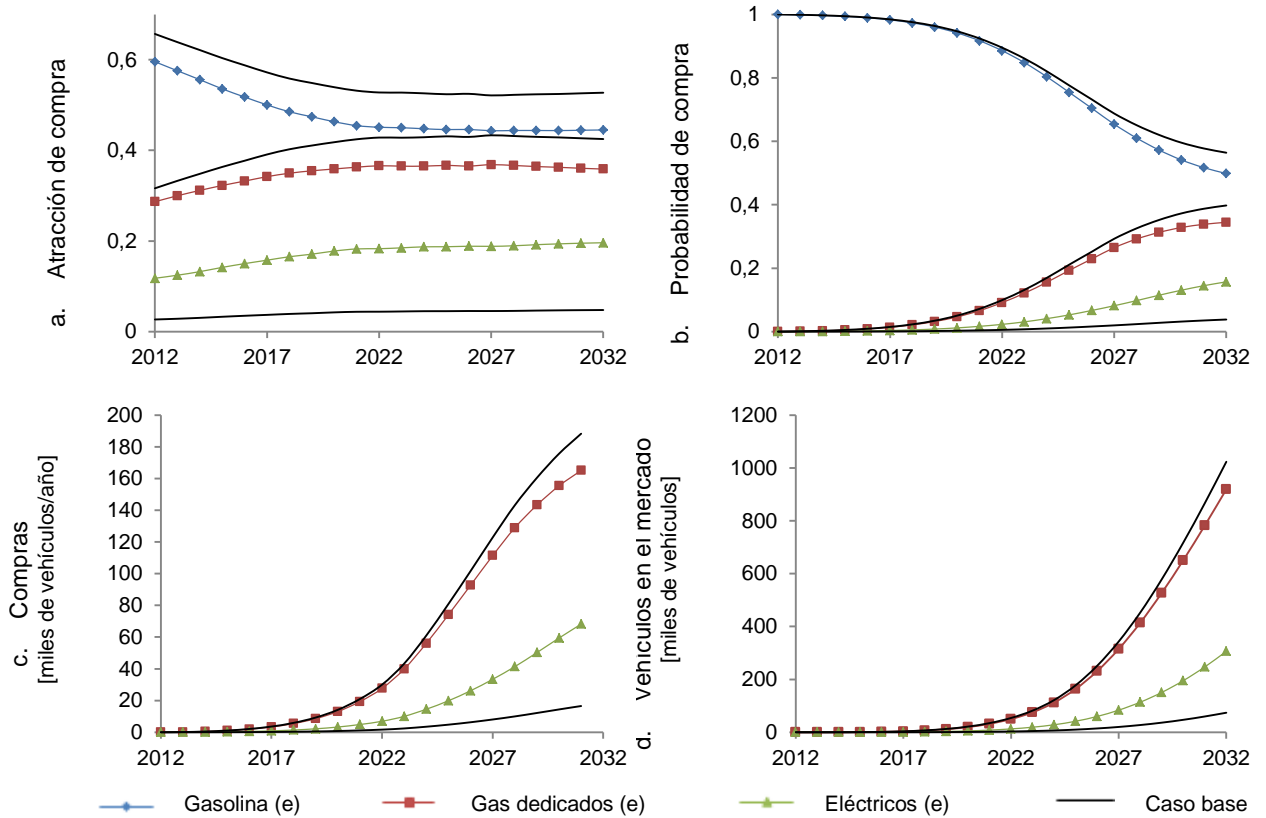
- **Escenario 2:** Construcción de infraestructura de soporte.

A partir de la revisión de la literatura es posible identificar una hipótesis según la cual cargar los vehículos eléctricos en estaciones de carga rápida puede mejorar la atracción de los consumidores e incrementar en nivel de penetración en el mercado al superar una de las barreras relacionadas con esta tecnología: el alto tiempo de carga (Yunus, de la Parra, y Reza 2011; Etezadi-Amoli, Choma, y Stefani 2010). Con base en lo anterior, en este escenario se considera la construcción de electrolíneas como infraestructura de soporte para la carga de vehículos eléctricos. Estas estaciones de carga permiten que en 30 minutos se logre el 80% de la carga del vehículo (Hackbarth y Madlener 2013).

En este escenario inicialmente hay una disponibilidad de abastecimiento del 0%, se supone que la construcción de las electrolíneas sigue la dinámica de la infraestructura y depende de la relación vehículos por estaciones necesarias. De este modo, a medida que aumenta la cantidad de vehículos eléctricos se hace necesario ampliar la

infraestructura de abastecimiento, incluyendo un mayor número de estaciones de recarga públicos. Así, se incluye la infraestructura de soporte como factor relevante en la adopción de los vehículos eléctricos en el mercado. Como resultado de la aplicación de esta estrategia se obtienen los resultados que se ilustran en la Figura 4-13.

Figura 4-13: Resultados construcción de infraestructura de soporte



La atracción de compra para los vehículos eléctricos se incrementa de forma apreciable respecto al caso base como se ilustra en la Figura 4-13a, e igual que en el escenario anterior ese cambio implica una reducción en la atracción de las demás tecnologías permitiendo que las curvas se acerquen como indicador de una mayor competitividad. En consecuencia, la probabilidad de compra de vehículos eléctricos se incrementa durante toda la simulación mientras se reducen las de las demás tecnologías. Estos resultados son más notorios a partir del 2022 donde se observa el tiempo de despegue de la difusión (Figura 4-13b). La dinámica de las compras de vehículos eléctricos evidencia que es la tecnología más favorecida con la estrategia al incrementar la pendiente de la difusión (Figura 4-13c). El efecto agregado de estos cambios se observa en la Figura

4-13d a partir de los vehículos en el mercado, esta figura muestra que los vehículos eléctricos alcanzan una mayor participación del mercado mientras que los vehículos a gas la reducen respecto al caso base.

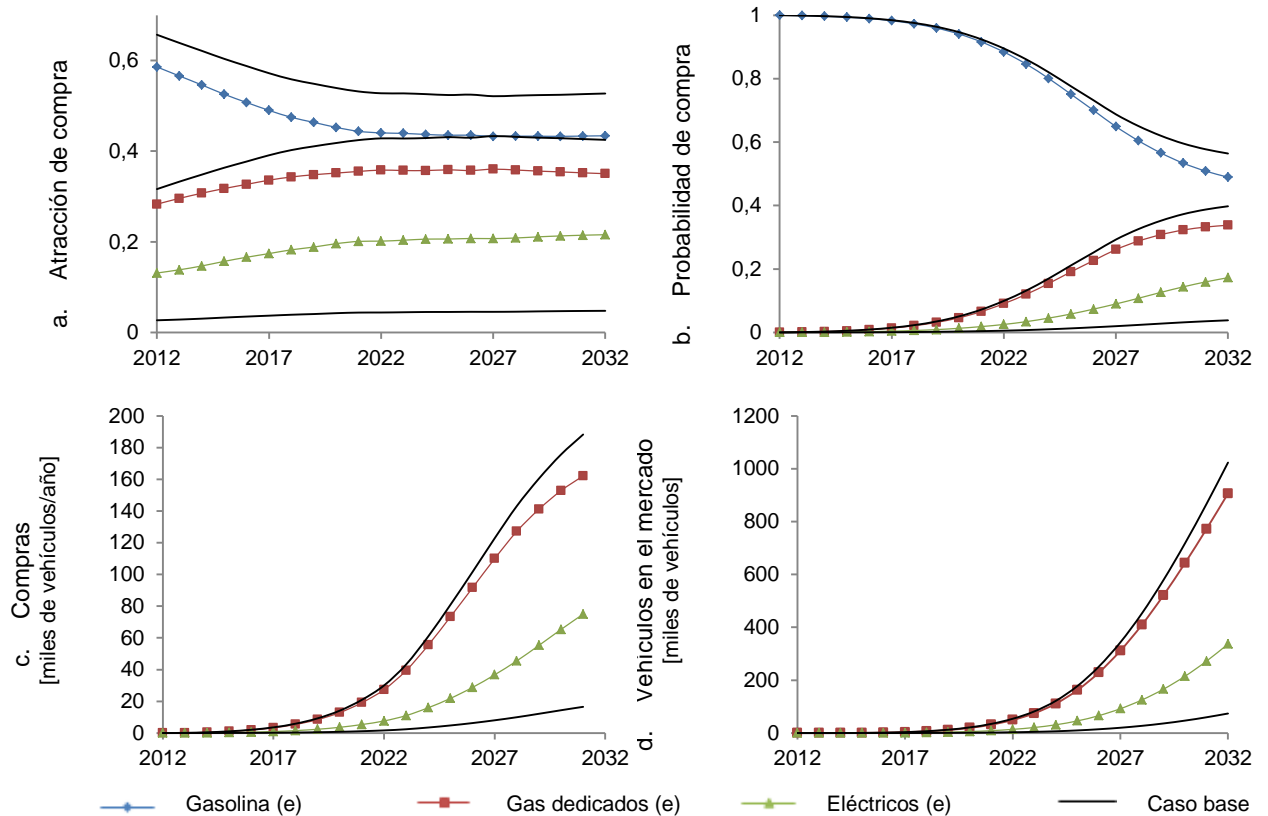
Bajo este escenario, la participación de mercado para cada tecnología al final del periodo simulado es 58.69% gasolina, 12.57% gas dedicados, 4.19% eléctricos y 24.55% gas convertidos. Estas proporciones indican que los vehículos tradicionales siguen dominando el mercado y que los vehículos eléctricos superan la cantidad de vehículos dedicados a gas. Finalmente, con la aplicación de la estrategia, las emisiones de CO₂ se reducen un 0.67% respecto al caso base.

▪ **¿Qué pasaría si la disponibilidad fuera el 100% para todas las tecnologías y los tiempos de abastecimiento fueran similares?**

En un caso hipotético en el cual se rompieran completamente las barreras de técnicas asociadas al tiempo de carga y a la disponibilidad de puntos de abastecimiento, los resultados de la difusión de la tecnologías indican curvas de atracción más cercanas que favorecen a los vehículos eléctricos y desfavorecen la demás alternativas como se ilustra en la Figura 4-14a. Como consecuencia, se incrementa representativamente la probabilidad de compra de vehículos eléctricos respecto al caso base, reduciendo, en mayor medida, la probabilidad de compra de vehículos a gasolina (Figura 4-14b). De este modo, las compras de vehículos eléctricos se incrementan respecto al caso base mientras se disminuyen las compras de vehículos dedicados a gas (Figura 4-14c). Finalmente, la dinámica de los vehículos en el mercado (Figura 4-14d) reafirma que cuando se rompen las barreras asociadas a tiempo de abastecimiento y disponibilidad, los vehículos eléctricos son la tecnología más favorecida e incrementa de forma apreciable su tasa de difusión.

Al final del periodo simulado, la participación en el mercado de cada tecnología es 58.47% gasolina, 12.39% dedicados a gas, 4.61% eléctricos, 24.53% convertidos a gas. Esto refleja que tras aplicar la estrategia se sigue presentando dominancia de los vehículos convencionales sobre los vehículos con fuentes alternativas, sin embargo se logra reducir su participación en el mercado un 2.8%. Finalmente, las emisiones de CO₂ se reducen un 0.77% respecto al caso base.

Figura 4-14: Resultados cuando se rompen las barreras técnicas de tiempo de abastecimiento y disponibilidad



A partir del análisis realizado en esta sección es posible concluir que romper la barrera del tiempo de abastecimiento a través de cambio en los hábitos de consumo o construcción de infraestructura de soporte eleva la atracción de los vehículos eléctricos en forma notable y en consecuencia modifica la trayectoria de la difusión.

4.2.6 Comparación de las estrategias

En la Tabla 4-4 se presenta el resumen numérico de los criterios participación del mercado y emisiones. Se presentan por columna los valores encontrados en el caso base y en cada escenario y por fila cada una de las tecnologías. Con el propósito de facilitar el análisis del criterio participación del mercado se muestran los valores del caso base (en la parte superior de la tabla) y la variación del indicador en cada escenario (en el medio de la tabla). Además, se calculó el porcentaje de participación agregado de vehículos con fuentes alternativas y la variación de este indicador con cada estrategia. En la parte inferior de la tabla se muestra el resumen del criterio potencial de reducción de emisiones de forma comparativa al caso base.

Tabla 4-4: Resumen comparativo de las estrategias modeladas

Participación en el mercado	Estrategia Fiscal y regulatoria				Estrategia económica y financiera		Estrategia de comunicación y difusión		Estrategia de abastecimiento			
	Base	Escenario 1 (3 años)	Escenario 2 (10 años)	Escenario 3 (20 años)	Escenario Límite	Subsidio 35%	Escenario límite	Influencias externas ↑ 40%	Escenario límite	Escenario 1 (5 min)	Escenario 2 (30 min)	Escenario Límite
	Gasolina	60.14%	59.62%	59.54%	57.62%	59.34%	59.40%	58.02%	58.84%	45.87%	58.50%	58.69%
Gas dedicados	14.00%	14.46%	14.58%	16.67%	14.48%	14.00%	14.00%	15.58%	31.55%	12.38%	12.57%	12.39%
Eléctricos	1.01%	1.18%	1.20%	1.44%	1.53%	1.01%	1.01%	1.19%	3.23%	4.61%	4.19%	4.61%
Gas convertidos	24.85%	24.74%	24.69%	24.27%	24.65%	25.59%	26.97%	24.39%	19.35%	24.51%	24.55%	24.53%
Total VFA	39.86%	40.38%	40.46%	42.38^a	40.66%	40.60%	41.98%	41.16%	54.13^b	41.50^a	41.31^a	41.53%

Variación en la participación	Estrategia Fiscal y regulatoria				Estrategia económica y financiera		Estrategia de comunicación y difusión		Estrategia de abastecimiento			
	Base	Escenario 1 (3 años)	Escenario 2 (10 años)	Escenario 3 (20 años)	Escenario Límite	Subsidio 35%	Escenario límite	Influencias externas ↑ 40%	Escenario límite	Escenario 1 (5 min)	Escenario 2 (30 min)	Escenario Límite
	Gasolina		-0.86%	-0.99%	-4.19%	-1.33%	-1.22%	-3.52%	-2.16%	-23.72%	-2.72%	-2.40%
Gas dedicados		3.29%	4.14%	19.11%	3.48%	0.00%	0.01%	11.31%	125.40%	-11.56%	-10.21%	-11.46%
Eléctricos		17.08%	18.29%	42.65%	50.79%	0.00%	-0.01%	17.47%	219.16%	355.55%	313.82%	355.23%
Gas convertidos		-0.48%	-0.67%	-2.36%	-0.81%	2.95%	8.52%	-1.85%	-22.16%	-1.37%	-1.21%	-1.29%
Total VFA		1.29%	1.50%	6.32^a	2.00%	1.84%	5.32%	3.26%	35.78^b	4.11^a	3.63^a	4.19%

Potencial de reducción de emisiones	Estrategia Fiscal y regulatoria				Estrategia económica y financiera		Estrategia de comunicación y difusión		Estrategia de abastecimiento			
	Base	Escenario 1 (3 años)	Escenario 2 (10 años)	Escenario 3 (20 años)	Escenario Límite	Subsidio 35%	Escenario límite	Influencias externas ↑ 40%	Escenario límite	Escenario 1 (5 min)	Escenario 2 (30 min)	Escenario Límite
		1.42E+10	-0.05% ^c	-0.07% ^c	-0.15% ^c	-0.14% ^c	-0.13% ^c	-0.37% ^c	-0.09% ^c	-2.60%^{bc}	-0.76% ^c	-0.67% ^c

Notas:

- Estrategias más efectivas: exenciones de impuestos por 20 años favorece los vehículos dedicados a gas, estrategias de abastecimiento favorecen los vehículos eléctricos
- Romper completamente la barrera de la intención es lo más efectivo para aumentar la participación en el mercado y reducir las emisiones
- Con todas las estrategias se reducen emisiones

En la Tabla 4-4 se observa que los cambios más representativos en términos porcentuales se producen con la estrategia de abastecimiento. Sin embargo, aún en dichos escenarios la participación de mercado de los vehículos con fuentes alternativas es baja y la dominancia de los vehículos convencionales se conserva.

El análisis independiente de los resultados obtenidos para la estrategia fiscal y regulatoria indica que a medida que aumenta el periodo de aplicación del incentivo se observan mayores variaciones en la participación de mercado de los vehículos con fuentes alternativas. Lo anterior está asociado a un desplazamiento de las curvas de atracción en el tiempo que dura el incentivo.

Los resultados evidencian que cuando se rompen por completo las barreras de entrada al mercado (escenarios límite) se logra una mayor participación de los vehículos con fuentes alternativas en comparación con las estrategias modeladas. Exceptuando el caso de la estrategia fiscal y regulatoria dado que el escenario de precios iguales no resulta tan favorecedor para los vehículos dedicados a gas, esto se debe a que, con el incentivo, esta tecnología gozaba de precios inferiores a los vehículos tradicionales desde el año 2017.

Cuando se analizan las participaciones de mercado de cada una de las tecnologías se evidencia que bajo todos los escenarios, los vehículos a gasolina tienen la mayor participación de mercado, seguida por los vehículos convertidos a gas, exceptuando el caso límite de la estrategia de comunicación. El orden continúa con los vehículos dedicados a gas y finalmente los vehículos eléctricos. El dominio de los vehículos dedicados a gas sobre los vehículos eléctricos se explica por la mayor intención y atracción de esta tecnología durante todo el periodo simulado bajo los diferentes escenarios.

Al analizar las variaciones porcentuales de todas las estrategias que afectan las compras (fiscal y regulatoria, comunicación y difusión y abastecimiento), es posible notar que la tecnología de vehículos eléctricos es la que tiene mayores cambios porcentuales respecto al caso base, tales cambios se hacen mucho más significativos bajo las estrategias de abastecimiento e indican que existen posibilidades para modificar la difusión.

Las estrategias más efectivas para elevar la participación en el mercado de vehículos con fuentes alternativas son las exenciones de impuestos por 20 años y las estrategias de abastecimiento. En el primer caso se favorecen los vehículos dedicados a gas, en el segundo caso se favorecen los vehículos eléctricos. Por su parte, las estrategias de abastecimiento son las que ofrecen un mayor potencial de reducción de emisiones dado que impulsan la difusión de la tecnología más limpia: vehículos eléctricos.

Finalmente, el análisis agregado del potencial de reducción de emisiones muestra que a pesar de que los vehículos con tecnologías limpias tienen poca participación en el mercado, su difusión permite reducir, aunque sea poco, la cantidad de emisiones de CO₂ aportando de esta manera a la búsqueda de un transporte particular bajo en carbono.

4.2.7 Combinación de estrategias

El propósito de esta combinación es verificar si la aplicación conjunta de estrategias produce mejores resultados que la aplicación aislada de cada una. Existen un total de 36 combinaciones posibles para abarcar todas las opciones estratégicas analizadas en la sección anterior y sus mezclas. Sin embargo, sólo se seleccionaron algunos casos en los que o bien la aplicación independiente ya produjera resultados favorables o existiera interés explícito en observar los resultados. De este modo se reducen las combinaciones a ocho:

- i. Fiscal y regulatoria (20 años) + Comunicación y difusión
- ii. Fiscal y regulatoria (20 años) + Abastecimiento (5 minutos)
- iii. Fiscal y regulatoria (20 años) + Abastecimiento (30 minutos)
- iv. Comunicación + Económica y financiera
- v. Comunicación y difusión + Abastecimiento (5 minutos)
- vi. Comunicación y difusión + Abastecimiento (30 minutos)
- vii. Fiscal y regulatoria (20 años) + Comunicación y difusión + Económica y financiera + Abastecimiento (5 minutos)
- viii. Fiscal y regulatoria (20 años) + Comunicación y difusión + Económica y financiera + Abastecimiento (30 minutos)

La combinación de estrategias sólo se analizó con los criterios la participación de vehículos en el mercado y el potencial de reducción de emisiones. En la Tabla 4-5 se presentan por columnas los valores encontrados en el caso base y en cada combinación de estrategias y por fila cada una de las tecnologías. El resto de la tabla tiene la misma estructura que la Tabla 4-4 en la cual los resultados de las variaciones se presentan de forma comparativa al caso base.

