

Evaluación de estrategias que impulsen la sostenibilidad del transporte particular en Colombia.

Assessment strategies to promote sustainable private transport in Colombia.

Laura A. Ardila F., Ing. y Carlos J. Franco C. PhD.
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín
laardilaf@unal.edu.co, cjfranco@unal.edu.co

--Recibido para revisión 2012, Aprobado 2012--

Resumen— Existen muchos interrogantes sobre la evolución del sector transporte particular y los mecanismos para implementar el cambio. No se sabe que tecnología dominará el sector vehículos particulares en el mercado colombiano, ni cómo será el proceso de transición y adopción de las nuevas tecnologías. Con lo cual tampoco se conocen los efectos de estrategias para incentivar un transporte particular sostenible en Colombia. En este artículo se evalúan dos estrategias para impulsar la sostenibilidad del transporte particular en Colombia usando un modelo de dinámica de sistemas. Se encontró que las estrategias para aumentar la familiaridad son mejores que los subsidios e impuestos para incentivar la adopción de vehículos con fuentes alternativas.

Palabras Clave— Dinámica de sistemas, Estrategias, Transporte sostenible, Vehículos con fuentes alternativas.

Abstract— There are many questions about the evolution of the transport sector and particularly the mechanisms to implement the change. We do not know which technology will dominate the private vehicles industry in the Colombian market, and how will the transition process and adoption of new technologies. Whereupon not know the effects of strategies to promote a sustainable private transportation in Colombia. This article evaluates two strategies to enhance the sustainability of private transportation in Colombia using a system dynamics model. We found that strategies to increase familiarity are better than subsidies and taxes to encourage the adoption by vehicles with alternative sources.

Keywords— Adoption model, Alternative Fuel Vehicles, Strategies, Sustainable transport, System Dynamic.

1. INTRODUCCIÓN

Las características del sector transporte y sus perspectivas de evolución, acompañadas de la creciente preocupación por el cambio climático, han hecho que sea éste sea considerado relevante en el planteamiento de estrategias que impulsen el desarrollo sostenible. Entre las estrategias desarrolladas se encuentra la investigación en vehículos con fuentes energéticas alternativas.

En la revisión de la literatura es posible identificar múltiples factores que actúan como barreras a la penetración de dichos vehículos en los mercados. Entre ellas se destacan: competitividad, desarrollo e investigación, precio del vehículo, almacenamiento de combustible, seguridad y responsabilidad, costo de las fuentes energéticas y estaciones de servicio limitadas [1]. En la **Tabla 1** se resume cada una de estas barreras.

Los resultados de las investigaciones han encontrado que el desafío principal para la transición a vehículos con fuentes alternativas consiste en romper las barreras creadas por los vehículos tradicionales [2]. Se espera que a medida que se rompan esas 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.

Las diferentes estrategias para orientar el transporte particular con una mirada sostenible pueden ser agrupadas en cuatro categorías según su tipo: fiscales, físicas, suaves y de conocimiento. A continuación se describe de forma general cada una de estas estrategias y en la **Figura 1** se resumen los instrumentos que pertenecen a cada categoría.

Tabla 1. Barreras al ingreso de vehículos con fuentes alternativas

Barrera	Descripción
<i>Competitividad, desarrollo e investigación</i>	Inversión inicial para entrar en una nueva tecnología al igual que el nivel de aceptación de la misma dentro de la sociedad
<i>Precio del vehículo</i>	Alto precio al usuario final
<i>Almacenamiento de combustible</i>	Tamaño y seguridad del almacenamiento usado por el usuario final
<i>Seguridad y responsabilidad</i>	Facilidad y seguridad de los equipos usados para el suministro de combustibles alternativos como estaciones de servicio
<i>Costo de las fuentes</i>	Comparado con la gasolina: precios, producción y reservas de los energéticos
<i>Estaciones de servicio limitadas</i>	Disponibilidad (cantidad) y accesibilidad a la fuente

Estrategias de tipo fiscal: son impulsadas por el gobierno y definen el marco regulatorio que crea incentivos para que las personas tomen decisiones de transporte sostenible. Pertenecen a esta categoría los impuestos, los subsidios, cargos y estándares [3–6].

Estrategias de tipo físico: esta categoría incluye políticas como un instrumento de infraestructura física. Entre ellas se encuentran la integración con el transporte público, uso de la tierra, construcción de vías, entre otras [7].