Al revisar los resultados es posible notar que la aplicación conjunta de las medidas produce mejores resultados que la aplicación independiente de cada una de ellas. Además, el análisis de los criterios participación de mercado y emisiones indica que las combinaciones de la estrategia fiscal y regulatoria con las estrategias de abastecimiento son las más efectivas pues impulsan al mismo tiempo los vehículos dedicados a gas y los vehículos eléctricos. De esta forma, con estas combinaciones se logran las mayores participaciones en el mercado de vehículos con fuentes alternativas y los mayores potenciales de reducción de emisiones.

Finalmente, puede observarse que bajo las condiciones más favorables para la difusión (combinaciones de todas las políticas que modifican intención y atracción), se encuentra una mayor aceptación de las nuevas tecnologías por los consumidores y la participación de mercado agregada de los vehículos con fuentes alternativas se acerca a la de vehículos convencionales.

Tabla 4-5: Resumen comparativo combinación de estrategias

Participación en el mercado

	Base	Estrategia fiscal (20 años) + comunicación	Estrategia fiscal (20 años) + abastecimiento (5 min)	Estrategia fiscal (20 años) + abastecimiento (30 min)	Estrategia económica + comunicación	Estrategia comunicación+ abastecimiento (5 min)	Estrategia comunicación+ abastecimiento (30 min)	Estrategia abastecimiento (5 min) + todas	Estrategia abastecimiento (30 min) + todas
Gasolina	60.14%	56.05%	55.85%	56.05%	58.12%	56.93%	57.16%	53.31%	53.53%
GNV dedicados	14.00%	18.55%	14.13%	14.41%	15.58%	13.68%	13.90%	15.55%	15.88%
Eléctricos	1.01%	1.70%	6.13%	5.61%	1.19%	5.42%	4.92%	7.21%	6.60%
GNV convertidos	24.85%	23.70%	23.89%	23.93%	25.12%	23.97%	24.02%	23.93%	23.98%
Total VFA	39.86%	43.95%	44.15%^a	43.95%^a	41.88%	43.07%	42.84%	46.69%^b	46.47%^b

Variación en la participación

	Estrategia fiscal (20 años) + comunicación	Estrategia fiscal (20 años) + abastecimiento (5 min)	Estrategia fiscal (20 años) + abastecimiento (30 min)	Estrategia económica + comunicación	Estrategia comunicación+ abastecimiento (5 min)	Estrategia comunicación+ abastecimiento (30 min)	Estrategia abastecimiento (5 min) + todas	Estrategia abastecimiento (30 min) + todas
Gasolina	-6.80%	-7.13%	-6.80%	-3.36%	-5.33%	-4.96%	-11.36%	-10.99%
GNV dedicados	32.51%	0.93%	2.93%	11.31%	-2.28%	-0.68%	11.13%	13.49%
Eléctricos	67.76%	505.74%	454.68%	17.47%	435.29%	386.24%	612.46%	552.39%
GNV convertidos	-4.63%	-3.87%	-3.71%	1.05%	-3.55%	-3.35%	-3.72%	-3.50%
Total VFA	10.25%	10.75%^a	10.26%^a	5.07%	8.04%	7.48%	17.14%^b	16.57%^b

Potencial reducción de emisiones

Base	Estrategia fiscal (20 años) + comunicación	Estrategia fiscal (20 años) + abastecimiento (5 min)	Estrategia fiscal (20 años) + abastecimiento (30 min)	Estrategia económica + comunicación	Estrategia comunicación+ abastecimiento (5 min)	Estrategia comunicación+ abastecimiento (30 min)	Estrategia abastecimiento (5 min) + todas	Estrategia abastecimiento (30 min) + todas
1.42E+10	-0.27%	-1.15%^a	-1.04%^a	-0.23%	-1.04%	-0.92%	-1.65%^b	-1.51%^b

Notas:

- Las combinaciones de la estrategia fiscal y abastecimiento son las más efectivas
- Combinar estrategias produce mejores resultados

4.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se integraron los desarrollos logrados en los capítulos anteriores para analizar el problema de investigación y evaluar estrategias que incentiven la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado. En principio, se estudió la evolución de la difusión de vehículos particulares con fuentes alternativas en el mercado colombiano a través de los patrones de comportamiento en el tiempo. Luego, se definieron y seleccionaron, a partir de la revisión de la literatura, criterios cualitativos y cuantitativos para comparar los efectos de las estrategias respecto al caso base. Posteriormente se modelaron estrategias fiscales y regulatorias, económicas y financieras, de comunicación y difusión y de abastecimiento para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano y finalmente, se evaluaron las estrategias modeladas respecto a los criterios definidos.

De forma adicional, se realizó análisis de sensibilidad dentro de cada una de las estrategias para considerar diferentes periodos de aplicación y los posibles resultados del modelo ante políticas que permitieran romper completamente las barreras de mercado que enfrenta la difusión.

Los desarrollos logrados con este capítulo permitieron evidenciar las bondades de la metodología seleccionada para facilitar el análisis cualitativo de los patrones de comportamiento y proveer los datos numéricos que permiten realizar la valoración cuantitativa de las estrategias a partir de la participación en el mercado al final de la simulación y el potencial de reducción de emisiones.

Un resumen de los resultados del caso de estudio indica que la penetración de mercado de vehículos con fuentes alternativas tomará un largo tiempo dado que la difusión es lenta, sobre todo en los primeros 10 años. En consecuencia promover la difusión de vehículos con fuentes alternativas sobre otras tecnologías es un gran desafío para el diseño de políticas públicas y estrategias.

La evaluación de las estrategias permitió identificar que con todas las estrategias se aumenta la participación agregada de vehículos con fuentes alternativas en el mercado y

se evidencian potenciales reducciones de emisiones. Sin embargo, cada una de las estrategias favorece en mayor medida a una tecnología:

- Las estrategias fiscales y regulatorias incentivan las compras de las tecnologías limpias, y en el escenario de 20 años son la medida que más favorece los vehículos dedicados a gas
- La participación de vehículos eléctricos en el mercado aumenta con todas las medidas aplicadas, sin embargo, resulta más favorecida con las estrategias de abastecimiento pues reducen una de las barreras más altas para su ingreso: el alto tiempo de carga.
- La estrategia económica y financiera favorece los vehículos convertidos a gas como tecnología hacia la cual está orientada la estrategia. Con las demás medidas se reduce la participación en el mercado pues disminuye el mercado potencial al reducir las compras de vehículos a gasolina.
- La estrategia de comunicación eleva la participación en el mercado de vehículos dedicados a gas y vehículos eléctricos. Entre las medidas modeladas es la que menos incentiva las compras de vehículos eléctricos debido a la baja atracción que tiene esta tecnología.

Por otra parte, se encontró que implementar conjuntamente medidas es más efectivo que aplicar cada una de forma aislada.

Análisis futuros derivados de este capítulo incluyen la validación empírica de los resultados; esa validación podría ser a través de experimentación con los tomadores de decisiones. Con el ánimo de realizar eso, puede usarse un micro-mundo basado en el modelo de simulación construido en esta tesis. Como punto final, a pesar de que el modelo fue desarrollado para el caso colombiano, este modelo puede ser extendido a otras economías con condiciones similares después de calibrar adecuadamente los parámetros

5. Conclusiones

En este capítulo; se agrupan las principales conclusiones de la investigación realizada, se resaltan los avances conseguidos para cada objetivo, se responden las preguntas de investigación planteadas, se muestran los medios de difusión de los resultados y se sugieren temáticas para el trabajo futuro.

5.1 Aportes más importantes a nivel de comprensión del problema e implicaciones para el desarrollo de estrategias

Las principales conclusiones de esta investigación pueden ser resumidas en cuatro afirmaciones. Con base en esas afirmaciones, se proponen recomendaciones para las partes interesadas en promover un modelo de movilidad baja en carbono en el futuro a través de la adopción de vehículos con fuentes alternativas.

- La difusión de vehículos con fuentes alternativas es afectada por las características del mercado y por la tradicional y consolidada industria de vehículos convencionales. El diseño de estrategias debe tener en cuenta las características del mercado y sus antecedentes. En Colombia, la historia de la difusión de vehículos convertidos a gas ofrece un modo de referencia. Este indica algunos aspectos clave sobre la importancia de desarrollar estrategias con entidades públicas y privadas y en ese sentido proponer incentivos efectivos para responder a las señales del mercado.
- Los resultados obtenidos evidencian una lenta difusión de las tecnologías en el mercado Colombiano

Bajo las condiciones actuales, en los próximos 20 años, el mercado de vehículos particulares seguirá siendo dominado por los vehículos a combustión tradicional. Sin embargo, los vehículos con fuentes alternativas aumentarán gradualmente su

participación del mercado a medida que se hacen más atractivos y existe mayor intención de los consumidores hacia las nuevas tecnologías. Este panorama plantea retos en el diseño, análisis y evaluación de estrategias que promuevan su difusión. Por ejemplo, la difusión lenta exige que las políticas se implementen durante mucho tiempo para poder alcanzar los niveles de adopción auto sostenibles.

- Los resultados obtenidos de las simulaciones son consistentes con lo que se espera después de aplicar la teoría de la racionalidad limitada

El modelo formulado, usando racionalidad limitada, explica adecuadamente el comportamiento del fenómeno estudiado. Comprender el comportamiento permite analizar mejor la forma en que el decisor toma sus decisiones y de este modo desarrollar mejores políticas. Las estrategias deberían considerar las limitaciones cognitivas de los decisores, en particular el desconocimiento de las tecnologías, a la hora de desarrollar estrategias para incentivar los vehículos con fuentes alternativas con el fin de aumentar la efectividad de las medidas.

- Los resultados encontrados indican que la aplicación de políticas orientadas a romper las barreras de entrada ayudan a impulsar un modelo de transporte particular bajo en carbono en el mercado colombiano

Los resultados indican que las estrategias diseñadas a cambiar los hábitos de consumo o desarrollar infraestructura de soporte para reducir los tiempos de carga son las medidas más efectivas para elevar la difusión de vehículos eléctricos, por su parte, las exenciones de impuestos y las estrategias de comunicación son más efectivas para la difusión de los vehículos dedicados a gas y los subsidios al costo de conversión son las medidas que más incentivan las conversiones. Estos resultados muestran que para impulsar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado se requiere desarrollar estrategias que permitan a los vehículos competir en precio, incrementen el conocimiento de los consumidores con las tecnologías, reduzcan los tiempos de carga y disminuyan el costo de la conversión.

5.2 Reporte de cumplimiento de objetivos.

A continuación se presenta el reporte de cumplimiento de los objetivos de investigación planteados y los logros alcanzados en relación a cada uno

a. Objetivo específico 1:

“Identificar y seleccionar los factores clave (tecnologías, fuentes energéticas, atributos y estrategias) para modelar la difusión de vehículos con fuentes alternativas que impulsen un transporte particular bajo en carbono”

En el primer capítulo de esta tesis, para el análisis de la problemática, se abordaron tres líneas de investigación a partir de diferentes preguntas con las cuales se revisó sistemáticamente la literatura. Algunas de esas preguntas permitieron identificar los factores clave que luego fueron seleccionados para construir el modelo de simulación e implementar las estrategias.

La respuesta a la pregunta ¿Cuáles son los factores y atributos más relevantes en la elección de una tecnología, en particular vehículos con fuentes energéticas alternativas?, permitió clasificar los factores que influyen en la difusión en tres categorías: i. características de la innovación, ii. características de los innovadores y iii. características del ambiente. Más tarde, en el proceso de modelado se integraron las características de la innovación (precio, costos operacionales, emisiones, autonomía, tiempo de abastecimiento y disponibilidad de abastecimiento) con características de los innovadores (parámetros de preferencias) y características del ambiente (políticas e incentivos). De este modo se seleccionaron los atributos para modelar la difusión.

La respuesta a la pregunta ¿Cuál es la situación actual y las perspectivas de evolución del sector transporte a nivel global?, permitió identificar las tecnologías y fuentes energéticas potenciales. Luego, al considerar las características actuales del mercado colombiano y sus expectativas se seleccionaron dos tecnologías vehículos a combustión y vehículos eléctricos y tres energéticos gasolina, gas natural y electricidad. Estos elementos se incluyeron en el modelado a través de cuatro alternativas: vehículos a gasolina, vehículos dedicados a gas, vehículos eléctricos y vehículos convertidos a gas.

La respuesta a la pregunta ¿Cuáles son los mecanismos existentes para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas?, permitió identificar y clasificar las estrategias en cinco categorías: i. fiscales y regulatorias, ii. económicas y financieras, iii. abastecimiento, iv. comunicación y difusión e v. investigación y desarrollo. Luego en el

capítulo 4 se modelaron y evaluaron algunas medidas que pertenecen a estas categorías.

A partir de lo anterior, es posible afirmar que se dio cumplimiento al primer objetivo específico. Se analizaron los aspectos teóricos requeridos para estudiar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en los mercados tales como: tecnologías potenciales, factores críticos de adopción y estrategias para incentivar la difusión. Además de eso, se lograron los siguientes aportes y logros con la revisión sistemática de la literatura:

- Dar cuenta sobre la información existente y requerida para analizar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en los mercados
- Plantear explícitamente los vacíos, limitaciones y problemas vigentes en las líneas de investigación para dar pie a investigaciones futuras
- Identificar las brechas en las investigaciones actuales con el fin de sugerir nuevas áreas de investigación.
- Dar un marco para justificar nuevas actividades de investigación en las áreas: panorama energético del sector transporte, difusión de innovaciones, y evaluación de estrategias para incentivar la difusión.
- Identificar algunos problemas pendientes de solución que pueden ser el punto inicial de investigaciones futuras.

b. Objetivo específico 2

“Establecer los criterios de evaluación de las estrategias para incentivar un transporte particular bajo en carbono en Colombia”

En el capítulo 4 de esta tesis se definieron, con base en la revisión de la literatura, la valoración cualitativa y cuantitativa del patrón de comportamiento de la difusión y el potencial de reducción de emisiones como criterios de evaluación de las estrategias para incentivar un transporte particular bajo en carbono. Con esto se dio cumplimiento al segundo objetivo específico.

El principal logro alcanzado con el desarrollo de este objetivo es la inclusión de criterios cuantificables y medibles que permite eliminar elementos de juicio subjetivo en la evaluación de las estrategias y hacer comparables los resultados obtenidos con cada una de las estrategias modeladas.

c. Objetivo específico 3

“Desarrollar un modelo de simulación para analizar el proceso de difusión de vehículos particulares con fuentes energéticas bajas en carbono en el mercado colombiano”

Para poder alcanzar el logro de este objetivo, en el capítulo 2 se seleccionó la dinámica de sistemas como metodología de simulación. Luego, en el capítulo 3 se desarrolló de un modelo novedoso a partir del cual es posible estudiar la difusión de vehículos con fuentes alternativas bajas en carbono en el mercado colombiano. Estos elementos evidencian el cumplimiento del objetivo establecido. La metodología seleccionada, en sí misma, permite realizar una reflexión holística del sistema estudiado y el modelo desarrollado permite una comprensión más clara de la dinámica de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado.

Se lograron distintos aportes en la formulación y construcción del modelo, estos son:

- La formulación del modelo requirió aplicar el pensamiento sistémico y proponer una nueva aproximación al sistema de interés a través de relaciones causales. Esto permitió una mejor la comprensión del fenómeno estudiado e incrementar el nivel de conocimiento del problema.
- Con el modelo se avanzó en la integración de los enfoques de difusión y adopción de innovaciones en un modelo coherente aplicado a una industria específica en un país en desarrollo. Además se incorporaron elementos de racionalidad limitada en el análisis de la difusión de innovaciones a través de las reglas de decisión que consideran la intención de compra o conversión del consumidor.
- El modelo construido, además de posibilitar en análisis del proceso de difusión, es una herramienta útil para entender los efectos de las variables de decisión y explorar políticas para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado.

El modelo propuesto es la principal contribución metodológica de esta investigación y no resulta únicamente valioso para los problemas abordados en esta tesis. Los aportes logrados con la integración de los enfoques de difusión, adopción de innovaciones y racionalidad limitada pueden ser usados para estudiar otros problemas de difusión de innovaciones en otros mercados e industrias. Además, el caso de aplicación en el análisis de la difusión de vehículos con fuentes alternativas puede ser extendido a otros

países en desarrollo con características similares al mercado colombiano después de ajustar algunos parámetros del entorno y características de los decisores.

d. Objetivo específico 4

“Formular, analizar y comparar los efectos de diferentes estrategias para incentivar el transporte particular bajo en carbono en Colombia de acuerdo a los criterios definidos.”

En el capítulo 4 se formularon y analizaron estrategias orientadas a superar diferentes tipos de barreras. Además se enriqueció el análisis con solución a preguntas de tipo ¿Qué pasaría si...? Con las cuales se evaluaron los efectos de romper completamente las barreras de entrada que pretende superar cada estrategia propuesta. Luego, se compararon los resultados de las estrategias modeladas de forma independiente y combinada y se comprobó que la aplicación conjunta de medidas es más efectiva que la implementación aislada de cada una.

Los principales aportes logrados con el cumplimiento de este objetivo son:

- La formulación de políticas a partir de la integración de las barreras y las estrategias identificadas en la literatura, haciendo explícitas las barreras de entrada que intenta superar cada estrategia.
- El análisis y evaluación de estrategias, antes de su implementación, en un ambiente complejo y de alta incertidumbre para dar algunas pistas respecto a los resultados esperados de cada una. Esto permite ayudar a soportar las decisiones sobre las estrategias a seleccionar para incentivar el transporte particular bajo en carbono.
- La comparación de las estrategias con base en criterios definidos, observables y medibles, que reducen, de alguna manera, la imprecisión derivada de las apreciaciones subjetivas.
- La evidencia sobre el potencial de diferentes estrategias para modificar el patrón de la difusión de vehículos con fuentes alternativas de forma cualitativa y cuantitativa y reducir las emisiones de CO₂.

El logro de cada uno de los objetivos específicos garantiza el cumplimiento del objetivo general propuesto para esta investigación: “Evaluar estrategias para incentivar un transporte particular bajo en carbono en Colombia a partir del análisis de la difusión de vehículos con fuentes energéticas alternativas”

5.3 Solución de las preguntas de investigación planteadas.

En el capítulo 1 de esta tesis se identificaron algunos elementos por resolver en cada línea de investigación que constituyen la base del problema que se analiza en esta tesis. En relación con la difusión y adopción de innovaciones se identificó que no se sabe cómo será el proceso de difusión de las nuevas tecnologías en países en desarrollo. Asociado al panorama del sector transporte, no se conoce que tecnología dominará el sector vehículos particulares en países en desarrollo. Y en relación con la evaluación de políticas, no se ha estudiado cuál es la efectividad de los instrumentos diseñados para incentivar la difusión del transporte particular bajo en carbono en países en desarrollo.

En esta sección se da respuesta a cada uno de esos interrogantes a partir de los resultados obtenidos con el caso de estudio: difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano. En ese sentido se realizan aportes a cada línea de investigación en la solución a tales incógnitas para una industria y un mercado específico.

- a. ¿Cómo será el proceso de difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano?

En esta investigación se encontró que la difusión de vehículos con fuentes alternativas es lenta. Está condicionada por la baja atracción de las tecnologías y la intención de los consumidores hacia la innovación. En consecuencia requiere de estrategias que promuevan su difusión elevando la atracción y la intención de compra.

- b. ¿Cuál tecnología será la dominante en Colombia?

Bajo los supuestos del modelo, los resultados obtenidos indican que en los próximos 20 años, el mercado colombiano seguirá siendo dominado por los vehículos de combustión tradicional. Sin embargo, los vehículos con fuentes alternativas aumentarán gradualmente su participación en el mercado. Esto se debe a que la probabilidad de elección se incrementa en el tiempo.

- c. ¿Cuál es la efectividad de las estrategias para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en Colombia?

Los hallazgos de esta tesis muestran que las estrategias diseñadas a romper las barreras de entrada, aumentan la participación del mercado de los vehículos con fuentes alternativas e incrementan el potencial de reducción de emisiones de CO₂ en el sector transporte. Además se evidenció que las estrategias son más efectivas si se aplican conjuntamente.

5.4 Divulgación de resultados

Los trabajos y contribuciones de esta tesis han sido difundidos mediante presentaciones en diferentes eventos de carácter nacional e internacional los cuales son detallados a continuación:

- i. Adopción de vehículos particulares con fuentes alternativas al mercado colombiano. Evento: X Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas “La Dinámica de Sistemas en la gestión y solución de problemas” En: Cali, Colombia (Septiembre 26 -28, 2012).
- ii. Evaluación de estrategias que impulsen la sostenibilidad del transporte particular en Colombia. Evento: X Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas - III Congreso Brasileño de Dinámica de Sistemas - I Congreso Argentino de Dinámica de Sistemas "Dinámica de sistemas: abordaje a la complejidad, sinergia de intuición y razón" En: Buenos Aires, Argentina (Noviembre. 21 -23, 2012).
- iii. Este trabajo fue publicado en la edición de Marzo del 2013 de la revista Boletín de dinámica de sistemas ISSN 1988 7205 que pertenece a la Cátedra UNESCO de Desarrollo Sostenible
- iv. Hacia la movilidad particular baja en carbono: análisis de la adopción de vehículos con fuentes alternativas. Evento: IV Encuentro Latinoamericano de Economías de la Energía En: Montevideo, Uruguay (Abril. 8 -9, 2013).
- v. Modeling bounded rationality: analysis of the consumer choice in the adoption of alternative fuel vehicles. Evento: European Conference on Operational Research En: Roma, Italia (Julio 1 -4, 2013).
- vi. Policy analysis to boost the adoption of alternative fuel vehicles in the Colombian market. Evento: 31st International Conference of the System Dynamics Society. En: Boston, Estados Unidos (Julio 21 – 25, 2013)

- vii. Estudio del panorama del transporte particular bajo en carbono en Colombia y estrategias para promoverlo. Evento: Escuela Latino-Iberoamericana de Verano en Investigación Operativa. En: Valencia, España (Septiembre 8-12, 2013)
- viii. Análisis de confiabilidad del sistema eléctrico colombiano ante el incremento de la demanda por la penetración de vehículos eléctricos. Evento: XI Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. En: Bucaramanga, Colombia (Septiembre 11 -13, 2013).
- ix. Efecto de los incentivos fiscales en la difusión de vehículos con fuentes alternativas. Evento: Encuentro Latinoamericano de dinámica de sistemas. En: Ciudad de México, México (Noviembre 6-8, 2013)

5.5 Trabajos futuros que surgen de la investigación

Existieron algunas limitaciones en este estudio que pueden ser base para investigaciones posteriores; la primera está relacionada con la definición de algunos parámetros para el modelo logit multinomial y el modelo de la intención. En relación a este punto queda abierta, como línea de investigación, la estimación rigurosa de los parámetros del modelo logit multinomial que definen las preferencias de los consumidores hacia cada atributo. Esta estimación podría realizarse a partir de encuestas de preferencias declaradas aplicadas a una muestra representativa de la población colombiana. Respecto a los parámetros del modelo de intención, a medida que evolucione el sistema, será posible ajustar los valores definidos con los datos históricos de cada tecnología.

La segunda es que se consideraron tres tipos de vehículos con fuentes alternativas: dedicados a gas, eléctricos y convertidos a gas. Esto debido esencialmente a las características del mercado colombiano y las expectativas con el ingreso de los vehículos eléctricos al sistema. En el futuro, a medida que se evidencien las posibilidades de ingreso de nuevas tecnologías, como el hidrógeno, es posible cambiar algunas características del modelo para incluir más tecnologías limpias en la competencia.

La tercera se relaciona con el análisis de la dinámica de la oferta de vehículos con fuentes alternativas en el mercado. En esta tesis se consideró que la oferta en cada periodo es una función de la demanda retardada por el tiempo de importación. Este análisis puede ampliarse al considerar las estrategias de las compañías para estimar la

demanda de las tecnologías y con base en ellas definir la oferta. Podría ser un proceso en el cual se multiplica demanda del periodo anterior por un factor de seguridad.

Adicionalmente, en la literatura se han propuesto una amplia variedad de mecanismos que pueden ser implementados para incentivar la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado. En esta investigación se evaluaron cuatro de ellos. Estudiar estrategias adicionales puede aportar en el conocimiento del problema y ampliar el horizonte para la selección de estrategias. En ese sentido se hace relevante, tanto modelar nuevas estrategias, como evaluarlas de acuerdo a criterios comunes de modo que los resultados puedan ser comparados.

A pesar de las limitaciones de la investigación, estos tópicos no hacen inaplicables los resultados obtenidos. El objetivo general de este estudio era evaluar estrategias para incentivar los vehículos con fuentes alternativas a partir del análisis de la difusión de estas tecnologías. Ese análisis requirió estudiar las interrelaciones entre los diferentes elementos del sistema y comprender la causalidad subyacente del sistema bajo estudio para poder identificar como un instrumento o mecanismo podría acelerar la difusión de estas innovaciones. El modelo construido permitió obtener claridad sobre los patrones de comportamiento de la difusión y fue la herramienta clave para el cumplimiento del objetivo propuesto.

Otros trabajos futuros derivados de esta investigación incluyen:

- La definición de criterios adicionales para evaluar las estrategias con el propósito de aplicar posteriormente un análisis de las estrategias a partir de técnicas multicriterio.
- La evaluación de los patrones de difusión ante diferentes escenarios definidos; por ejemplo, por precios de los combustibles fósiles (altos y bajos) y esquemas de incentivos (fuertes y débiles).
- El análisis del impacto de la difusión de vehículos con fuentes alternativas sobre otros sistemas relacionados; por ejemplo, el análisis de los efectos de la difusión de vehículos eléctricos sobre el sistema eléctrico colombiano.

Finalmente, el estudio de la difusión de vehículos con fuentes alternativas requiere mejorar la comprensión de las necesidades y los deseos del consumidor, como determinantes de la atracción, y la voluntad de considerar las nuevas tecnologías en el conjunto de elección, como un factor que define la intención.

A. Anexo: Publicaciones seleccionadas en el proceso de búsqueda

En la Tabla A- 1 aparecen las publicaciones seleccionadas en el proceso de búsqueda realizado a partir de la revisión sistemática de la literatura. En la primera columna aparece el autor, en la segunda el año, en la tercera el título y en la cuarta la revista o evento de la publicación.

Tabla A- 1: Publicaciones seleccionadas en la investigación.

Autor	Año	Título	Revista
Åhman, M	2006	Government policy and the development of electric vehicles in Japan	<i>EnergyPolicy</i>
Anandarajah, G., McDowall, W., y Ekins, P.	2013	Decarbonising road transport with hydrogen and electricity: Long term global technology learning scenarios	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>
Atabani, A. E., Badruddin, I. A., Mekhilef, S., y Silitonga, A. S.	2011	A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>
Baptista, P., Tomás, M., y Silva, C	2010	Plug-in hybrid fuel cell vehicles market penetration scenarios	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>
Bass, F. M	2004	Comments on "A New Product Growth for Model Consumer Durables."	<i>Management Science</i>
Bass, F. M	2004	A New Product Growth for Model Consumer Durables	<i>Management Science</i>
Bento, N.	2010	Dynamic competition between plug-in hybrid and hydrogen fuel cell vehicles for personal transportation	<i>International journal of hydrogen energy</i>
Bleischwitz, R., y Bader, N.	2010	Policies for the transition towards a hydrogen economy: the EU case.	<i>Energy Policy</i>
Browne, D., O'Mahony, M., y Caulfield, B.	2012	How should barriers to alternative fuels and vehicles be classified and potential policies to promote innovative technologies be evaluated?	<i>Journal of Cleaner Production</i>
Brownstone, D., Bunch, D. S., y Train, K	2000	Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles.	<i>Transportation Research Part B: Methodological</i>
Cadavid, L., y Franco, C. J.	2010	Procesos de difusión de innovaciones en tecnologías limpias para el sector transporte.	

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Autor	Año	Título	Revista
Cadavid, L., y Franco, C. J.	2012	Modelos de adopción de innovaciones: similitudes, diferencias, limitaciones y futuras investigaciones	<i>III COGESTEC 2012</i>
Cadavid, L., y Franco, C. J.	2012	Tecnologías limpias: desafíos para su adopción individual y difusión en las economías.	<i>III COGESTEC 2012</i>
Cadavid, L., Franco, C. J., y Awad, G	2012	Análisis Bibliométrico del Campo Modelado de Difusión de Innovaciones.	
Dagsvik, J. K., Wennemo, T., Wetterwald, D. G., y Aaberge, R	2002	Potential demand for alternative fuel vehicles	<i>Transportation Research Part B: Methodological</i>
De Simio, L., Gambino, M., y Iannaccone, S.	2013	Possible transport energy sources for the future.	<i>Transport Policy</i>
Densing, M., Turton, H., y Bäuml, G.	2012	Conditions for the successful deployment of electric vehicles – A global energy system perspective	<i>Energy</i>
Dijk, M., Orsato, R. J., y Kemp, R.	2012	The emergence of an electric mobility trajectory	<i>EnergyPolicy</i>
Egbue, O., y Long, S.	2012	Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions	<i>Energy Policy</i>
Eggers, F., y Eggers, F.	2011	Where have all the flowers gone? Forecasting green trends in the automobile industry with a choice-based conjoint adoption model	<i>Technological Forecasting and Social Change</i>
EIA	2011	International Energy Outlook 2011	
Eppstein, M. J., Grover, D. K., Marshall, J. S., y Rizzo, D. M.	2011	An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicles.	<i>Energy Policy</i>
Franco, C. J., y Baena, A.	2010	Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico.	<i>Revista Avances en Sistemas e Informática</i>
Franco, C. J., y Figueroa, D.	2008	Modelado de la penetración de vehículos particulares con fuentes alternativas de energía al mercado colombiano.	<i>Revista Avances en Sistemas e Informática</i>
Helmers, E., y Marx, P.	2012	Electric cars: Technical characteristics and environmental impacts.	<i>Environmental Sciences Europe</i>
Hickman, R., Saxena, S., Banister, D., y Ashiru, O.	2012	Examining transport futures with scenario analysis and MCA.	<i>Transportation Research Part A: Policy and Practice</i>
Higgins, A., Paevere, P., Gardner, J., y Quezada, G.	2012	Combining choice modelling and multi-criteria analysis for technology diffusion: An application to the uptake of electric vehicles	<i>Technological Forecasting and Social Change.</i>
Høyer, K. G	2008	The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars.	<i>Utilities Policy</i>
IEA.	2011	CO2 emissions from fuel combustion.	

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Autor	Año	Título	Revista
Ito, N., Takeuchi, K., y Managi, S.	2013	Willingness-to-pay for infrastructure investments for alternative fuel vehicles.	<i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i>
Kang, M. J., y Park, H.	2011	Impact of experience on government policy toward acceptance of hydrogen fuel cell vehicles in Korea.	<i>Energy Policy</i>
Kiesling, E., Günther, M., Stummer, C., y Wakolbinger, L. M.	2011	Agent-based simulation of innovation diffusion: a review.	<i>Central European Journal of Operations Research,</i>
Kley, F., Lerch, C., y Dallinger, D.	2011	New business models for electric cars—A holistic approach.	<i>Energy Policy</i>
Kloess, M., y Müller, A.	2011	Simulating the impact of policy, energy prices and technological progress on the passenger car fleet in Austria—A model based analysis 2010–2050.	<i>Energy Policy</i>
Köhler, J., Whitmarsh, L., Nykvist, B., Schilperoord, M., Bergman, N., y Haxeltine, A.	2009	A transitions model for sustainable mobility.	<i>Ecological Economics</i>
Kwon, T.	2012	Strategic niche management of alternative fuel vehicles: A system dynamics model of the policy effect.	<i>Technological Forecasting and Social Change</i>
Li, X., Clark, C. D., Jensen, K. L., Yen, S. T., y English, B. C.	2013	Consumer purchase intentions for flexible-fuel and hybrid-electric vehicles.	<i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i>
Mabit, S. L., y Fosgerau, M.	2011	Demand for alternative-fuel vehicles when registration taxes are high.	<i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i>
MacVaugh, J., y Schiavone, F.	2010	Limits to the diffusion of innovation: A literature review and integrative model.	<i>European Journal of Innovation Management</i>
Markard, J., Raven, R., y Truffer, B.	2012	Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects.	<i>Research Policy</i>
Meade, N., y Islam, T.	2006	Modelling and forecasting the diffusion of innovation – A 25-year review.	<i>International Journal of Forecasting</i>
Melaina, M., y Bremson, J.	2008	Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: Sufficient urban station coverage.	<i>Energy Policy</i>
Montalvo, C.	2008	General wisdom concerning the factors affecting the adoption of cleaner technologies: a survey 1990–2007	<i>Journal of Cleaner Production</i>
Montalvo, C., y Kemp, R.	2008	Cleaner technology diffusion: case studies, modeling and policy.	<i>Journal of Cleaner Production</i>
Ou, X., Zhang, X., y Chang, S.	2010	Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China's future road transport: Life-cycle energy demand and GHG emissions	<i>Energy Policy</i>
Park, S. Y., Kim, J. W., y Lee, D. H.	2011	Development of a market penetration forecasting model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles considering infrastructure and cost reduction effects.	<i>Energy Policy</i>
Peres, R., Muller, E., y Mahajan, V.	2010	Innovation diffusion and new product growth models: A critical review and research directions.	<i>International Journal of Research in Marketing</i>

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Autor	Año	Título	Revista
Rao, K. U., y Kishore, V. V. N.	2010	A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies.	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>
Rogers, E. M.	1995	<i>Diffusion of innovations</i>	
Santos, G., Behrendt, H., Maconi, L., Shirvani, T., y Teytelboym, A.	2010	Part I: Externalities and economic policies in road transport.	<i>Research in Transportation Economics</i>
Santos, G., Behrendt, H., y Teytelboym, A.	2010	Part II: Policy instruments for sustainable road transport.	<i>Research in Transportation Economics</i>
Shafiei, E., Stefansson, H., Asgeirsson, E. I., Davidsdottir, B., y Raberto, M.	2013	Integrated Agent-based and System Dynamics Modelling for Simulation of Sustainable Mobility.	<i>Transport Reviews</i>
Shepherd, S., Bonsall, P., y Harrison, G.	2012	Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study.	<i>Transport Policy</i>
Shimogawa, S., Shinno, M., y Saito, H.	2012	Structure of S-shaped growth in innovation diffusion.	<i>Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics</i>
Sierzechula, W., Bakker, S., Maat, K., y van Wee, B.	2012	Technological diversity of emerging eco-innovations: a case study of the automobile industry.	<i>Journal of Cleaner Production</i>
Sobrino, F. H., Monroy, C. R., y Pérez, J. L.	2010	Biofuels in Spain: Market penetration analysis and competitiveness in the automotive fuel market.	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>
Steenberghen, T., y López, E.	2008	Overcoming barriers to the implementation of alternative fuels for road transport in Europe	<i>Journal of Cleaner Production</i>
Struben, J., y Sterman, J. D.	2008	Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems.	<i>Environment and Planning B: Planning and Design</i>
Sweeting, W. J., y Winfield, P. H.	2012	Future transportation: Lifetime considerations and framework for sustainability assessment.	<i>Energy Policy</i>
Tie, S. F., y Tan, C. W.	2013	A review of energy sources and energy management system in electric vehicles	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>
UPME	2010	Proyección de demanda de combustibles líquidos y GNV en Colombia	
UPME	2010	PEN 2010- 2030	
Vergara, C.	2009	Who switches to hybrids? A study of a fuel conversion program in Colombia	<i>Transportation Research Part A: Policy and Practice</i>
Wejnert, B.	2002	Integrating models of diffusion of innovations: A conceptual framework.	<i>Annual Review of Sociology</i>
Wiedmann, K.-P., Hennigs, N., Pankalla, L., Kassubek, M., y Seegebarth, B.	2011	Adoption barriers and resistance to sustainable solutions in the automotive sector.	<i>Journal of Business Research</i>
Yeh, S.	2007	An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles.	<i>Energy Policy</i>
Zhang, T., Gensler, S., y Garcia, R.	2011	A Study of the Diffusion of Alternative Fuel Vehicles: An Agent-Based Modeling Approach	<i>Journal of Product Innovation Management</i>

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Autor	Año	Título	Revista
Zubaryeva, A., Thiel, C., Barbone, E., y Mercier, A.	2012	Assessing factors for the identification of potential lead markets for electrified vehicles in Europe: expert opinion elicitation.	<i>Technological Forecasting and Social Change</i>

Estas investigaciones fueron usadas para responder a las preguntas de la revisión sistemática de la literatura como se muestra en el capítulo 1 de este trabajo

B. Anexo: Resumen cambios en el diagrama de bloques

En la Tabla B- 1 se presenta el resumen de los cambios realizados al diagrama de bloques propuesto por Walther et al (2010). En ella aparecen: el nombre del componente en la primera columna, el nombre de la modificaciones realizadas en la segunda columna, en las columnas tres y cuatro se muestra de manera comparativa la forma en que aparece el objeto del cambio en el diagrama de Wathler y en nuestro diagrama.

Tabla B- 1: Resumen comparativo de las principales modificaciones realizadas al diagrama de bloques

	Cambio efectuado	Diagrama de bloques en (Walther et al. 2010)	Nuestro diagrama de bloques
Industria automotriz	Objetivo	Vender un vehículo	Vender o convertir un vehículo
	VARIABLES RENOMBRADAS	Portafolio de productos	Oferta de vehículos y conversiones
	VARIABLES ELIMINADAS	Curvas de aprendizaje endógenas en costos y desempeño	
	VARIABLES ADICIONADAS		Atributos: Precio, costos de conversión Mejoramiento de los atributos tecnológicos, costos y desempeño.
	VÍNCULOS ELIMINADOS	Requisitos de ZEV ¹ /GHG ² Producción de ZEV Pagos de penalidades Emisiones de GHG	
	VÍNCULOS ADICIONADOS		Cumplimiento de las regulaciones Impuestos
	VÍNCULOS MODIFICADOS	Cobertura de la infraestructura	Inversión en infraestructura
	NOMBRE DEL COMPONENTE	Clientes	Consumidores
Consumidores	Objetivo	Comprar o conducir un vehículo	Comprar o convertir un vehículo
	VARIABLES RENOMBRADAS	Conocimiento del producto	Intención
	VÍNCULOS MODIFICADOS	Comportamiento de compra Parámetros del producto	Comportamiento de compra o conversión Atracción

Continúa en la página siguiente

	Cambio efectuado	Diagrama de bloques en (Walther et al. 2010)	Nuestro diagrama de bloques
Base instalada de vehículos e infraestructura	Nombre del componente	Inventario de vehículos e infraestructura	Base instalada de vehículos e infraestructura
	Vínculos eliminados	Autonomía de vehículos con fuentes alternativas Requisitos de ZEV/GHG Producción de ZEV Pagos de penalidades Emisiones de GHG	
	Vínculos adicionados		Ingresos por compra o conversión Retiros por conversión, accidentalidad u obsolescencia
Marco regulatorio y financiero	Nombre del componente	Regulaciones de GHG y ZEV	Marco regulatorio y financiero
	VARIABLES ELIMINADAS	Objetivo de ventas de ZEV por año Créditos para ZEV Créditos para GHG Cálculo de penalidades civiles	
	VARIABLES ADICIONADAS		Subsidios para la conversión Impuestos a la importación y compra
	Vínculos modificados	Incentivos a la compra	Incentivos a la compra o conversión

1. ZEV Siglas en inglés de Vehículos Cero Emisiones (Zero Emission Vehicles)
2. GHG: Siglas en inglés de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Greenhouse Gas Emission)

C. Anexo: Formulación del modelo de simulación en PowerSim

En la Tabla C- 1 que compone este anexo, se presenta la formulación de los parámetros y variables usados en el modelo de simulación. En la primera columna aparece el nombre del elemento. En la segunda columna aparecen las dimensiones en caso de que la variable o parámetro sea un vector de dos, tres o cuatro valores. En la tercera columna aparecen las unidades. Finalmente, en la tercera columna aparece la formulación en PowerSim que puede incluir valores puntuales, gráficas, ecuaciones, funciones o una combinación de estos elementos.