Estrategias de tipo suave: 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. Estas medidas incluyen el uso de herramientas publicitarias y mercadeo [7].

Estrategias de conocimiento: hacen énfasis en el importante rol de la investigación y desarrollo para un modelo sostenible de movilidad para el futuro [3], [7].

Tomando como referencia las barreras y las estrategias identificadas, en este artículo se presenta el análisis detallado de dos estrategias que tienen el propósito de incentivar la preferencia de vehículos con fuentes alternativas.

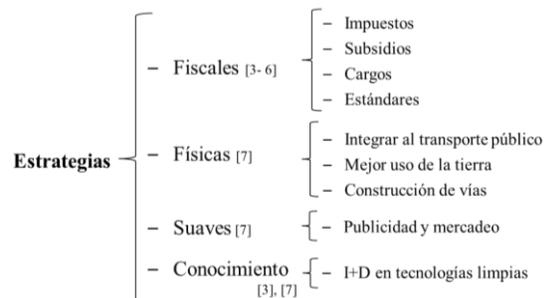


Figura 1. Clasificación de estrategias

El objetivo de este ejercicio es evaluar los efectos sobre el sistema, sin perder de vista que al tratarse de un sistema complejo pueden encontrarse resultados contra intuitivos. Finalmente, la idea con el análisis de estrategias es explorar las posibles consecuencias en el corto y largo plazo de las intervenciones realizadas en los puntos clave o puntos de apalancamiento del sistema.

Para cumplir este objetivo el resto del artículo se organiza como sigue. En la segunda sección se delimita el problema. En la tercera sección se expone la metodología. En la cuarta sección se expone el modelamiento. En la quinta sección se realiza el proceso de validación. En la sexta sección se analizan las diferentes estrategias. Finalmente, se presentan las conclusiones y perspectivas de trabajo futuro.

2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El problema de investigación está enfocado en la evaluación de estrategias para incentivar el transporte particular sostenible. Teniendo en cuenta que no se tiene claridad sobre los efectos de políticas para incentivar la preferencia por estas tecnologías.

Para desarrollar esta investigación fue necesario inicialmente modelar la adopción de vehículos particulares con fuentes alternativas en el mercado colombiano. Los casos analizados fueron los vehículos tradicionales de combustión interna y los vehículos con fuentes alternativas gas natural y electricidad. Se incluyeron estos tres tipos de vehículos considerando la constitución de la flota vehicular en Colombia y las expectativas con el ingreso de vehículos eléctricos al sistema. El proceso de difusión de las tecnologías se realizó usando un modelo Logit Multinomial. Las características o atributos de las diferentes alternativas que se analizaron fueron son: precio,

costos operacionales, costo de mantenimiento, costo anual equivalente (para las conversiones), emisiones, autonomía, tiempo de abastecimiento y estaciones de abastecimiento. La elección de los consumidores se realiza con base en la atractividad debida a dichos atributos y la familiaridad con las alternativas consideradas.

Además de lo anterior se estudiaron los procesos de mejoramiento de estos atributos vía investigación y desarrollo. 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.

3. METODOLOGÍA

El estudio de este problema se realizó usando un modelo en dinámica de sistemas considerando que es una poderosa metodología y la técnica 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 [8].

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.

Struben y Sterman [2] justifican su uso argumentando que la introducción exitosa de vehículos con fuentes alternativas es más difícil y compleja que la de muchos productos, la 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.

De otro lado, Meyer y Winebrake [9] plantean que el ambiente de dinámica de sistemas permite explorar la transición de los vehículos convencionales a los alternativos considerando las diferentes realimentaciones y complejidades del sistema.

Lo anterior permite evidenciar 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.

4. MODELAMIENTO

En esta sección se describe el modelado de la adopción de vehículos con fuentes energéticas alternativas. En principio se presenta un diagrama causal a través del cual se explica la hipótesis dinámica del problema bajo estudio y luego se muestra la representación del modelo en el diagrama de flujos y niveles.

4.1. DIAGRAMA CAUSAL

La hipótesis dinámica es una abstracción de la macroestructura del modelo a través del diagrama causal que muestra las relaciones causa-efecto entre las variables [10]. En la **Figura 2** se muestra el diagrama causal, en ella se observa que hay ocho ciclos de retroalimentación, cuatro ciclos de refuerzo en los que un cambio positivo refuerza el efecto y cuatro ciclos de balance en los que el cambio positivo contrarresta el efecto de modo que el sistema se autoajusta. A continuación se describen los elementos más importantes de este diagrama.