Tabla C- 1: Formulación del modelo de simulación en PowerSim

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en PowerSim
Atracción compra	1..3	-	$EXP((+ \text{Autonomía} * \text{Beta}[1] + \text{Tiempo abastecimiento}' * \text{Beta}[2] + \text{Puntos abastecimiento std}' * \text{Beta}[3] + \text{Precio} * \text{Beta}[4] + \text{Costos operacionales}' * \text{Beta}[5] + \text{Emisiones} * \text{Beta}[6])) / \text{ARRSUM}(EXP((+ \text{Autonomía} * \text{Beta}[1] + \text{Tiempo abastecimiento}' * \text{Beta}[2] + \text{Puntos abastecimiento std}' * \text{Beta}[3] + \text{Precio} * \text{Beta}[4] + \text{Costos operacionales}' * \text{Beta}[5] + \text{Emisiones} * \text{Beta}[6]))$
Atracción conversión	1..2	-	$EXP(\text{Autonomiac} * \text{BetaC}[1] + \text{Tiempo_abastecimientoc} * \text{BetaC}[2] + \text{Puntosabastecimientoc} * \text{BetaC}[3] + \text{CAEC} * \text{BetaC}[4] + \text{Emisionesc} * \text{BetaC}[5]) / \text{ARRSUM}(EXP(\text{Autonomiac} * \text{BetaC}[1] + \text{Tiempo_abastecimientoc} * \text{BetaC}[2] + \text{Puntosabastecimientoc} * \text{BetaC}[3] + \text{CAEC} * \text{BetaC}[4] + \text{Emisionesc} * \text{BetaC}[5]))$
Autonomía	1..3	Km	{GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{518, 523, 527, 528, 534, 540, 552, 572, 584, 612, 643, 681, 696, 711, 726, 741, 756, 771, 785, 800, 815//Min:500;Max:850//}),GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{311, 314, 316, 317, 320, 324, 331, 343, 350, 367, 386, 402, 422, 445, 457, 477, 483, 483, 483, 483, 484//Min:300;Max:300//}),100}

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en PowerSim
Autonomiac	1..2	Km	{GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{518, 523, 527, 528, 534, 540, 552, 572, 584, 612, 643, 681, 696, 711, 726, 741, 756, 771, 785, 800, 815//Min:500;Max:850//}),GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{259, 262, 263, 264, 267, 270, 276, 286, 292, 306, 321, 335, 352, 371, 381, 397, 402, 403, 403, 403, 403//Min:250;Max:410//})}
Base gravable	1..3	euros	{17.819,GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{26.905, 25.814, 24.855, 23.961, 23.131, 22.301, 21.599, 20.961, 20.387, 19.926, 19.481, 19.243, 19.185, 19.131, 19.079, 19.028, 18.986, 18.967, 18.952, 18.943, 18.934//Min:18.000;Max:27.000//}),GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{34.397, 33.235, 32.118, 31.046, 29.974, 28.946, 27.920, 26.937, 25.999, 25.149, 24.565, 23.985, 23.538, 23.223, 22.953, 22.772, 22.592, 22.412, 22.275, 22.184, 22.112//Min:22.000;Max:35.000//})}
Beta	1..6	-	{0.0008//Autonomia//,-0.0048//Tiempo//,0.0042//puntos de abastecimiento//,-0.0456//precio//,-0.049//Costo de operacion//,-0.0019//emisiones//}
BetaC	1..5	-	{0.00085//Autonomia//,-0.0048//Tiempo//,0.0042//puntos de abastecimiento//,-0.049//Costo anual equivalente//,-0.0019//emisiones//}
Cantidad estimada de vehículos en el mercado	-	vehículos	Población * 'Tasa de motorización'
Compras	1..4	vehículos / yr	{IF('Demanda potencial'>0<<vehiculos/yr>>,{('Demanda potencial'-MIN('Demanda potencial'*Probabilidad de compra'[2],Oferta[2])-MIN('Demanda potencial'*Probabilidad de compra'[3],Oferta[3]),MIN('Demanda potencial'*Probabilidad de compra'[2],Oferta[2]),MIN('Demanda potencial'*Probabilidad de compra'[3],Oferta[3]),0<<vehiculos/yr>>}, 0<<vehiculos/yr>>)}
Construcción	1..3	estaciones / yr	('Puntos de abastecimiento a construir')/Tiempo de construcción'
Conversiones acumuladas	1..4	vehículos	{250000,0,0,0}<<vehículos>>
Costo anual equivalente	1..2	euros/ 100Km	{'Costos operacionales'[1],'Costos operacionales'[2] + (('Costo conversión' * 'Tasa de interés' * (('Tasa de interés' + 1)^(Tiempo de amortización'/1<<yr>>)))/(((1 + 'Tasa de interés')^(Tiempo de amortización'/1<<yr>>))-1)/102.57}}
Costo conversión	-	euros	1169
Costos operacionales	1..3	euros/ 100km	{GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{5.99, 6.00, 6.21, 6.67, 6.94, 7.10, 7.27, 7.19, 7.17, 7.19, 6.98, 6.90, 6.78, 6.60, 6.52, 6.58, 6.64, 6.85, 7.07, 7.28, 7.49//Min:5.99;Max:8//}),GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{3.53, 3.52, 3.62, 3.94, 4.09, 4.16, 4.21, 4.17, 4.21, 4.13, 4.05, 3.97, 3.91, 3.77, 3.81, 3.73, 3.83, 3.96, 4.06, 4.19, 4.32//Min:3.5;Max:4.5//}),GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{1.71, 1.70, 1.67, 1.66, 1.66, 1.66, 1.65, 1.65, 1.62, 1.62, 1.61, 1.57, 1.56, 1.53, 1.52, 1.52, 1.51, 1.51, 1.51, 1.50, 1.50//Min:1.50;Max:1.71//})}
Demanda esperada por tecnología	1..3	vehículos / yr	'Demanda potencial' * 'Probabilidad de compra'

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en PowerSim
Demanda potencial	-	vehículos / yr	('Cantidad estimada de vehículos en el mercado'-'Cantidad total de vehículos en el mercado')/1<<yr>>
Emisiones	1..3	grCO2/km	{GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{157.49, 156.69, 156.00, 155.72, 153.26, 151.66, 149.53, 143.33, 138.74, 134.38, 126.85, 121.49, 116.80, 110.88, 106.20, 103.55, 102.06, 102.05, 102.00, 101.93, 101.90//Min:100;Max:150//}<<gramosCO2/km>>/157.49<<gramosCO2/km>>), GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{137.10, 135.19, 134.34, 133.92, 132.35, 130.81, 128.70, 122.94, 120.80, 114.73, 108.73, 104.00, 98.54, 92.90, 91.08, 87.42, 86.61, 86.60, 86.59, 86.55, 86.52//Min:87;Max:140//}<<gramosCO2/km>>/157.49<<gramosCO2/km>>), 0<<gramosCO2/km>>/157.49<<gramosCO2/km>>}
Emisionesc	1..2	grCO2/km	{GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{157.49, 156.69, 156.00, 155.72, 153.26, 151.66, 149.53, 143.33, 138.74, 134.38, 126.85, 121.49, 116.80, 110.88, 106.20, 103.55, 102.06, 102.05, 102.00, 101.93, 101.90//Min:100;Max:150//} * 1<<gramosCO2/km>>/157.49<<gramosCO2/km>>), GRAPHCURVE(TIME,STARTTIME,1<<yr>>,{148.15, 146.31, 145.59, 145.13, 143.38, 141.65, 139.35, 133.02, 130.70, 124.08, 117.55, 112.42, 106.53, 100.42, 98.47, 94.50, 93.63, 93.63, 93.60, 93.56, 93.53//Min:94;Max:149//} * 1<<gramosCO2/km>>/157.49<<gramosCO2/km>>)}
Impuestos	1..3	%	{159,159,170}<<%>>
Influencias externas compra	1..2	-	{0.0026,0.0018}
Influencias externas conversión	-	-	0.0026
Influencias internas compra	1..2	-	{0.3752,0.3283}
Influencias internas conversión	-	-	0.3752
Ingresos por conversión	1..4	vehículos / yr	{0<<vehículos/yr>>,0<<vehículos/yr>>,0<<vehículos/yr>>,'Salida por conversión'[1]}
Intención de compra	1..3	-	{1,'Población con intención de comprar'[1]/'Mercado potencial compras', 'Población con intención de comprar'[2]/'Mercado potencial compras'}
Intención de conversión	-	-	MIN(1,'Población con intención de convertirse/'Mercado potencial conversiones')
Mercado potencial compras	-	personas	4332000<<personas>>
Mercado potencial conversiones	-	personas	('Vehículos en el Mercado'[1] + 'Conversiones acumuladas'[1]) * 1<<personas/vehículos>>

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en PowerSim
Obsolescencia	1..3	estaciones / yr	'Puntos de abastecimiento'/'Vida operación'
Oferta	1..3	vehículos / yr	{'Demanda esperada por tecnología'[1],DELAYPPL('Demanda esperada por tecnología'[2],'Tiempo de importación', 'Demanda esperada por tecnología'[2]),DELAYPPL('Demanda esperada por tecnología'[3],'Tiempo de importación', 'Demanda esperada por tecnología'[3])}
Población	-	personas	GRAPHCURVE(TIME,DATE(2012),1<<yr>>,{46930000, 47299000, 47555000, 48172000, 48783000, 49385000, 49980000, 50568000, 51148000, 51719000, 52278000, 52827000, 53366000, 53895000, 54413000, 54918000, 55411000, 55894000, 56365000, 56822000, 57262000//Min:42000000;Max:58000000//}<<personas>>)
Población con intención de comprar	1..2	personas	{0,0}
Población con intención de convertirse	-	personas	625000
Población sin intención de comprar	1..2	persona	{'Mercado potencial compras' - 'Población con intención de comprar'[1], 'Mercado potencial compras' - 'Población con intención de comprar'[2]}
Población sin intención de convertirse	-	persona	'Mercado potencial conversiones' - 'Población con intención de convertirse'
Precio	1..3	Euros	{'Base gravable'[1] * Impuestos[1], 'Base gravable'[2] * Impuestos[2], 'Base gravable'[3] * Impuestos[3]}
Probabilidad de compra	1..3	-	IF('Intención de compra'[2]>'Intención de compra'[3],{1-((('Intención de compra'[2]-'Intención de compra'[3]) * 'Atracción compra'[2])/('Atracción compra'[2] + 'Atracción compra'[1]) + 'Atracción compra'[2] * 'Intención de compra'[3])-(('Atracción compra'[3] * 'Intención de compra'[3]),('Intención de compra'[2]-'Intención de compra'[3]) * 'Atracción compra'[2])/('Atracción compra'[2] + 'Atracción compra'[1]) + 'Atracción compra'[2] * 'Intención de compra'[3]),{1-('Atracción compra'[2] * 'Intención de compra'[2])-(('Intención de compra'[3]-'Intención de compra'[2]) * 'Atracción compra'[3])/('Atracción compra'[3] + 'Atracción compra'[1]) + 'Atracción compra'[3] * 'Intención de compra'[2]),'Atracción compra'[2] * 'Intención de compra'[2]),('Intención de compra'[3]-'Intención de compra'[2]) * 'Atracción compra'[3])/('Atracción compra'[3] + 'Atracción compra'[1]) + 'Atracción compra'[3] * 'Intención de compra'[2])}
Probabilidad de conversión	-	-	'Intención de conversión' * 'Atracción conversión'[2]
Puntos de abastecimiento-disponibilidad	1..3	-	{1,'Puntos de abastecimiento'[2]/'Puntos de abastecimiento'[1], 1} ^a
Puntos abastecimientoc	1..2	-	{'Puntos abastecimiento-disponibilidad'[1],'Puntos abastecimiento-disponibilidad'[2]}
Puntos de abastecimiento	1..2	estaciones	{4646,692}<<estaciones>>

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en PowerSim
Puntos de abastecimiento a construir	1..2	estaciones	MAX(0<<estaciones>>,'Puntos de abastecimiento necesarios'-'Puntos de abastecimiento')
Puntos de abastecimiento necesarios	1..2	estaciones	{'Vehículos en el Mercado'[1] * 'Relación vehículos estaciones'[1],('Vehículos en el Mercado'[2] + 'Vehículos en el Mercado'[4]) * 'Relación vehículos estaciones'[2]}
Relación vehículos estaciones	1..2	estaciones / vehículos	{0.00166,0.0018}<<estaciones/vehículos>>
Retiros	1..4	vehículos / yr	Vehículos en el Mercado/'Tiempo de circulación'
Salida por conversión	1..4	vehículos / yr	{IF('Vehículos en el Mercado'[1]>0<<vehículos>>,(('Mercado potencial conversiones' * 1<<vehículos/personas>>) * 'Probabilidad de conversión'/1<<yr>>-'Conversiones acumuladas'[1]/1<<yr>>),0<<vehiculos/yr>>), 0<<vehiculos/yr>>,0<<vehiculos/yr>>,0<<vehiculos/yr>>}
Tasa de familiarización compra	1..2	persona / yr	{('Mercado potencial compras' * 'Influencias externas compra'[1] + ('Influencias internas compra'[1]- 'Influencias externas compra'[1]) * 'Población con intención de comprar'[1] - 'Influencias internas compra'[1]/'Mercado potencial compras' * 'Población con intención de comprar'[1]^2)/1 <<yr>>},('Mercado potencial compras' * 'Influencias externas compra'[2] + ('Influencias internas compra'[2]- 'Influencias externas compra'[2]) * 'Población con intención de comprar'[2] - 'Influencias internas compra'[2]/'Mercado potencial compras' * 'Población con intención de comprar'[2]^2)/1 <<yr>>}
Tasa de familiarización conversión	-	persona / yr	{('Mercado potencial conversiones' * 'Influencias externas conversión' + ('Influencias internas conversión'- 'Influencias externas conversión') * 'Población con intención de convertirse' - 'Influencias internas conversión'/'Mercado potencial conversiones' * 'Población con intención de convertirse'^2)/1 <<yr>>}
Tasa de interés	-	%	4.85<<%>>
Tasa de motorización	-	vehículos / persona	GRAPHCURVE(TIME,DATE(2012),1<<yr>>,{0.0698, 0.0727, 0.0756, 0.0785, 0.0814, 0.0843, 0.0872, 0.0901, 0.093, 0.0959, 0.0988, 0.1024, 0.1062, 0.11, 0.1138, 0.1176, 0.1214, 0.1252, 0.129, 0.1328, 0.1366//Min:0.06;Max:0.15//} * 1<<vehículos/personas>>)
Tiempo abastecimiento	1..3	min	{5,10,30}
Tiempo de amortización	-	yr	5<<yr>>
Tiempo de circulación	1..4	yr	{30, 30, 30, 30}
Tiempo de construcción	1..3	yr	{1,1,1}<<yr>>
Tiempo de importación	-	yr	1 <<yr>>
Tiempo abastecimientoc	1..2	min	{5,10}

Continúa en la página siguiente

Continúa de la página anterior

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en PowerSim
Vehículos en el Mercado	1..4	vehículos	{2753720,0,0,250000}
Vida operación	-	yr	50<<yr>>

Notas: a. Se supone disponibilidad de abastecimiento del 100% para vehículos a gasolina. Para vehículos a gas, la disponibilidad se calcula como la proporción de estaciones de gas sobre la cantidad de estaciones a gasolina. Para vehículos eléctricos se supone disponibilidad del 100% considerando que los puntos de abastecimiento para los son las casas que disponen del servicio de energía eléctrica. Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, en Colombia hay 10390207 viviendas, el 69.7% de las viviendas son casas y el 93.6% de las viviendas tiene conexión a energía eléctrica (DANE 2010). En consecuencia existen 6896369 puntos de abastecimiento potenciales para los vehículos eléctricos.

D. Anexo: Soportes de las pruebas de validación

En este anexo se presentan los soportes de algunas de las pruebas de validación enunciadas en la sección 3.4 de esta tesis. Tales pruebas son: confirmación de parámetros y variables exógenas, condiciones extremas, errores de integración, análisis de sensibilidad y patrón de comportamiento.

a. Confirmación de parámetros y variables exógenas

En la Tabla D- 1 se explica cada uno de los parámetros usados en el modelo. En la primera columna aparece el nombre del parámetro, en la segunda el significado, en la tercera el valor y en la última se muestran las fuentes usadas para obtener los parámetros incorporados en el modelo de simulación.

En la construcción del modelo se incorporaron además diferentes variables exógenas, los valores de estas variables fueron obtenidos desde diferentes fuentes de información. En la Tabla D- 2 se describe cada una de estas variables con su significado y las fuentes desde las cuales fueron obtenidos los valores. En la Tabla D- 3 se muestran los valores que toman estas variables en cada periodo de tiempo.

Tabla D- 1: Explicación de los parámetros del modelo

Parámetro	Significado	Valor	Fuente	
Tiempo de circulación	Corresponde al tiempo (en años) que permanece un vehículo circulando. Se calcula a partir del porcentaje del parque automotor que sale de circulación según la edad del mismo.	30	(UPME 2010a)	
Vida de operación	Corresponde al tiempo de operación (en años) de los puntos de abastecimiento.	50	(Fendipetroleo 2013b)	
Tiempo de construcción de los puntos de abastecimiento	Corresponde al tiempo (en años) que se demora construir un punto de abastecimiento.	1	(MAVDT 2007)	
Relación puntos de abastecimiento/vehículos	Relación del número de estaciones de servicio necesarias para satisfacer la demanda (estación/vehículos)	Gasolina	1/800	(Melaina y Bremson 2008; Fendipetroleo 2013a)
		Gas dedicados/convertidos	1/555	
Influencias externas de compras y conversiones	Coeficiente de innovación para las tecnologías	Gas dedicados	0.0026	(Xinyu 2004; Park, Kim y Lee 2011; McManus y Senter 2009) Los autores ^a
		Eléctricos	0.0018	
		Gas convertidos	0.0026	
Influencias internas de compras y conversiones	Coeficiente de imitación para las tecnologías	Gas dedicados	0.3752	(Xinyu 2004; Park, Kim y Lee 2011; McManus y Senter 2009) Los autores ^a
		Eléctricos	0.3283	
		Gas convertidos	0.3752	
Parámetros Beta	Factores de importancia relativa para cada atributo	Autonomía= 0.0008 Tiempo de abastecimiento= - 0.0048 Puntos de abastecimiento=0.0042 Precio=-0.0456 Costos operacionales=-0.049 Emisiones=-0.0019 Costo anual equivalente=-0.0456	(Hackbarth y Madlener 2013)	
Costo de conversión	Costo de la conversión de un vehículo impulsado por gasolina a un vehículo impulsado por gas natural (euros) ^c	1169 ^b	(Vergara 2009)	
Tiempo de amortización	Corresponde al tiempo (en años) en el cual se difiere la inversión asociada al costo de conversión para el cálculo del costo anual equivalente.	5	Los autores ^c	

Continúa en la siguiente página

Continúa de la página anterior

Parámetro	Significado	Valor	Fuente	
Tasa de interés	Es la tasa de interés usada para diferir el costo de conversión en el tiempo de amortización y calcular el costo anual equivalente. Se usó la tasa de interés de los certificados de depósito a término 360 días (%)	4.85 ^d	(Banco de la república 2013)	
Tiempo de importación	Corresponde al tiempo (en años) que se demora la importación de un vehículo	1	(El tiempo 2011)	
Tiempo de abastecimiento	Tiempo en minutos que se demora el abastecimiento o carga de un vehículo (min)	Gasolina	5	(Ito, Takeuchi y Managi 2013; Shepherd, Bonsall y Harrison 2012)
		Gas dedicados/convertidos	10	
		Eléctricos	360 ^e	
Impuestos	Son un componente del precio del vehículo e incluyen los aranceles, el impuesto al valor agregado y el impuesto al consumo	Gasolina	59% ^f	(CONFIS 2011; MAVDT 2011; MME 2010; Colombia 2005; Colombia 2002)
		Gas dedicados	59% ^f	
		Eléctricos	70% ^f	

Notas:

- Los valores de los parámetros p y q varían para cada tecnología. Los valores asociados a los vehículos eléctricos fueron estimados basados en la metodología "guessing by analogy" propuesta en (Jiang, Bass y Bass 2006; Bass 2004b). Esto es el uso los parámetros estimados para estos productos en otros mercados con el fin predecir el patrón de la difusión del producto en un mercado específico. En nuestro caso tomamos como referencia la difusión de estas tecnologías en Estados Unidos y Korea. Los valores asociados a los vehículos dedicados y convertidos a gas fueron estimados optimizando el modo de referencia de las conversiones en el mercado colombiano como se muestra en el Anexo E.
- Las unidades de los atributos monetarios deben estar en euros para que puedan usarse los parámetros Beta del modelo Logit. Tasa de cambio 1 Euro=2565.41 (Agosto 24 de 2013)
- Según el grupo Gas Natural Fenosa, el tiempo de recuperación promedio de la inversión de conversión es de 12 a 18 meses(Grupo gas natural Fenosa 2013). Nosotros consideramos 5 años como tiempo de amortización siendo un horizonte prudente para observar los ahorros de la conversión.
- Tasa de interés de los certificados de depósito a término 360 días en la semana del 16/09/2013 al 22/09/2013
- El tiempo de abastecimiento de un vehículo eléctrico es de 6 horas cuando se conecta en casa.
- Los valores de los impuestos corresponden al caso base en que no hay ningún tipo de exenciones. El impuesto al valor agregado es el 16% para todos los vehículos, el impuesto al consumo es del 8% para los vehículos a gasolina y dedicados a gas y del 19% para vehículos eléctricos. Los aranceles son del 35% para todos los vehículos.

Tabla D- 2: Explicación de las variables exógenas del modelo

Variable	Significado	Fuente
Tasa de motorización	Relación de la cantidad de vehículos por habitante en Colombia en un periodo dado (vehículos/personas)	(Acevedo et al. 2009)
Población	Cantidad de habitantes en Colombia en un periodo dado (personas)	(CEPAL 2009)
Autonomía	Distancia en kilómetros que puede recorrer un vehículo con cada abastecimiento de combustible o carga (Km)	(EIA 2013; Fuel Economy 2013)
Base gravable	Son un componente del precio de venta del vehículo (miles de euros) ^a	(Kloess y Müller 2011; EIA 2013)
Costos operacionales	Costo del combustible por cada 100 kilómetros conducidos, su cálculo tiene en cuenta la evolución de los precios de los energéticos ^b y el mejoramiento en eficiencia de las tecnologías (euros/100Km) ^a	(UPME 2010a; EIA 2013; SIEL 2013)
Emisiones	Emisiones de CO2 por kilómetro recorrido (Gramos de CO2/km)	(EIA 2013; Fuel Economy 2013)

Notas:

- Las unidades de los atributos monetarios deben estar en euros para que puedan usarse los parámetros Beta del modelo Logit. Tasa de cambio 1 Euro=2565.41 (Agosto 24 de 2013)
- Para electricidad se tomó la tarifa promedio del sector residencial estrato 4 en el periodo 2008-2012.

Tabla D- 3: Valores de las variables exógenas

Año	Tasa de motorización vehículos/ personas	Población personas	Base gravable			Costos operacionales		
			Gasolina euros	Gas dedicado euros	Eléctrico euros	Gasolina euros/ 100Km	Gas Natural euros/ 100Km	Electricidad euros/ 100Km
2012	0.0698	46930000	17.819	26.905	34.397	5.987	3.532	1.71
2013	0.0727	47299000	17.819	25.814	33.235	6.001	3.522	1.70
2014	0.0756	47555000	17.819	24.855	32.118	6.212	3.621	1.67
2015	0.0785	48172000	17.819	23.961	31.046	6.675	3.936	1.66
2016	0.0814	48783000	17.819	23.131	29.974	6.943	4.090	1.66
2017	0.0843	49385000	17.819	22.301	28.946	7.101	4.162	1.66
2018	0.0872	49980000	17.819	21.599	27.920	7.273	4.211	1.65
2019	0.0901	50568000	17.819	20.961	26.937	7.189	4.171	1.65
2020	0.0930	51148000	17.819	20.387	25.999	7.169	4.207	1.62
2021	0.0959	51719000	17.819	19.926	25.149	7.189	4.135	1.62
2022	0.0988	52278000	17.819	19.481	24.565	6.978	4.050	1.61
2023	0.1024	52827000	17.819	19.243	23.985	6.905	3.968	1.57
2024	0.1062	53366000	17.819	19.185	23.538	6.780	3.909	1.56
2025	0.1100	53895000	17.819	19.131	23.223	6.605	3.770	1.53
2026	0.1138	54413000	17.819	19.079	22.953	6.520	3.806	1.52
2027	0.1176	54918000	17.819	19.028	22.772	6.577	3.732	1.52
2028	0.1214	55411000	17.819	18.986	22.592	6.638	3.829	1.51
2029	0.1252	55894000	17.819	18.967	22.412	6.854	3.960	1.51
2030	0.1290	56365000	17.819	18.952	22.275	7.068	4.064	1.51
2031	0.1328	56822000	17.819	18.943	22.184	7.280	4.193	1.50
2032	0.1366	57262000	17.819	18.934	22.112	7.495	4.323	1.50

Continúa en la siguiente página

Continúa de la página anterior

Año	Autonomía				Emisiones			
	Gasolina	Gas dedicado	Eléctrico	Gas convertido	Gasolina	Gas dedicado	Eléctrico	Gas convertido
	Km	Km	Km	Km	grCO ₂ /Km	grCO ₂ /Km	grCO ₂ /Km	grCO ₂ /Km
2012	518	311	100	259	157	137	0	148
2013	523	314	100	262	157	135	0	146
2014	527	316	100	263	156	134	0	146
2015	528	317	100	264	156	134	0	145
2016	534	320	100	267	153	132	0	143
2017	540	324	100	270	152	131	0	142
2018	552	331	100	276	150	129	0	139
2019	572	343	100	286	143	123	0	133
2020	584	350	100	292	139	121	0	131
2021	612	367	100	306	134	115	0	124
2022	643	386	100	321	127	109	0	118
2023	681	402	100	335	121	104	0	112
2024	696	422	100	352	117	99	0	107
2025	711	445	100	371	111	93	0	100
2026	726	457	100	381	106	91	0	98
2027	741	477	100	397	104	87	0	95
2028	756	483	100	402	102	87	0	94
2029	771	483	100	403	102	87	0	94
2030	785	483	100	403	102	87	0	94
2031	800	483	100	403	102	87	0	94
2032	815	484	100	403	102	87	0	94

b. Condiciones extremas

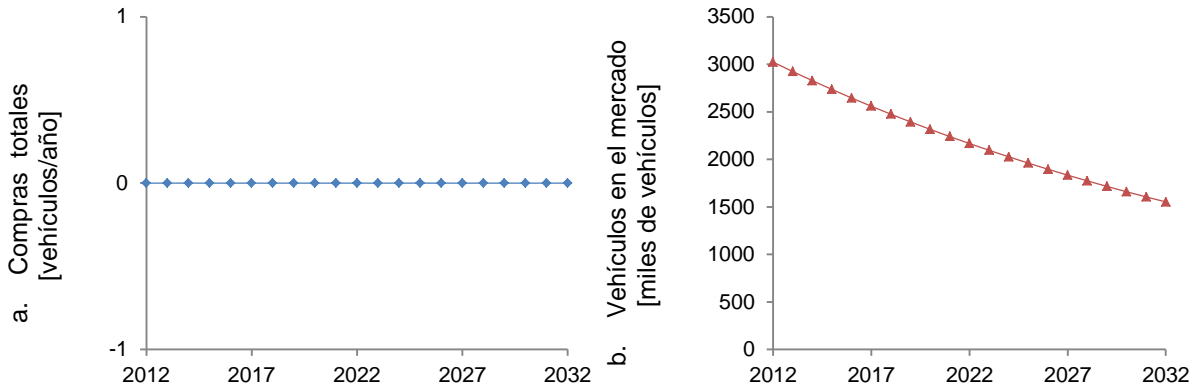
El modelo superó las siguientes condiciones extremas:

- Demanda potencial igual a cero
- Intención de compra de vehículos con fuentes alternativas igual a cero
- Intención de conversión igual a cero
- Cantidad de vehículos tradicionales igual a cero
- Oferta de vehículos con fuentes alternativas igual a cero

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en cada una de ellas.

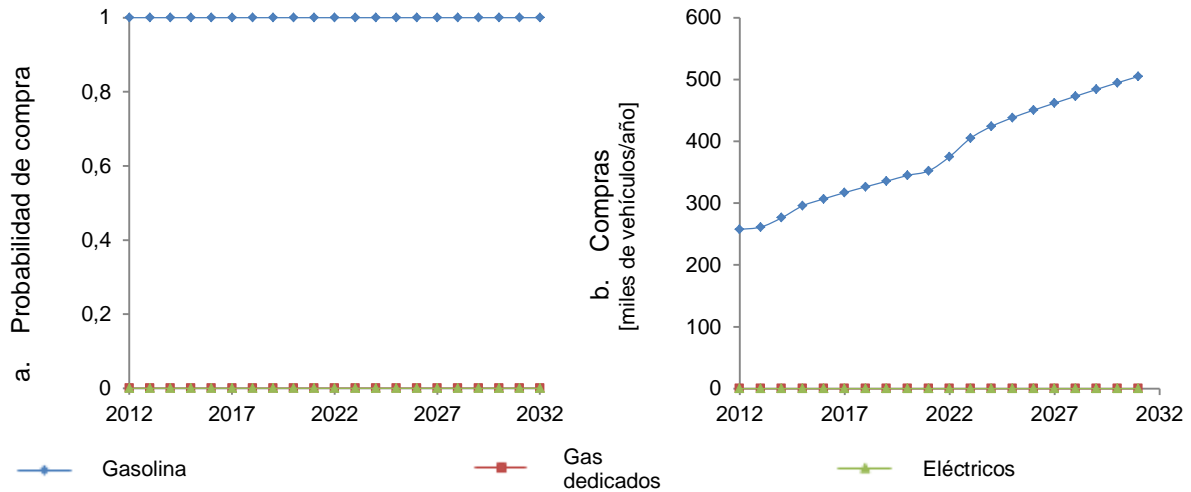
- **Demanda potencial igual a cero:** Esta condición se logra si la población es igual a cero o la tasa de motorización es igual a cero. El efecto esperado de esta condición es que no hay compras y por lo tanto la cantidad de vehículos en el mercado decrece durante toda la simulación como resultado de la dinámica de los retiros. En la Figura D-1 se ilustra este comportamiento, en la Figura D-1a se muestran las compras totales y en la Figura D-1b se presentan los vehículos en el mercado. La figura permite observar que el modelo reproduce el comportamiento esperado.

Figura D-1: Compras y vehículos en el mercado cuando la demanda potencial es cero



- **Intención de compra de vehículos con fuentes alternativas igual a cero:** Bajo esta condición, la probabilidad de compra de vehículos con fuentes alternativas es cero, en consecuencia, todas las compras realizadas en el periodo de simulación son de vehículos a gasolina. En la Figura D-2 se muestran estos resultados de forma gráfica. En la Figura D-2a se ilustran las probabilidades de compra para cada tecnología y en la Figura D-2b se muestran las compras para cada tecnología. Estos resultados evidencian que el modelo reproduce el comportamiento esperado.

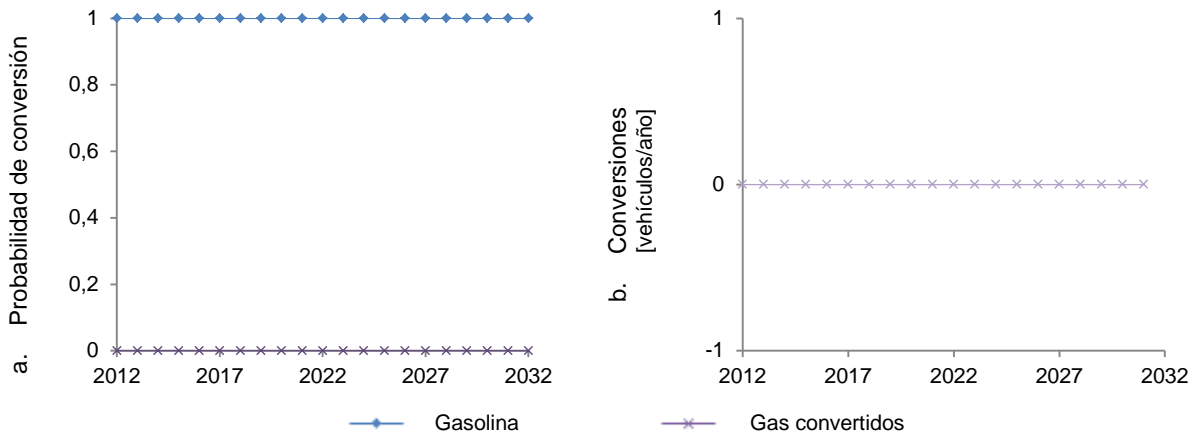
Figura D-2: Probabilidad de compra y compras de vehículos cuando la intención de compra es cero



- **Intención de conversión igual a cero:** Bajo esta condición, la probabilidad de conversión a un vehículo a gas es cero y como consecuencia, no hay conversiones de vehículos. En la Figura D-3 se muestran estos resultados de forma gráfica. En la parte Figura D-3a se ilustra la probabilidad de conversión durante el periodo simulado

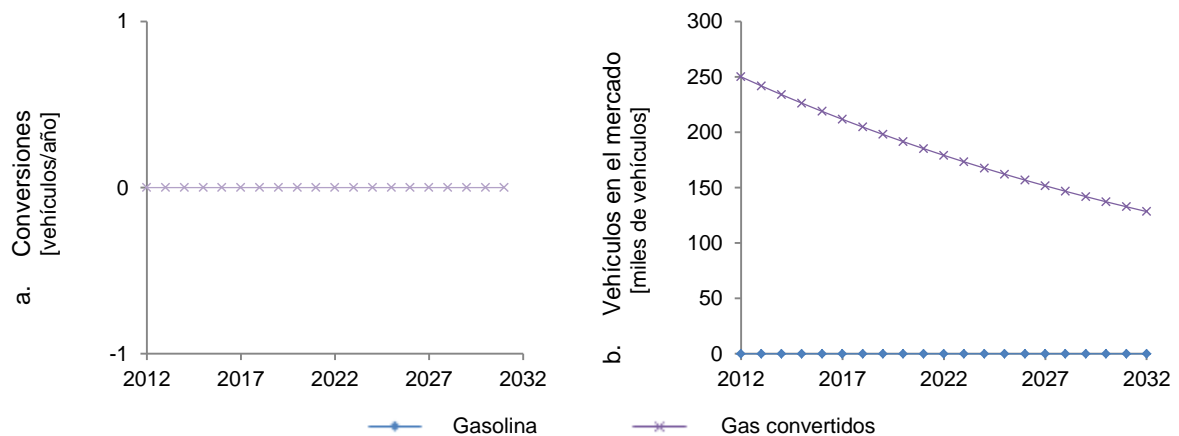
y en la Figura D-3b se muestran las conversiones. Estos resultados evidencian que el modelo reproduce el comportamiento esperado.

Figura D-3: Probabilidad de conversión y conversiones cuando la intención de conversión es cero



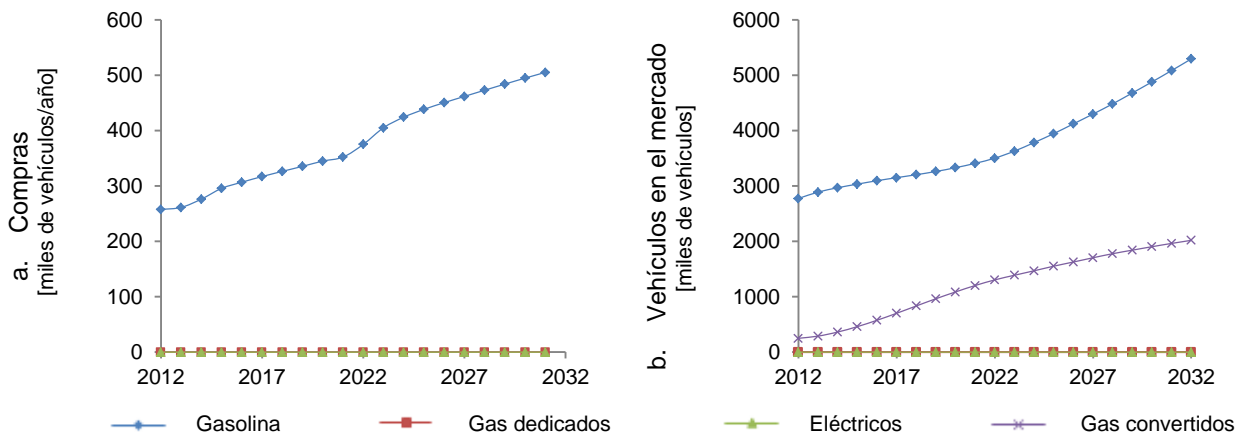
- **Vehículos tradicionales igual a cero:** Bajo el supuesto de que no existan vehículos tradicionales en el mercado, no es posible que se presenten nuevas conversiones. En consecuencia, la cantidad de vehículos convertidos decrecen desde el nivel inicial durante el horizonte simulado como consecuencia de la dinámica de los retiros. La Figura D-4 se muestra de manera gráfica estos resultados evidenciando que el modelo reproduce el comportamiento esperado. En la Figura D-4a se presentan las conversiones y en la Figura D-4b se ilustran los vehículos tradicionales y los vehículos convertidos a gas durante el periodo simulado.

Figura D-4: Conversiones y vehículos en el mercado cuando los vehículos tradicionales son cero



- **Oferta de vehículos con fuentes alternativas igual a cero:** En esta condición se supone que no hay disponibilidad de vehículos con fuentes alternativas durante toda la simulación, en consecuencia, toda la demanda se satisface con vehículos tradicionales y no hay compras de vehículos con fuentes alternativas. De este modo, en el mercado sólo están presentes vehículos tradicionales y vehículos convertidos a gas natural. La Figura D-5 ilustra los resultados de la simulación bajo esta condición y permite observar que el modelo refleja el comportamiento esperado. En la Figura D-5a se muestran las compras de vehículos y en la Figura D-5b se ilustran los vehículos en el mercado.

Figura D-5: Compras y vehículos en el mercado cuando la oferta de vehículos con fuentes alternativas es cero



A partir del análisis realizado en esta sección se concluye que el modelo construido supera la prueba de condiciones extremas.