A través del ciclo de cambio B1 puede explicarse la naturaleza de las conversiones. Los vehículos actuales tienen dos categorías principales, vehículos tradicionales representados por los vehículos a gasolina y vehículos alternativos representados por los vehículos híbridos gasolina-gas y los híbridos eléctricos de conectar.

Las conversiones dependen de la cantidad de vehículos tradicionales que hay en el sistema y al igual que las ventas dependen de la familiaridad y la atracción derivada de los atributos de las alternativas. En general, a medida que se incrementan los vehículos tradicionales se elevan las conversiones y este proceso tiene dos efectos por un lado se reducen los vehículos tradicionales y por otro se incrementan los vehículos alternativos.

Por otro lado, el ciclo de refuerzo efecto social conversión R1 permite ilustrar las consecuencias que tienen las conversiones sobre la familiaridad. A medida que se elevan las conversiones se incrementa la cantidad de vehículos alternativos, luego se eleva la familiaridad y esto se traduce en mayores conversiones posteriores.

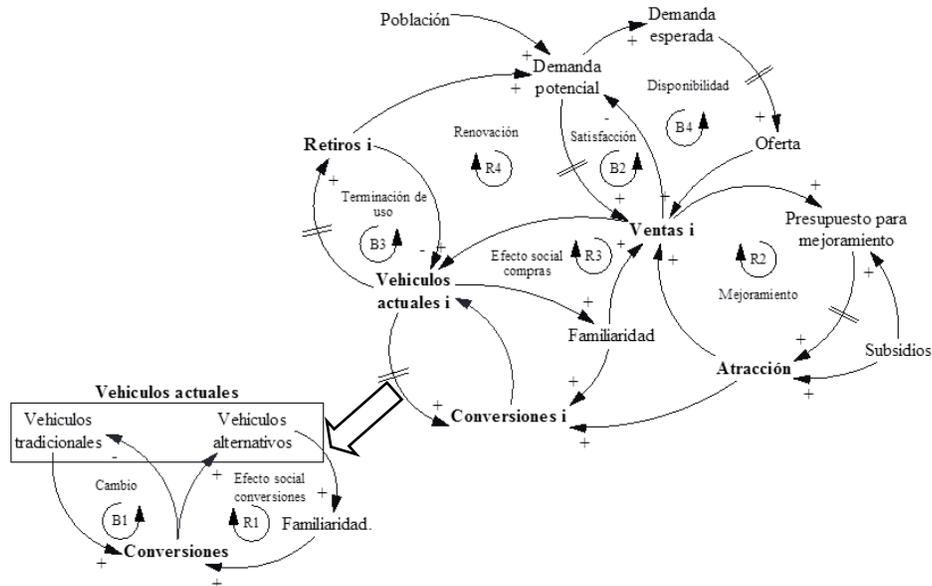


Figura 2. Diagrama causal

El ciclo R2 corresponde al ciclo de mejoramiento que representa el progreso que tienen las tecnologías a medida que mejoran sus atributos para hacerse más atractivas, los recursos para este mejoramiento vienen dados por un porcentaje de las ventas y subsidios. El ciclo R3 corresponde al efecto social compras, en él se modela la familiaridad de una tecnología como función de los vehículos actuales en el mercado.

El ciclo B2 describe la satisfacción de la demanda a través de las ventas. Por otro lado, el ciclo B3 modela los retiros del sistema vía accidentalidad y obsolescencia. El ciclo de balance B4 es el ciclo de disponibilidad en él se modela la oferta como función de la demanda esperada retardada por la capacidad de producción y el tiempo de fabricación. Finalmente, el ciclo de refuerzo R4 permite modelar la renovación de la flota automotriz.

4.2 DIAGRAMA DE FLUJOS Y NIVELES

En esta sección se formaliza el modelo en función de las ecuaciones que consideran las variables de estado o niveles y los flujos. El diagrama de flujos y niveles descrito se ilustra en la **Figura 3**.

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). La macroestructura del modelo presentada en la **Figura 2** contiene dos candidatos naturales para variables de nivel: Vehículos actuales (V_i) y Demanda potencial (D) estas son las variables de estado del sistema. El nivel de cada variable es

definido en términos de las variables de flujo asociadas.

Los vehículos actuales (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):

$$V_i = \int_0^t (C_i + I_i - R_i - S_i) dt$$

Las compras (C_i) son el mínimo entre la demanda por tecnología y la disponibilidad como se muestra en la siguiente ecuación.

$$C_i = \text{Min} \left(\frac{D * P_c}{T_e}, \frac{D_i}{T_e} \right)$$

La probabilidad de compra (P_c) se modela con la atracción de compra y la familiaridad, la atracción de compra se calcula usando el modelo logit multinomial de los atributos precio, autonomía, costos operacionales, costo mantenimiento, estaciones actuales y emisiones. Por otro lado, la disponibilidad (D_i) permite modelar la capacidad de producción de vehículos del sistema y el tiempo de entrega (T_e) se refiere al periodo que tarda la entrega del vehículo.

Los ingresos por conversión dependen de las salidas por conversión, la probabilidad de conversión y el tiempo de la conversión como se muestra en la siguiente expresión.

$$I_i = \frac{S_c * P_{lco}}{T_c}$$

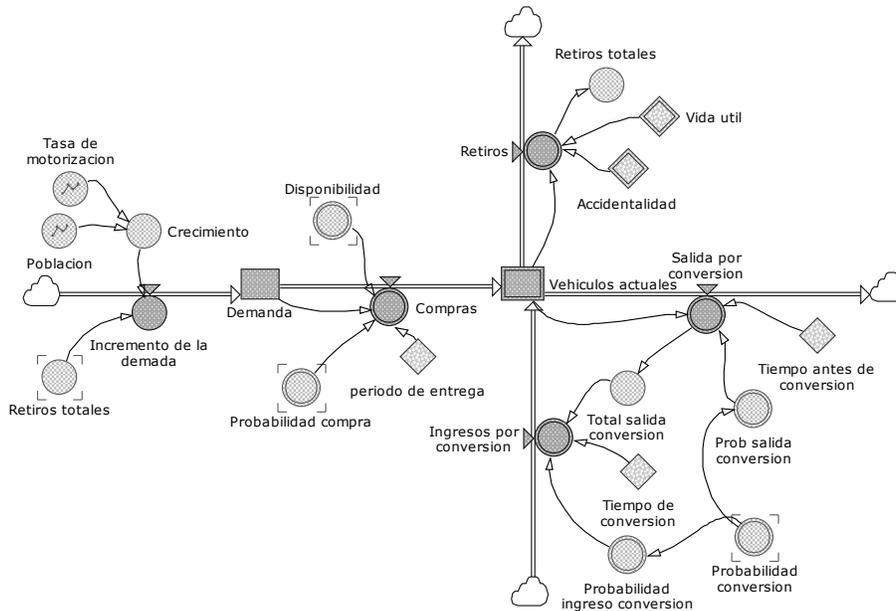


Figura 3. Diagrama de flujos y niveles

La probabilidad de ingreso por conversión (Pico) se modela con la atracción de conversión y la familiaridad, la atracción de conversión se calcula usando un modelo logit multinomial de los atributos costo anual equivalente, autonomía, estaciones actuales y emisiones.

Por otro lado el tiempo de conversión T_c hace referencia al tiempo que tarda la conversión de vehículos con fuentes tradicionales a otros con fuentes alternativas. Los retiros dependen de los vehículos actuales, la tasa de accidentalidad y la vida útil como se presenta en la siguiente ecuación.

$$R_i = V_i * Ta + \frac{V_i}{vu}$$

Finalmente, las Salidas por conversión dependen de los vehículos actuales, la probabilidad de salida por conversión y el tiempo de análisis de conversión.

$$S_i = \frac{V_i * PSc_o}{T_{ac}}$$

La probabilidad de salida por conversión (PSco) se modela con la atracción de conversión y la familiaridad, la atracción de conversión se calcula usando un modelo logit multinomial de los atributos: costo anual equivalente, autonomía, estaciones actuales y emisiones y la familiaridad.

La Demanda potencial (D) acumula los Incrementos de la demanda (ID) y Compras (C_i)

$$D = \int_0^t (ID - C_i) dt$$

Los incrementos de la demanda se dan vía Crecimiento y Retiros como se muestra en la siguiente ecuación. El crecimiento por nueva demanda se define en función de la población y la tasa de motorización.

$$ID = Cr + S_i$$

5. VALIDACIÓN

La validación de modelo permite probar si el modelo construido refleja razonablemente el comportamiento del sistema real y adicionalmente si se comporta de manera similar y consistente con este.