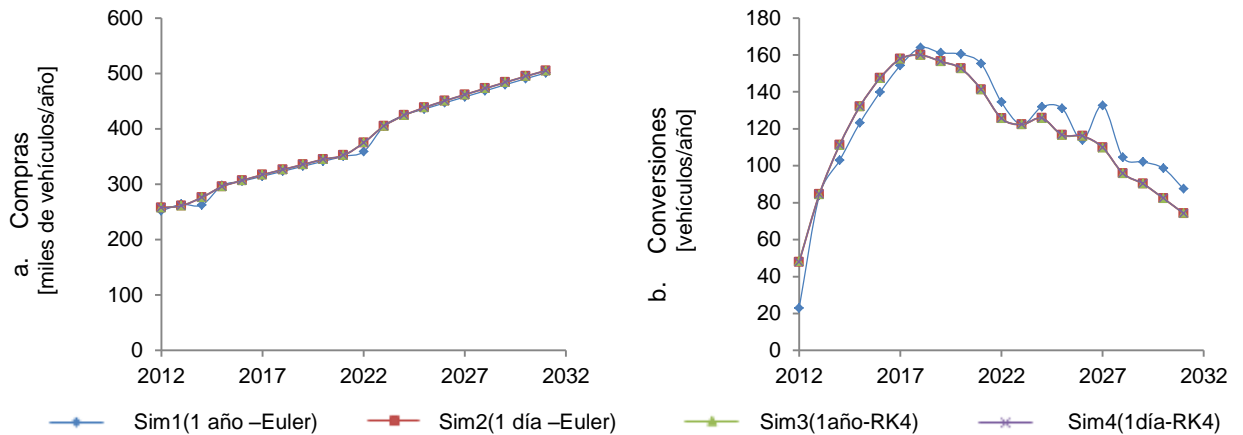
c. Errores de integración

Para realizar el análisis se hicieron cuatro simulaciones. En la primera se tomó un tiempo de paso de un año y el método de integración fue el método de Euler, con la segunda simulación se cambió el tiempo de paso al mínimo posible (1 día), con la tercera simulación se cambió el método de integración al Runge-Kutta cuatro (RK4), con la cuarta se modificaron el tiempo de paso (1 día) y el método de integración (RK4).

En la Figura D-6 se presentan los resultados de las simulaciones realizadas sobre dos variables: compras totales (Figura D-6a) y conversiones (Figura D-6b). Se puede

observar que las simulaciones dos, tres y cuatro describen resultados similares en todo el horizonte de tiempo. Además, se puede ver que con las simulaciones dos, tres y cuatro se suavizan las curvas que describen la dinámica de las variables, sin embargo, se conservan los patrones de comportamiento. Luego, es posible afirmar que el comportamiento de las variables modeladas es poco sensible a cambios en el método de integración y el tamaño de paso.

Figura D-6: Simulaciones para detectar errores de integración



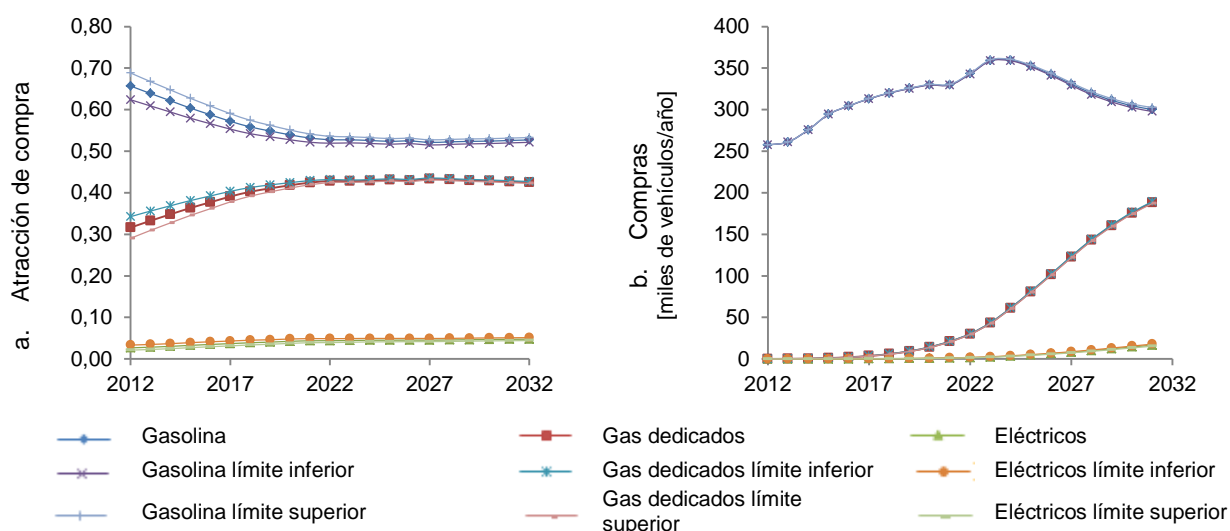
d. Análisis de sensibilidad

En este apartado se realiza análisis de sensibilidad a algunos parámetros asociados a los coeficientes Beta, a las influencias internas y a las influencias externas. En cada uno de los casos analizados se realizaron 2 simulaciones para considerar límites superiores e inferiores alejados un 20% del valor base. Se sensibilizaron estos parámetros dado que están directamente relacionados con las reglas de decisión del modelo. Las variaciones en los coeficientes Beta afectan directamente la atracción mientras que cambios en las influencias externas o internas afectan la intención. Como se mostró en la sección 3.3.1, la intención y la atracción determinan la probabilidad de compra y conversión que a su vez afecta las dinámicas más relevantes del modelo: compras y conversiones.

Teniendo en cuenta lo anterior, en cada uno de los análisis se muestran los resultados que afectan la intención, atracción, compras o conversiones según sea relevante.

- **Sensibilidad al coeficiente Beta del precio:** El efecto de cambios en el coeficiente Beta asociado al precio se pueden observar en la Figura D-7. En ella se ilustra la sensibilidad de la atracción de compra (Figura D-7a) y las compras (Figura D-7b) para cada una de las tecnologías ante variaciones del parámetro. Los resultados indican que aunque existe sensibilidad a este parámetro, los efectos no son representativos y a pesar de los cambios se conserva el comportamiento de las compras.

Figura D-7: Sensibilidad al coeficiente Beta del precio



- **Sensibilidad al coeficiente Beta de los costos:** En la Figura D-8 se ilustra el efecto de cambios en el coeficiente Beta asociado a los costos sobre la atracción de compra (Figura D-8a) y las compras (Figura D-8b). Es posible notar que las variables son sensibles a los cambios en el parámetro, sin embargo, a pesar de las variaciones se conserva la dinámica del sistema. De manera similar se observa en la Figura D-9 el efecto de los cambios en el parámetro sobre la atracción de conversión (Figura D-9a) y las conversiones (Figura D-9b). Estas variables muestran el mismo comportamiento ante variaciones del coeficiente Beta.

Figura D-8: Sensibilidad de la atracción de compra y las compras al coeficiente Beta de los costos

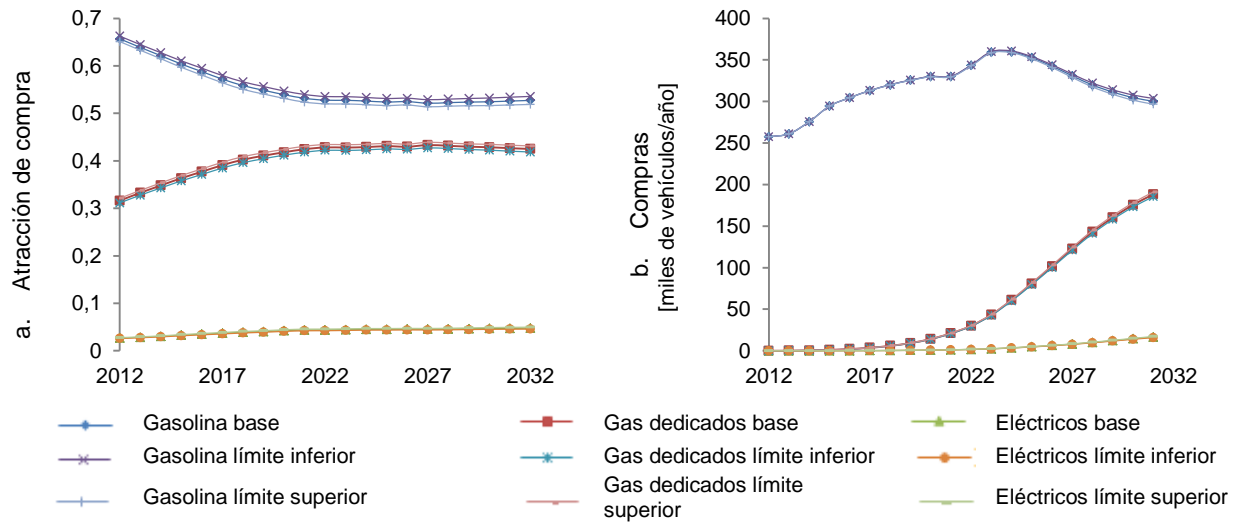
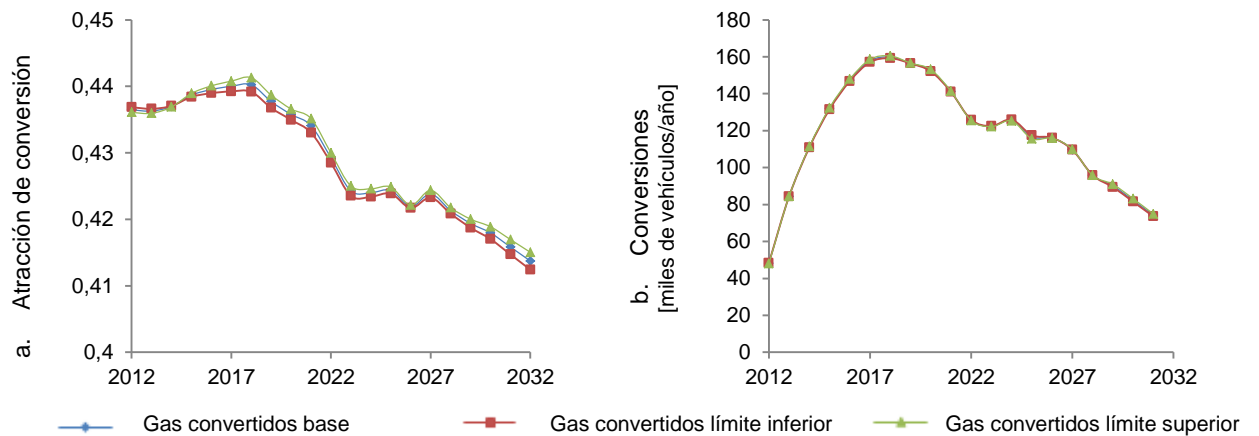
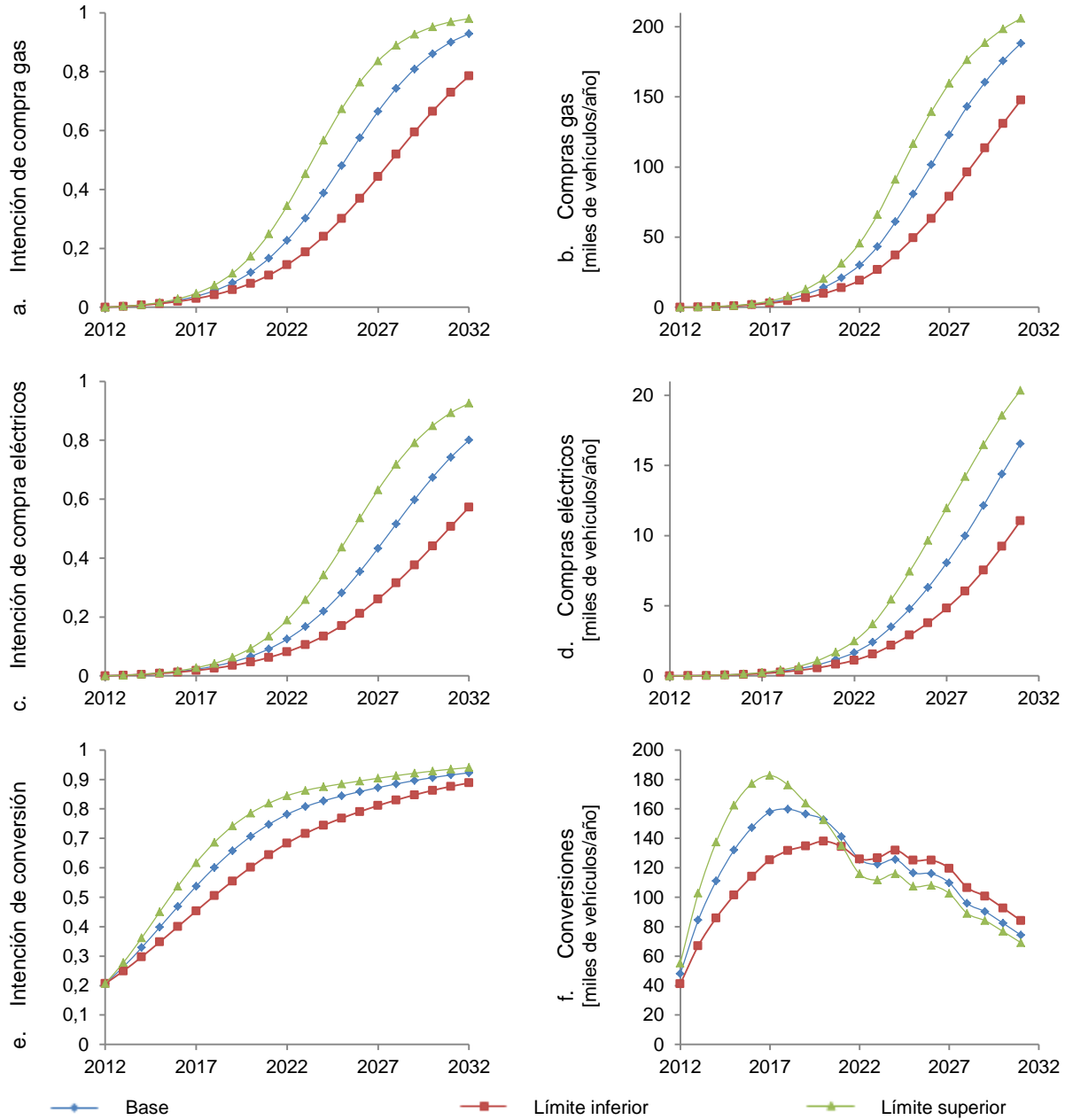


Figura D-9: Sensibilidad de la atracción de conversión y conversiones al coeficiente Beta de los costos



- Sensibilidad a las influencias internas:** La sensibilidad de las variables intención de compra, intención de conversión, compras y conversiones ante cambios en los parámetros asociados a las influencias internas para cada tecnología se puede observar en la Figura D-10. En la parte superior de la figura se muestran los efectos sobre la intención de compra (Figura D-10a) y las compras de vehículos dedicados a gas (Figura D-10b). En el medio se ilustran los efectos sobre la intención de compra (Figura D-10c) y las compras de vehículos eléctricos (Figura D-10d). En la parte inferior se muestran los efectos sobre la intención de conversión (Figura D-10e) y las conversiones (Figura D-10f).

Figura D-10: Sensibilidad de la intención de compra, intención de conversión, compras y conversiones ante cambios en las influencias internas



En las figuras de la izquierda puede notarse que la intención es sensible a cambios en las influencias internas. Para las compras de las nuevas tecnologías, la sensibilidad se hace más notoria a partir del año 2020, mientras que para las conversiones se evidencia desde el año 2012. Este comportamiento puede explicarse por la estructura del modelo de difusión de Bass en la cual durante los primeros años de la difusión, la mayor parte de la dinámica está asociada a influencias externas y posteriormente a influencias internas.

Como consecuencia de dichas variaciones, las compras y conversiones también son sensibles, esto puede apreciarse en las figuras de la derecha. Sin embargo, es posible notar que, en cada caso, que a pesar de las sensibilidades, las variables conservan el patrón de comportamiento en el tiempo.

- **Sensibilidad a las influencias externas:** En la Figura D-11 se ilustran los efectos de cambios en los parámetros influencias externas para cada tecnología sobre la intención de compra, intención de conversión, compras y conversiones. En la parte superior de la figura se muestran los efectos sobre la intención de compra (Figura D-11a) y las compras de vehículos dedicados a gas (Figura D-11b). En el medio se ilustran los efectos sobre la intención de compra (Figura D-11c) y las compras de vehículos eléctricos (Figura D-11d). En la parte inferior se muestran los efectos sobre la intención de conversión (Figura D-11e) y las conversiones (Figura D-11f).

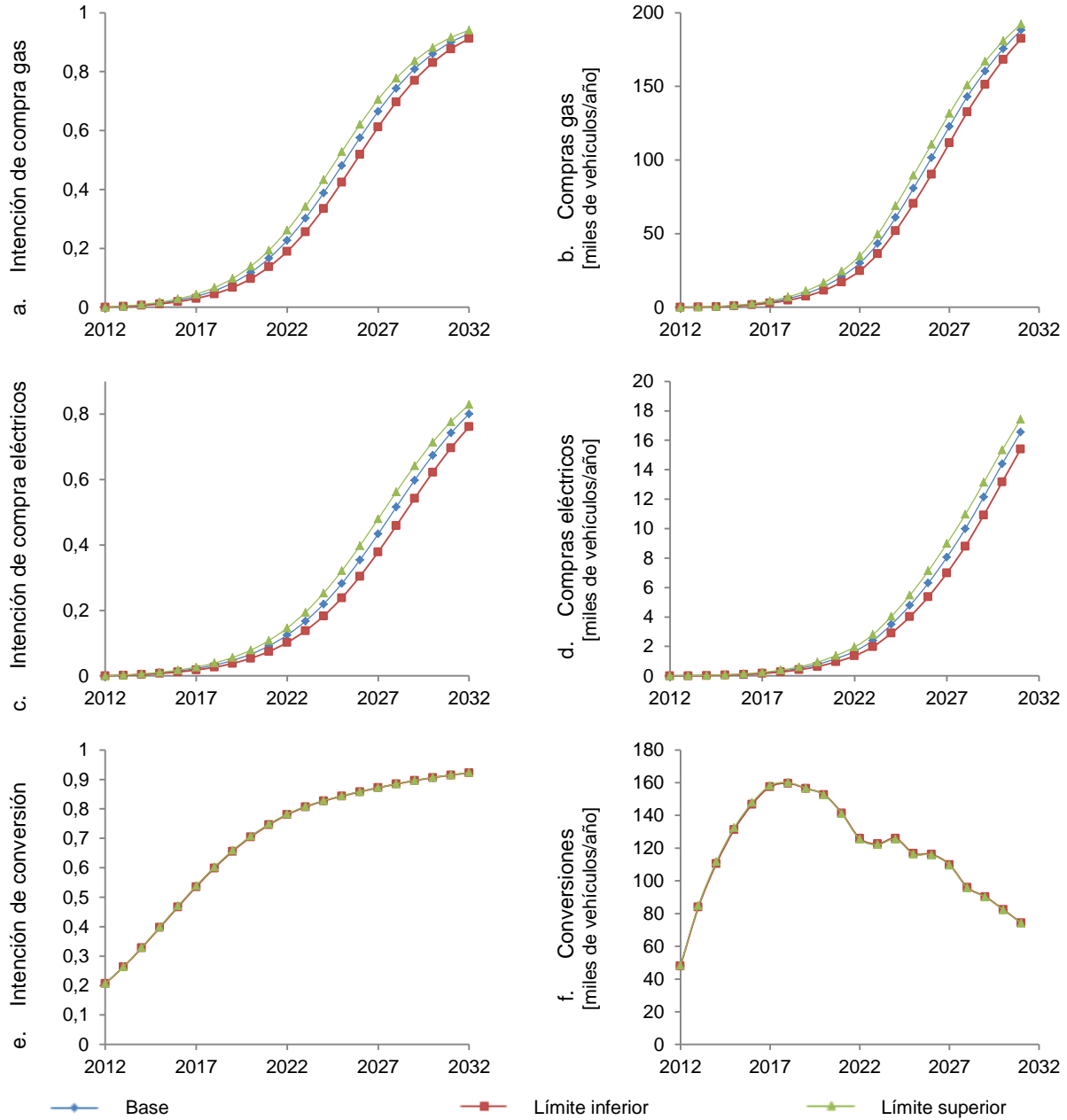
Es posible notar que las variables asociadas a las compras de tecnologías nuevas son sensibles a cambios en el parámetro, mientras que las variables relacionadas con las conversiones no son sensibles. Este comportamiento también se explica por la estructura del modelo de Bass. Además, en las gráficas puede observarse que a pesar de las sensibilidades se conserva el comportamiento en el tiempo de las variables.

El análisis de sensibilidad realizado en esta sección permitió validar la robustez del comportamiento del modelo ante cambios en algunos de los parámetros clave y además dio algunas pistas sobre los puntos de apalancamiento del sistema que serán usados en el análisis de estrategias que se presenta en el siguiente capítulo.

e. Patrón de comportamiento

En esta sección se evalúa si el modelo construido es capaz de reproducir el comportamiento histórico de las conversiones y a la vez se valida la regla de decisión para las conversiones con el propósito de ilustrar la importancia de incluir la racionalidad limitada en el modelado.

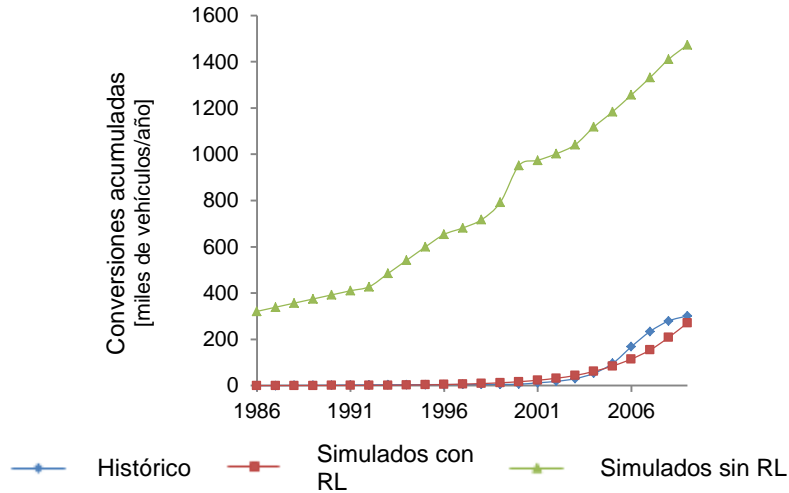
Figura D-11: Sensibilidad de la intención de compra, intención de conversión, compras y conversiones ante cambios en las influencias externas



Se realizaron dos simulaciones para el periodo 1986-2009, en una se incluyó racionalidad limitada a través de la intención de conversión y en la otra no se incluyó. Luego, se compararon los resultados obtenidos con el modo de referencia conocido para las conversiones acumuladas. En la Figura D-12 se observa la comparación gráfica de los resultados simulados con el modo de referencia, en ella se nota que el modelo construido con racionalidad limitada intenta reproducir el comportamiento histórico de las

conversiones acumuladas y se ajusta mejor a los datos que el modelo que no considera racionalidad limitada.

Figura D-12: Comparación de modelos en la reproducción del modo de referencia



Adicionalmente, se evaluó estadísticamente el ajuste de ambos modelos a los datos históricos usando como métricas la media absoluta de error (MAE), la media absoluta del porcentaje del error (MAPE), el error cuadrático medio (MSE) y el Estadístico Theil. En la Tabla D- 4 se presenta el resumen de los estadísticos usados. En la primera columna aparece la métrica, en la segunda la definición, en la tercera la fórmula para el cálculo y en las últimas dos columnas los valores obtenidos para los modelos con racionalidad limitada y sin racionalidad limitada.

Tabla D- 4: Resumen de la comparación estadística de los modelos

Métrica	Definición	Fórmula	Resultados modelo con RL	Resultados modelo sin RL
MAE	Media absoluta de error	$MAE = \frac{1}{n} \sum X_m - X_d $	13.609	733.306
MAPE	Media absoluta del porcentaje del error	$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{ X_m - X_d }{X_d}$	0.588	529.677
MSE	Error cuadrático medio	$MSE = \frac{1}{n} \sum (X_m - X_d)^2$	671.894	626671.940
Estadístico Theil	Descompone el MSE en tres	$U^M = \frac{(\bar{X}_m - \bar{X}_d)^2}{MSE}$	0.089	0.858
	componentes: sesgo (U^M), varianza (U^S)	$U^S = \frac{(S_m - S_d)^2}{MSE}$	0.631	0.127
	y covarianza (U^C). $U^M + U^S + U^C = 1$	$U^C = \frac{2(1-r)S_m S_d}{MSE}$	0.280	0.015

Nota: n es el total de los datos, X_m son los datos simulados, X_d son los datos del modo de referencia

A partir de los resultados estadísticos MAE, MAPE y MSE puede concluirse que el modelo que incorpora racionalidad limitada reproduce mucho mejor el modo de referencia que el modelo que no considera racionalidad limitada pues en todos los casos las medidas del error son menores. De hecho, puede observarse que estas medidas del error son aproximadamente 100 veces mayores cuando no se incluye racionalidad limitada.

Los valores del estadístico de Theil para el modelo con racionalidad limitada permiten establecer que la principal fuente de error en el ajuste está asociada a la varianza, esto indica que el error se debe esencialmente a la dificultad del modelo para estimar el grado de variabilidad de la serie real. Por otro lado, el valor obtenido para la componente del sesgo (cercano a cero) indica que los valores simulados se aproximan bien a los valores reales de la variable. En general, la existencia de una proporción del error asociada a la covarianza no compromete la habilidad del modelo para cumplir el propósito con el que fue diseñado.

El análisis desarrollado en esta sección permitió evidenciar que el modelo que incluye racionalidad limitada tiene mejor capacidad para reproducir el modo de referencia. Estos resultados, a su vez reafirman la importancia de incluir racionalidad limitada en el modelado y validan la regla de decisión del modelo dando soporte y relevancia a las variables asociadas a la intención.

E. Anexo: Calibración de los coeficientes de innovación e imitación para la intención de conversión

El proceso de calibración de los coeficientes de innovación e imitación para la intención de conversión se realizó a partir del modo de referencia de las conversiones acumuladas. Según las reglas de decisión del modelo, las conversiones acumuladas (Ca) son una función del mercado potencial (mc) y la probabilidad de conversión (Pco) (como se muestra en la ecuación 1). A su vez, la probabilidad de conversión es una función de la atracción (Aco) y la intención de conversión (Inc) (como se muestra en la ecuación 2). Dicha intención es una proporción de la población con intención de convertirse respecto al mercado potencial de las conversiones (como se muestra en la ecuación 3). De este modo, sustituyendo las ecuaciones [2] y [3] en [1], es posible expresar las conversiones acumuladas como el producto de la población con intención de convertirse y la atracción de conversión (como se muestra en la ecuación 3).

$$Ca = mc * Pco \quad [1]$$

$$Pco = Aco * Inc \quad [2]$$

$$Inc = Pfco/mc \quad [3]$$

$$Ca = Aco * Pfco \quad [4]$$

En la ecuación 4, la única variable conocida es las conversiones acumuladas (Ca), luego fue necesario encontrar los valores para las incógnitas atracción de conversión (Aco) y población con intención de convertirse ($Pfco$), este proceso se realizó con los pasos que se describen a continuación.

Pasos:

1. Se construyó un modelo LogitMultinomial para determinar la atracción de conversión(Aco) en el periodo 1986-2009 (La descripción de los datos usados y los valores de las variables se muestran en la Tabla E- 1 y la Tabla E- 2 al final del anexo).
2. Se usaron los valores conocidos de las conversiones acumuladas y la atracción hallada en el paso anterior para determinar población con intención de conversión en cada año del horizonte temporal 1986-2009 (La descripción de los datos usados y los valores de las variables se muestran en la Tabla E- 1 y la Tabla E- 2 al final del anexo).

Según la formulación del modelo, presentada en la sección 3.3.4, la población con intención de conversión en cada periodo de tiempo sigue un proceso de difusión de Bass en el cual la Tasa de familiarización de la conversión se expresa como se muestra en la ecuación 5. En esta ecuación, los únicos parámetros desconocidos son las influencias externas (q_c) y las influencias internas (p_c).

$$Tfc = p_c mc + (q_c - p_c) Pfc - q_c / mc Pfc^2 \quad [5]$$

Para hallar los parámetros (q_c) y (p_c) se construyó un modelo de simulación en Powersim con el propósito de usar la herramienta de optimización para minimizar el error cuadrático acumulado de la diferencia entre la población con intención de conversión histórica hallada con los pasos 1 y 2 y la población con intención de conversión estimada con el modelo construido. El diagrama de flujos y niveles del modelo construido para la optimización del modo de referencia se presenta en la Figura E- 1.

El proceso de optimización permitió identificar que los valores de los (q_c) y (p_c) que minimizan el error acumulado son $q_c = 0.3752$ y $p_c = 0.0026$. En la Figura E- 2 se observa de forma comparativa la población con intención de conversión histórica y la población con intención de conversión estimada con los parámetros hallados. Esta figura permite apreciar que los valores estimados se ajustan a los valores históricos y por tanto pueden ser usados para alimentar el modelo de simulación con el que se estudia la evolución de la difusión de vehículos con fuentes alternativas en el mercado colombiano.

Figura E- 1: Modelo construido para estimar los parámetros influencias externas e influencias internas

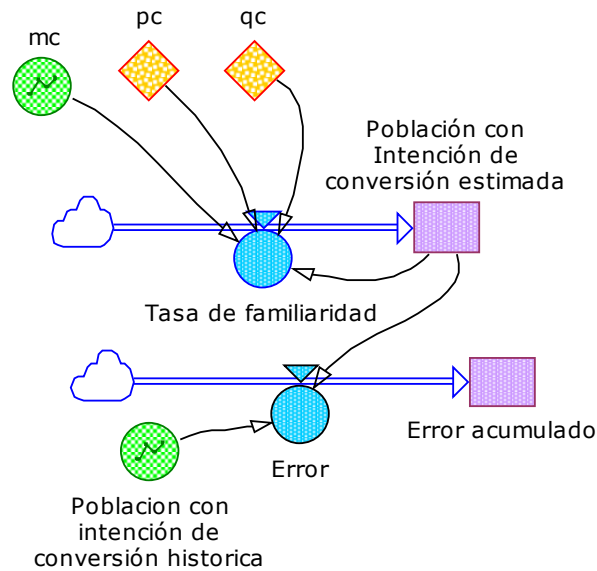
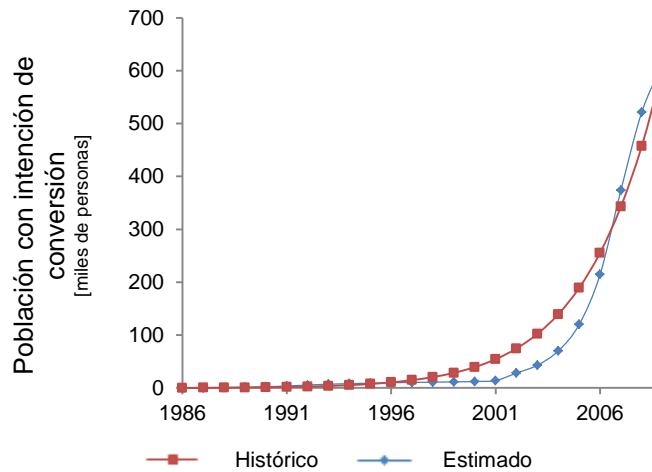


Figura E- 2: Comparación población con intención de conversión histórica y estimada



En lo que resta de este anexo se presenta la descripción y valores de las variables usadas para la calibración de los parámetros. En la Tabla E- 1 se muestra para cada variable las fuentes de información de las cuales se obtuvieron los datos y en la Tabla E- 2 se listan los valores de las variables que fueron usadas. Con esto se pretende dar transparencia al proceso de calibración para permitir la replicabilidad de la investigación realizada.

Tabla E- 1: Descripción de las variables usadas para la calibración

Variables usadas para la calibración	Fuente
Autonomía ^a	(Fuel Economy 2013)
Tiempo de abastecimiento ^a	(Ito, Takeuchi, y Managi 2013; Shepherd, Bonsall, y Harrison 2012)
Emisiones ^a	(Fuel Economy 2013)
Estaciones de abastecimiento ^b	(UPME 2012; Compañía de Entrenamiento Técnico Automotriz 2001)
Costo anual equivalente ^c	(Portafolio 2013; Vergara 2009)
Conversiones históricas acumuladas	(Portafolio 2013; UPME 2012)
Mercado potencial	(UPME 2010b)

Notas:

- Las variables Autonomía, Tiempo de abastecimiento y Emisiones tienen valores fijos e iguales a los del año 2012 puesto que no se encontró la información para los años 1986-2009.
- Las estaciones de abastecimiento a gasolina tiene valor fijo e igual al del año 2012 puesto que no fue posible obtener información asociada al periodo de interés.
- Los valores de los precios de los combustibles para el periodo de interés se obtuvieron del sistema de información de petróleo y gas colombiano. El precio del Kit de conversión se obtuvo de (Vergara, 2009)

Tabla E- 2: Valores de las variables usados para la calibración

	Estaciones de servicio gas	Costo anual equivalente gas	Costo anual equivalente gasolina	Conversiones acumuladas	Mercado potencial
Año	Estaciones	Euros/yr	Euros/yr	vehículos	vehículos
1986	1	3.14	4.30	38	750000
1987	1	3.14	4.30	272	792329
1988	6	3.14	4.30	546	833996
1989	6	3.14	4.30	907	875663
1990	15	3.14	4.30	1541	917330
1991	15	3.14	4.30	2296	958997
1992	16	3.14	4.30	2962	1000000
1993	16	3.14	4.30	3428	1133066
1994	16	3.14	4.30	3805	1267628
1995	22	3.14	4.30	4175	1402190
1996	22	3.14	4.30	4439	1528151
1997	22	3.14	4.30	4650	1594050
1998	22	3.14	4.30	4866	1677719
1999	22	3.14	4.30	5199	1852718
2000	78	3.14	4.30	6000	2225974
2001	78	3.14	4.30	12000	2277185
2002	78	3.14	4.30	18364	2344133
2003	78	3.14	4.30	29917	2435650
2004	97	3.71	3.60	53164	2524066
2005	155	4.24	3.79	95912	2648093
2006	284	4.62	3.98	168159	2796340
2007	406	5.02	4.44	234098	2968774
2008	514	5.66	4.49	279678	3096018
2009	601	5.72	5.12	301405	3281147

Bibliografía

Acevedo, J., Bocarejo, J. P., Echeverry, J. C., Ospina, G., Lleras, G. C., & Rodríguez-Valencia, A. (2009). *El transporte como soporte al desarrollo de Colombia: una visión al 2040* (1. ed.). Bogotá: Universidad de los Andes.

Åhman, M. (2006). Government policy and the development of electric vehicles in Japan. *Energy Policy*, 34(4), 433–443. doi:10.1016/j.enpol.2004.06.011

Al-Alawi, B. M., & Bradley, T. H. (2013). Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 190–203.

Anandarajah, G., McDowall, W., & Ekins, P. (2013). Decarbonising road transport with hydrogen and electricity: Long term global technology learning scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(8), 3419–3432. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.110

Atabani, A. E., Badruddin, I. A., Mekhilef, S., & Silitonga, A. S. (2011). A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4586–4610. doi:10.1016/j.rser.2011.07.092

Banco de la república. (2013). Tasas de captación semanales y mensuales. Retrieved September 17, 2013, from http://www.banrep.org/series-estadisticas/see_tas_inter_capt_sem_men.htm

Baptista, P., Tomás, M., & Silva, C. (2010). Plug-in hybrid fuel cell vehicles market penetration scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(18), 10024–10030.

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System dynamics review*, 12(3), 183–210.

Bass, F. M. (2004a). A New Product Growth for Model Consumer Durables. *Management Science*, 50(12 Supplement), 1825–1832. doi:10.1287/mnsc.1040.0264

Bass, F. M. (2004b). Comments on “A New Product Growth for Model Consumer Durables.” *Management Science*, 50(12 Supplement), 1833–1840. doi:10.1287/mnsc.1040.0300

Behdani, B. (2012). Evaluation of paradigms for modeling supply chains as complex socio-technical systems. In *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2012 Winter* (pp. 1–15). doi:10.1109/WSC.2012.6465109

- Bento, N. (2010). Dynamic competition between plug-in hybrid and hydrogen fuel cell vehicles for personal transportation. *International journal of hydrogen energy*, 35(20), 11271–11283. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.07.103
- Bhushan, S. (2013). Capturing Structural Complexity of Innovation Diffusion through System Dynamics. *International Journal of System Dynamics Applications*, 2(1), 59–96. doi:10.4018/ijdsda.2013010104
- Bleischwitz, R., & Bader, N. (2010). Policies for the transition towards a hydrogen economy: the EU case. *Energy Policy*, 38(10), 5388–5398. doi:10.1016/j.enpol.2009.03.041
- Bossomaier, T. R. J., & Green, D. G. (2000). *Complex systems*. Cambridge: New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Brown, M. (2013). Catching the PHEVer: Simulating Electric Vehicle Diffusion with an Agent-Based Mixed Logit Model of Vehicle Choice. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 16(2).
- Browne, D., O'Mahony, M., & Caulfield, B. (2012). How should barriers to alternative fuels and vehicles be classified and potential policies to promote innovative technologies be evaluated? *Journal of Cleaner Production*, 35(0), 140–151. doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.019
- Browne, M. N., & Keeley, S. M. (2007). *Asking the right questions: a guide to critical thinking* (8th ed.). Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall.
- Brownstone, D., Bunch, D. S., & Train, K. (2000). Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(5), 315–338. doi:10.1016/S0191-2615(99)00031-4
- Cadavid, L., & Franco, C. J. (2010). Procesos de difusión de innovaciones en tecnologías limpias para el sector transporte.
- Cadavid, L., & Franco, C. J. (2012a). Modelos de adopción de innovaciones: similitudes, diferencias, limitaciones y futuras investigaciones. Presented at the III Congreso Internacional de Gestión Tecnológica e Innovación, COGESTEC, Medellín.
- Cadavid, L., & Franco, C. J. (2012b). Tecnologías limpias: desafíos para su adopción individual y difusión en las economías. Presented at the III Congreso Internacional de Gestión Tecnológica e Innovación, COGESTEC, Medellín.
- Cadavid, L., Franco, C. J., & Awad, G. (2012). Análisis Bibliométrico del Campo Modelado de Difusión de Innovaciones.

CEPAL, C. E. para A. L. y el C. (2009). *Proyección de población*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.

Chinn, M. D., & Fairlie, R. W. (2010). ICT Use in the Developing World: An Analysis of Differences in Computer and Internet Penetration. *Review of International Economics*, 18(1), 153–167. doi:10.1111/j.1467-9396.2009.00861.x

CODENSA. (2011). *Memoria Anual 2011* (p. 66). Retrieved from http://www.codensa.com.co/documentos/5_17_2012_10_28_11_AM_Memoria%20Anual%202011.pdf

Colombia, C. de C. Ley 788 de 2002 (2002). Retrieved from <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=7260>

Colombia, P. de la R. Decreto 4570 de 2005 Por el cual se modifica el arancel de aduanas. , Pub. L. No. 4570 (2005). Retrieved from http://www.minminas.gov.co/minminas/kernel/usuario_externo_normatividad/form_consultar_normas_gas.jsp?parametro=1619&site=20

Colombia Congreso de la República 2011 Ley 1450 de 2011 “Por La Cual Se Expide El Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014.” http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/normatividad/Leyes/2011/Ley_1450_2011_Pnd.pdf.