El modelo construido superó las tres etapas del proceso de validación: pruebas directas a la estructura, pruebas de estructura orientadas al comportamiento y pruebas de comportamiento. En la **Figura 4** se muestran las pruebas aplicadas en cada una de las etapas.



Figura 4. Pruebas de validación aplicadas al modelo

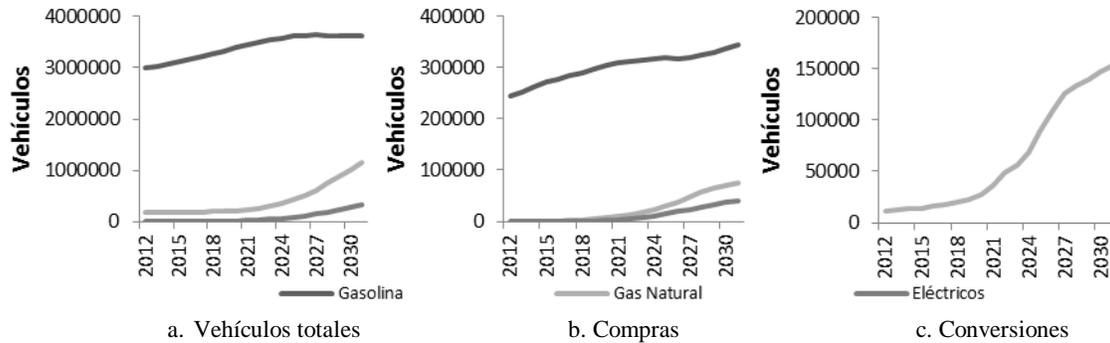


Figura 5. Resultados del caso base

6. ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS

En esta sección se presentan los resultados del modelo que constituyen el escenario base para el análisis de políticas. Luego se exponen dos estrategias, cuyos resultados se muestran de forma comparativa al caso base.

6.1 CASO BASE

En la **Figura 5a.** se observa que la cantidad de vehículos a gasolina permanece como base y a medida que avanza el tiempo se reduce la pendiente. Este fenómeno es fundamentalmente causado por un incremento en las conversiones a gas natural además de la sustitución de estos vehículos por otros con fuentes alternativas.

En la **Figura 5b.** puede observarse que durante los primeros años las compras de vehículos con fuentes alternativas es casi nula. Esto podría estar causado por la baja familiaridad con dichas tecnologías.

En la **Figura 5c.** se ilustra la dinámica de las conversiones, en ella se observa que a medida que pasa el tiempo las conversiones se incrementan, las conversiones se producen únicamente de gasolina a gas natural teniendo en cuenta los

altísimos costos y limitaciones técnicas que implica convertirse a electricidad.

6.2 ESTRATEGIA 1: Bajar los precios y costos de conversión

Con esta estrategia se busca romper la barrera del precio vía impuestos y subsidios. El análisis que se presenta a continuación está basado en las siguientes hipótesis teóricas:

Exención de impuestos: Los vehículos eléctricos tienen exención de impuestos a las importaciones.

Subsidio: El gobierno nacional u otra entidad de carácter público o privado otorga un subsidio de 5 millones de pesos para la compra de vehículos eléctricos y un subsidio de 1 millón de pesos para la conversión de vehículos a gas natural vehicular.

En la **Figura 6** se observa que las políticas implementadas logran aumentar tanto las compras como las conversiones respecto al escenario base sin embargo, las variaciones no son significativas. Al final del periodo de simulación sólo se habrá incrementado el número de vehículos con fuentes alternativas en un 6%.

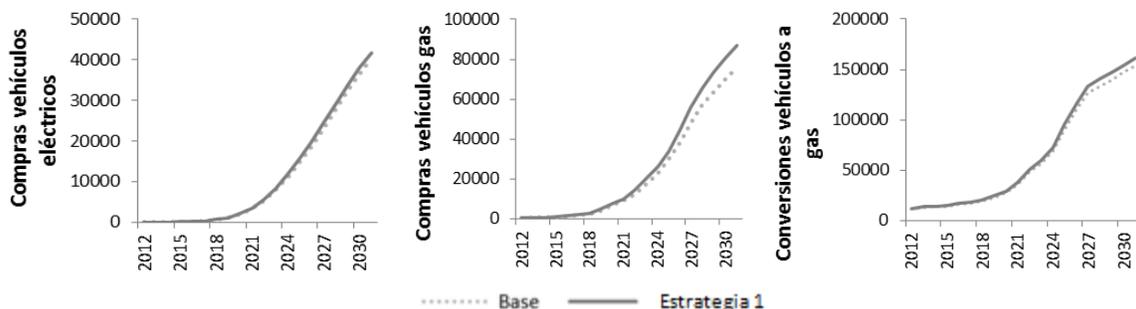


Figura 6. Resultados de la estrategia 1, respecto al caso base

6.3 ESTRATEGIA 2. Familiarizar la población

En general el proceso de toma de decisiones consta de dos etapas. En la primera se eliminan alternativas desconocidas usando reglas simples, como resultado se obtiene un conjunto de elección. En la segunda se realiza la identificación de la mejor alternativa usando una regla compensatoria multi-atributo. Y el resultado es la elección [5].

Este proceso se puede resumir en **Figura 7** donde el conjunto universal de elección es el conjunto de todas las alternativas disponibles en el mercado. Y el conjunto de elección es el conjunto de alternativas consideradas por el decisor.

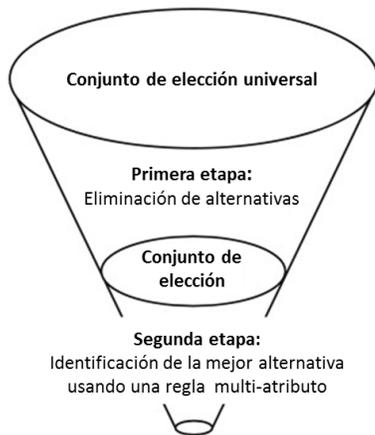


Figura 7. Modelo conceptual de dos etapas del proceso de decisión

Fuente: [5].

La información al consumidor hace posible que los vehículos con fuentes alternativas pasen la primera etapa y sean considerados en el conjunto de elección convirtiéndose en alternativas reales y

posibles para la persona que toma la decisión. En el modelo, el filtro de la primera etapa se representa a través de la familiaridad. Luego en este escenario se incluyen el conjunto de estrategias que aumenten la familiaridad de los vehículos con fuentes alternativas. El análisis que se presenta a continuación está basado en las siguientes hipótesis teóricas:

Campañas publicitarias: Desde diferentes focos de información gubernamentales se impulsan campañas publicitarias que elevan la familiaridad de la alternativa en un 10%.

Mercadeo: Los comercializadores de vehículos con fuentes energéticas alternativas desarrollan estrategias de mercadeo que elevan la familiaridad de las alternativas en un 5%

El resultado conjunto de ambas estrategias es incrementar la familiaridad de cada alternativa un 15% respecto al caso base.

En la **Figura 8** se observa que las políticas implementadas logran aumentar tanto las compras como las conversiones respecto al escenario base de forma significativa. Al final del periodo de simulación el número de vehículos con fuentes alternativas se habrá incrementado en un 35% respecto al caso base.

Finalmente, en la **Figura 9** se resume el análisis de estrategias. Cuando se comparan las curvas obtenidas, se observa que tanto las compras de vehículos con fuentes alternativas como las conversiones a gas natural se incentivan más con la estrategia 2.