Compañía de Entrenamiento Técnico Automotriz. (2001, September 21). Estudio de consultoría en Gas Natural Vehicular. Retrieved from http://www.gnc.org.ar/downloads/G_gas_natural_vehicular_estudio_GNV_EEPPM.pdf

CONFIS. (2011). Acta No. 424 Consejo Superior de Política Fiscal CONFIS. Retrieved from <http://www.minhacienda.gov.co/portal/page/portal/HomeMinhacienda/politicafiscal/Confis/actas/Acta%20424%20%2011%20de%20Mayo%20%20de%202011.pdf>

Da Silveira, G. (2001). Innovation diffusion: research agenda for developing economies. *Technovation*, 21(12), 767–773. doi:10.1016/S0166-4972(01)00007-4

Dagsvik, J. K., Wennemo, T., Wetterwald, D. G., & Aaberge, R. (2002). Potential demand for alternative fuel vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(4), 361–384. doi:10.1016/S0965-8564(01)00013-1

DANE. (2010, September 13). Boletín censo general 2005 perfil Colombia. Retrieved from http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/00000T7T000.PDF

De Simio, L., Gambino, M., & Iannaccone, S. (2013). Possible transport energy sources for the future. *Transport Policy*, 27, 1–10. doi:10.1016/j.tranpol.2013.01.006

- Densing, M., Turton, H., & Bäuml, G. (2012). Conditions for the successful deployment of electric vehicles – A global energy system perspective. *Energy*, 47(1), 137–149. doi:10.1016/j.energy.2012.09.011
- Dijk, M., Orsato, R. J., & Kemp, R. (2012). The emergence of an electric mobility trajectory. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84860561279&partnerID=40&md5=afc939054e4362b6977517c7f0dac9cf>
- DNP Departamento Nacional de Planeación 2011 Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 “Resumen Ejecutivo.” <https://www.dnp.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=4-J9V-FE2pl%3D&tabid=1238>.
- Dyner, I., & Franco, C. J. (2004). Consumers' bounded rationality: the case of competitive energy markets. *Systems Research and Behavioral Science*, 21(4), 373–389. doi:10.1002/sres.644
- Egbue, O., & Long, S. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy Policy*, 48(0), 717–729. doi:10.1016/j.enpol.2012.06.009
- Eggers, F., & Eggers, F. (2011). Where have all the flowers gone? Forecasting green trends in the automobile industry with a choice-based conjoint adoption model. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(1), 51–62.
- EIA. (2011). International Energy Outlook 2011. Retrieved from <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484%282011%29.pdf>
- EIA. (2013). Annual Energy Outlook 2013 with projections 2040. Retrieved from <http://www.eia.gov/forecasts/aeo>
- El tiempo. (2011, diciembre). Así funciona la importación de vehículos en el país -. *eltiempo.com*. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-10907698>
- EPM. (2011). *Informe de Sostenibilidad 2011*.
- Eppstein, M. J., Grover, D. K., Marshall, J. S., & Rizzo, D. M. (2011). An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicles. *Energy Policy*, 39(6), 3789–3802. doi:10.1016/j.enpol.2011.04.007
- Epstein, J. M. (2008). Why model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4), 12.
- Etezadi-Amoli, M., Choma, K., & Stefani, J. (2010). Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3), 1883–1887. doi:10.1109/TPWRD.2010.2047874

- Fendipetroleo. (2013a, June 30). El mercado local de combustibles asiste a una intensa "guerra de precios." *elcolombiano.com*. Retrieved from [http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/G/gasolineras_mueven_\\$28_billones_en_colombia/gasolineras_mueven_\\$28_billones_en_colombia.asp](http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/G/gasolineras_mueven_$28_billones_en_colombia/gasolineras_mueven_$28_billones_en_colombia.asp)
- Fendipetroleo. (2013b, September 10). Vida util estaciones de abastecimiento. Retrieved from <https://mail.google.com/mail/u/0/?shva=1#apps/presidencia%40fendipetroleo.com/14108aaa4fa43ce5>
- Forrester, J. W. (1958). Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers. *Harvard Business Review*, 36(4), 37–65.
- Forrester, J. W. (1995). The beginning of system dynamics. *McKinsey Quarterly*, 4–17.
- Franco, C. J., & Baena, A. (2010). Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 7, 135–141.
- Franco, C. J., & Figueroa, D. (2008). Modelado de la penetración de vehículos particulares con fuentes alternativas de energía al mercado colombiano. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 5, 101–107.
- Fuel Economy. (2013). Compare Side by Side. Retrieved from <http://www.fueleconomy.gov/feg/evsbs.shtml>
- Garcia, R., & Jager, W. (2011). From the Special Issue Editors: Agent-Based Modeling of Innovation Diffusion*. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), 148–151.
- Ghaffarzadegan, N., Lyneis, J., & Richardson, G. P. (2010). How small system dynamics models can help the public policy process. *System Dynamics Review*, n/a–n/a. doi:10.1002/sdr.442
- Gilbert, G. N., & Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the social scientist*. Maidenhead, England; New York, NY: Open University Press.
- Größler, A. (2004). A content and process view on bounded rationality in system dynamics. *Systems Research and Behavioral Science*, 21(4), 319–330. doi:10.1002/sres.646
- Hackbarth, A., & Madlener, R. (2013). Consumer preferences for alternative fuel vehicles: A discrete choice analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 5–17. doi:10.1016/j.trd.2013.07.002
- Helmers, E., & Marx, P. (2012). Electric cars: Technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe*, 24(4). doi:10.1186/2190-4715-24-14

- Hickman, R., Saxena, S., Banister, D., & Ashiru, O. (2012). Examining transport futures with scenario analysis and MCA. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(3), 560–575. doi:10.1016/j.tra.2011.11.006
- Higgins, A., Paevere, P., Gardner, J., & Quezada, G. (2012). Combining choice modelling and multi-criteria analysis for technology diffusion: An application to the uptake of electric vehicles. *Technological Forecasting and Social Change*. doi:10.1016/j.techfore.2012.04.008
- Holland, J. H. (2002). Complex Adaptive Systems and Spontaneous Emergence. In A. Q. Curzio & M. Fortis (Eds.), *Complexity and Industrial Clusters* (pp. 25–34). Heidelberg: Physica-Verlag HD. Retrieved from http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-50007-7_3
- Høyer, K. G. (2008). The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 16(2), 63–71.
- IEA. (2011). CO₂ emissions from fuel combustion. Retrieved from <http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>
- Ito, N., Takeuchi, K., & Managi, S. (2013). Willingness-to-pay for infrastructure investments for alternative fuel vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 18(0), 1–8. doi:10.1016/j.trd.2012.08.004
- Kahneman, D. (2002). Maps of bounded rationality: A perspective on intuitive judgment and choice. *Nobel prize lecture*, 8, 351–401.
- Kang, M. J., & Park, H. (2011). Impact of experience on government policy toward acceptance of hydrogen fuel cell vehicles in Korea. *Energy Policy*, 39(6), 3465–3475. doi:10.1016/j.enpol.2011.03.045
- Kiesling, E., Günther, M., Stummer, C., & Wakolbinger, L. M. (2011). Agent-based simulation of innovation diffusion: a review. *Central European Journal of Operations Research*, 20(2), 183–230. doi:10.1007/s10100-011-0210-y
- Kley, F., Lerch, C., & Dallinger, D. (2011). New business models for electric cars—A holistic approach. *Energy Policy*, 39(6), 3392–3403. doi:10.1016/j.enpol.2011.03.036
- Kloess, M., & Müller, A. (2011). Simulating the impact of policy, energy prices and technological progress on the passenger car fleet in Austria—A model based analysis 2010–2050. *Energy Policy*, 39(9), 5045–5062. doi:10.1016/j.enpol.2011.06.008
- Köhler, J., Whitmarsh, L., Nykvist, B., Schilperoord, M., Bergman, N., & Haxeltine, A. (2009). A transitions model for sustainable mobility. *Ecological Economics*, 68(12), 2985–2995. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.06.027

- Kwon, T. (2012). Strategic niche management of alternative fuel vehicles: A system dynamics model of the policy effect. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(9), 1672–1680. doi:10.1016/j.techfore.2012.05.015
- Lee, D. H., Park, S. Y., Kim, J. W., & Lee, S. K. (2013). Analysis on the feedback effect for the diffusion of innovative technologies focusing on the green car. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(3), 498–509. doi:10.1016/j.techfore.2012.08.009
- Lee, S.-G., Trimi, S., & Kim, C. (2013). The impact of cultural differences on technology adoption. *Journal of World Business*, 48(1), 20–29. doi:10.1016/j.jwb.2012.06.003
- Li, X., Clark, C. D., Jensen, K. L., Yen, S. T., & English, B. C. (2013). Consumer purchase intentions for flexible-fuel and hybrid-electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 18, 9–15. doi:10.1016/j.trd.2012.08.001
- Lundvall, B.-A., Joseph, K. ., Chaminade, C., & Vang, J. (2009). *Handbook of innovation systems and developing countries: building domestic capabilities in a global setting*. Cheltenham, Glos, UK ; Northampton, MA, USA: Edward Elgar.
- Mabit, S. L., & Fosgerau, M. (2011). Demand for alternative-fuel vehicles when registration taxes are high. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), 225–231. doi:10.1016/j.trd.2010.11.001
- MacVaugh, J., & Schiavone, F. (2010). Limits to the diffusion of innovation: A literature review and integrative model. *European Journal of Innovation Management*, 13(2), 197–221. doi:10.1108/14601061011040258
- Maier, F. H. (1998). New product diffusion models in innovation management—a system dynamics perspective. *System Dynamics Review*, 14(4), 285–308. doi:10.1002/(SICI)1099-1727(199824)14:4<285::AID-SDR153>3.0.CO;2-F
- Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955–967. doi:10.1016/j.respol.2012.02.013
- MAVDT, M. de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2007). Guía ambiental para estaciones de servicio. Retrieved from <http://www.fendipetroleo.com/newweb/images/stories/pdf/guiaambientalparaEDS.pdf>
- MAVDT, M. de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2011, September 23). Incentivos a vehículos limpios. Retrieved from http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/VeintiUno/3_VEHICULOS%20LIMPIOS_MAVDT.pdf

- McManus, W., & Senter, R. (2009). *Market models for predicting PHEV adoption and diffusion* (p. 32). University of Michigan Transportation Research Institute. Retrieved from <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/64436/102399.pdf?sequence=1>
- Meade, N., & Islam, T. (2006). Modelling and forecasting the diffusion of innovation – A 25-year review. *International Journal of Forecasting*, 22(3), 519–545. doi:10.1016/j.ijforecast.2006.01.005
- Melaina, M., & Bremson, J. (2008). Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: Sufficient urban station coverage. *Energy Policy*, 36(8), 3233–3241. doi:10.1016/j.enpol.2008.04.025
- Meyer, P. E., & Winebrake, J. J. (2009). Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure. *Technovation*, 29(2), 77–91. doi:10.1016/j.technovation.2008.05.004
- Milling, P. M. (2002). Understanding and managing innovation processes. *System Dynamics Review*, 18(1), 73–86. doi:10.1002/sdr.231
- MME, M. de minas y energía. (2010). Gas Natural Vehicular. Retrieved from http://www.minminas.gov.co/minminas/gas.jsp?cargaHome=3&id_categoria=127
- Montalvo, C. (2008). General wisdom concerning the factors affecting the adoption of cleaner technologies: a survey 1990–2007. *Journal of Cleaner Production*, 16(1, Supplement 1), S7–S13. doi:10.1016/j.jclepro.2007.10.002
- Montalvo, C., & Kemp, R. (2008). Cleaner technology diffusion: case studies, modeling and policy. *Journal of Cleaner Production*, 16(1, Supplement 1), S1–S6. doi:10.1016/j.jclepro.2007.10.014
- Morecroft, J. D. (1983). System dynamics: Portraying bounded rationality. *Omega*, 11(2), 131–142. doi:10.1016/0305-0483(83)90002-6
- Morecroft, J. D. W. (1992). Executive knowledge, models and learning. *European Journal of Operational Research*, 59(1), 9–27.
- Moxnes, E. (1998). Overexploitation of renewable resources: The role of misperceptions. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 37(1), 107–127.
- Mueller, M. G., & De Haan, P. (2009). How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars—Part I: Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation. *Energy Policy*, 37(3), 1072–1082.
- Nakata, T., Silva, D., & Rodionov, M. (2011). Application of energy system models for designing a low-carbon society. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(4), 462–502. doi:10.1016/j.pecs.2010.08.001

- Ou, X., Zhang, X., & Chang, S. (2010). Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China's future road transport: Life-cycle energy demand and GHG emissions. *Energy Policy*, 38(8), 3943–3956. doi:10.1016/j.enpol.2010.03.018
- Park, S. Y., Kim, J. W., & Lee, D. H. (2011). Development of a market penetration forecasting model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles considering infrastructure and cost reduction effects. *Energy Policy*, 39(6), 3307–3315. doi:10.1016/j.enpol.2011.03.021
- Peres, R., Muller, E., & Mahajan, V. (2010). Innovation diffusion and new product growth models: A critical review and research directions. *International Journal of Research in Marketing*, 27(2), 91–106. doi:10.1016/j.ijresmar.2009.12.012
- Pidd, M. (1999). Just modeling through: A rough guide to modeling. *Interfaces*, 118–132.
- Portafolio. (2013). Renault trae los primeros carros eléctricos al país. *Portafolio.co*. Retrieved February 12, 2013, from <http://www.portafolio.co/negocios/carros-electricos-colombia>
- Propfe, B., Kreyenberg, D., Wind, J., & Schmid, S. (2013). Market penetration analysis of electric vehicles in the German passenger car market towards 2030. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(13), 5201–5208. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.02.049
- Rahmandad, H., & Sterman, J. (2008). Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models. *Management Science*, 54(5), 998–1014.
- Rao, K. U., & Kishore, V. V. N. (2010). A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1070–1078. doi:10.1016/j.rser.2009.11.007
- Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of innovations* (4th ed.). New York: Free Press.
- Rouvinen, P. (2006). Diffusion of digital mobile telephony: Are developing countries different? *Telecommunications Policy*, 30(1), 46–63. doi:10.1016/j.telpol.2005.06.014
- Santos, G., Behrendt, H., Maconi, L., Shirvani, T., & Teytelboym, A. (2010). Part I: Externalities and economic policies in road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), 2–45. doi:10.1016/j.retrec.2009.11.002
- Santos, G., Behrendt, H., & Teytelboym, A. (2010). Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), 46–91.
- Shafiei, E., Stefansson, H., Asgeirsson, E. I., Davidsdottir, B., & Raberto, M. (2013). Integrated Agent-based and System Dynamics Modelling for Simulation of Sustainable Mobility. *Transport Reviews*, 33(1), 44–70. doi:10.1080/01441647.2012.745632

- Shepherd, S., Bonsall, P., & Harrison, G. (2012). Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study. *Transport Policy*, 20(0), 62–74. doi:10.1016/j.tranpol.2011.12.006
- Shimogawa, S., Shinno, M., & Saito, H. (2012). Structure of S-shaped growth in innovation diffusion. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 85(5). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84861950047&partnerID=40&md5=1e434f909a95a8d459a7e366b3f8f0ac>
- SIEL. (2013). SUI Tarifa Promedio por Empresa - Período 2008 a 2013 Anual - Sector Residencial. *Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL*. Retrieved September 20, 2013, from http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_SuiConsumo.aspx?IdModulo=2&Servicio=4
- Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., & van Wee, B. (2012). Technological diversity of emerging eco-innovations: a case study of the automobile industry. *Journal of Cleaner Production*, 37, 211–220. doi:10.1016/j.jclepro.2012.07.011
- Simon, H. A. (1972). Theories of bounded rationality. *Decision and organization*, 1, 161–176.
- Simon, Herbert A. (2000). Bounded rationality in social science: Today and tomorrow. *Mind & Society*, 1(1), 25–39.
- Sobrino, F. H., Monroy, C. R., & Pérez, J. L. . (2010). Biofuels in Spain: Market penetration analysis and competitiveness in the automotive fuel market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3076–3083.
- Steenberghen, T., & López, E. (2008). Overcoming barriers to the implementation of alternative fuels for road transport in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 16(5), 577–590. doi:10.1016/j.jclepro.2006.12.001
- Sterman, J. D. (1989). Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science*, 35(3), 321–339. doi:10.1287/mnsc.35.3.321
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston [etc.]: Irwin/McGraw-Hill.
- Struben, J., & Sterman, J. D. (2008). Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(6), 1070–1097. doi:10.1068/b33022t
- Sweeney, L. B., & Sterman, J. D. (2001). Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory. *System Dynamics Review*, 16(4), 249–286.

- Sweeting, W. J., & Winfield, P. H. (2012). Future transportation: Lifetime considerations and framework for sustainability assessment. *Energy Policy*, 51, 927–938. doi:10.1016/j.enpol.2012.09.055
- Tellefsen, T., & Takada, H. (1999). The relationship between mass media availability and the multicountry diffusion of consumer products. *Journal of International Marketing*, 7(1), 77–96.
- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82–102. doi:10.1016/j.rser.2012.11.077
- UPME. (2010a). PEN 2010- 2030. Retrieved from <http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN%202010%20VERSION%20FINAL.pdf>
- UPME. (2010b). Proyección de demanda de combustibles líquidos y GNV en Colombia.
- UPME. (2012). Opciones de transporte para diversificar la matriz energética. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Presentaciones/2012/PRESENTACION_PERU.pdf
- Van Eck, P. S., Jager, W., & Leeflang, P. S. H. (2011). Opinion Leaders' Role in Innovation Diffusion: A Simulation Study. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), 187–203. doi:10.1111/j.1540-5885.2011.00791.x
- Vergara, C. (2009). Who switches to hybrids? A study of a fuel conversion program in Colombia. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(5), 572–579.
- Walther, G., Wansart, J., Kieckhäfer, K., Schnieder, E., & Spengler, T. S. (2010). Impact assessment in the automotive industry: mandatory market introduction of alternative powertrain technologies. *System Dynamics Review*, 26(3), 239–261. doi:10.1002/sdr.453
- Wejnert, B. (2002). Integrating models of diffusion of innovations: A conceptual framework. *Annual Review of Sociology*, 28(1), 297–326. doi:10.1146/annurev.soc.28.110601.141051
- Wiedmann, K.-P., Hennigs, N., Pankalla, L., Kassubek, M., & Seegebarth, B. (2011). Adoption barriers and resistance to sustainable solutions in the automotive sector. *Journal of Business Research*, 64(11), 1201–1206. doi:10.1016/j.jbusres.2011.06.023
- Xinyu, C. (2004, June 30). *The future demand for alternative fuel passenger vehicles: A diffusion of innovation approach*. University of California, Davis California. Retrieved from http://www.tc.umn.edu/~cao/AQP_Cao.pdf
- Yeh, S. (2007). An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. *Energy Policy*, 35(11), 5865–5875.

Yunus, K., de la Parra, H. Z., & Reza, M. (2011). Distribution grid impact of Plug-In Electric Vehicles charging at fast charging stations using stochastic charging model. In *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)* (pp. 1–11).

Zhang, T., Gensler, S., & Garcia, R. (2011). A Study of the Diffusion of Alternative Fuel Vehicles: An Agent-Based Modeling Approach*. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), 152–168. doi:10.1111/j.1540-5885.2011.00789.x

Zubaryeva, A., Thiel, C., Barbone, E., & Mercier, A. (2012). Assessing factors for the identification of potential lead markets for electrified vehicles in Europe: expert opinion elicitation. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(9), 1622–1637. doi:10.1016/j.techfore.2012.06.004