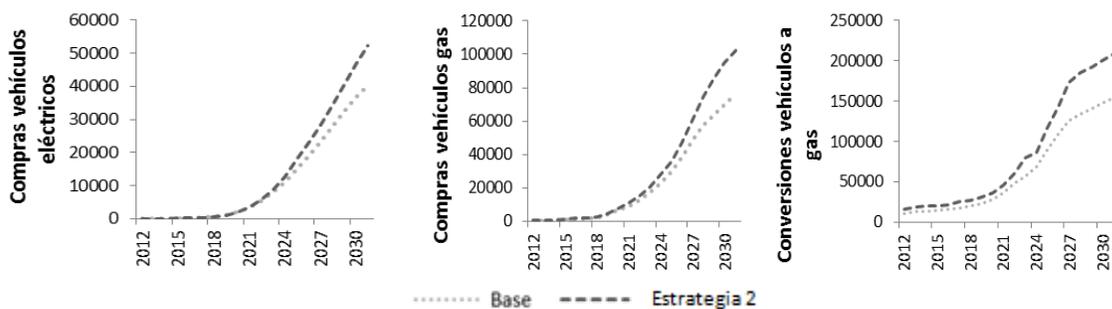


Figura 8. Resultados de la estrategia 2, respecto al caso base

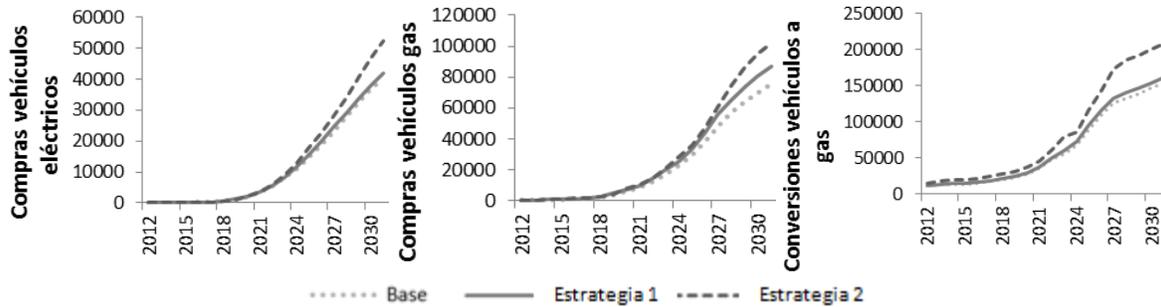


Figura 9. Resumen comparativo de estrategias

7. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones actuales, en los próximos 20 años el mercado de vehículos particulares seguirá siendo dominado por los vehículos a combustión tradicionales, con lo cual una mayor adopción de vehículos con fuentes alternativas requerirá múltiples estrategias que apoyen la sostenibilidad del transporte particular.

Las políticas diseñadas para incentivar la adopción de vehículos con fuentes alternativas deben centrarse en romper las barreras creadas por la larga trayectoria de la industria de los vehículos convencionales. En esta investigación se estudiaron estrategias enfocadas a las barreras *precio del vehículo, costo de conversión, y competitividad, desarrollo e investigación.*

Se encontró que para incentivar la adopción de vehículos con fuentes alternativas es más efectivo aumentar la familiaridad con estos, que reducir impuestos u otorgar subsidios.

8. REFERENCIAS

- [1] C. J. Franco and D. Figueroa, "Modelado de la penetración de vehículos particulares con fuentes alternativas de energía al mercado colombiano," *Revista Avances en Sistemas e Informática*, vol. 5, pp. 101–107, 2008.
- [2] J. Struben and J. Sterman, "Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems," *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 35, No. 6, pp. 1070–1097, 2008, MIT Sloan Research Paper No. 4587-06, 2007.
- [3] A. E. Atabani, I. A. Badruddin, S. Mekhilef, and A. S. Silitonga, "A review on global fuel

economy standards, labels and technologies in the transportation sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4586–4610, Dec. 2011.

- [4] S. Yeh, "An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles," *Energy Policy*, vol. 35, no. 11, pp. 5865–5875, 2007.
- [5] M. G. Mueller and P. De Haan, "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*, vol. 37, no. 3, pp. 1072–1082, 2009.
- [6] G. Santos, H. Behrendt, L. Maconi, T. Shirvani, and A. Teytelboym, "Part I: Externalities and economic policies in road transport," *Research in Transportation Economics*, vol. 28, no. 1, pp. 2–45, 2010.
- [7] G. Santos, H. Behrendt, and A. Teytelboym, "Part II: Policy instruments for sustainable road transport," *Research in Transportation Economics*, vol. 28, no. 1, pp. 46–91, 2010.
- [8] J. W. Forrester, "The beginning of system dynamics," *McKinsey Quarterly*, pp. 4–17, 1995.
- [9] P. E. Meyer and J. J. Winebrake, "Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure," *Technovation*, vol. 29, no. 2, pp. 77–91, Feb. 2009.
- [10] S. Arango, J. J. Prado, and I. Dyner, "Public Policy Assessment for Crime Reduction in Medellín: A System Dynamics Approach," *Ensayos sobre POLÍTICA ECONÓMICA*, vol. 27, no. 60, pp. 80–108, 2009.



www.dinamica-de-sistemas.com

Libros

Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



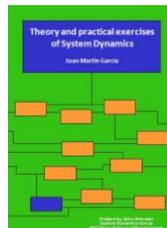
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)