

Modelado de la penetración de vehículos particulares con fuentes alternativas de energía al mercado colombiano

Modeling of the penetration of particular vehicles with alternative energy sources in the colombian market

Carlos J. Franco Cardona, PhD, Diego A. Figueroa, Ing.

Pregrado en Ingeniería de Sistemas e Informática, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín
dafiguer@unalmed.edu.co

Recibido para revisión: 3 de Octubre de 2008, Aceptado: 28 de Noviembre de 2008, Versión final: 10 de Diciembre de 2008

Resumen—En el presente trabajo se estudian los problemas a la penetración de vehículos con fuentes alternativas de energía (afv) en el mercado vehicular colombiano. Dicho estudio parte de la necesidad real y urgente de innovar en el mercado vehicular como base para evitar el incremento del calentamiento global en las siguientes dos décadas; y disminuir la dependencia del petróleo. La meta mundial y nacional a largo plazo será reemplazar los combustibles fósiles por combustibles limpios. Esta problemática se articula en un modelo de dinámica de sistemas que demuestra la competencia de cada una de las fuentes de energía por mantenerse como líder en el mercado. El modelo se desarrolla a partir de cinco (5) fuentes: gasolina, diesel, gas natural, etanol y electricidad.

Palabras Clave—Vehículos, Fuentes alternativas de energía, Mercado vehicular colombiano, Modelo de toma de decisiones, Dinámica de sistemas

Abstract—In this work we present a study about the issues related to the penetration of alternative fuel vehicles in the colombian market. Currently there is a need to change the vehicle global market to cleaner energy sources in order to prevent an increase in global warming. In the long run, the goal is to replace fossil fuels with green ones. We implemented this in a systems dynamics model that shows the capability of each energy source to be the preferred choice by consumers in the market. The model uses five energy sources: gasoline, diesel, natural gas, ethanol and electricity.

Keywords—Vehicles, Alternative fuel vehicles, Colombian vehicle market, Decision-making model, System dynamics.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a las amenazas que plantea el calentamiento global, fuentes más limpias de energía se hacen necesarias; el sector vehicular como uno de los grandes consumidores de energía no es la excepción y actualmente se están desarrollando tecnologías limpias para reemplazar los combustibles fósiles, en consecuencia se ha establecido una nueva categoría de vehículos llamados vehículos con fuentes alternativas o AFV por sus siglas en inglés.

El sector vehicular colombiano no es ajeno a la necesidad de los AFV, sin embargo, se han encontrado con barreras a su propagación en el sector particular colombiano. Algunas de estas barreras son: competitividad, precio del vehículo, almacenamiento del combustible, seguridad y costo de la fuente de energía. Estas barreras se articulan en un modelo de dinámica de sistemas con el objetivo buscar políticas que ayuden a incrementar la propagación de los AFV en el mercado vehicular colombiano.

La estructura de este artículo es la siguiente: en la sección 2, se presenta el panorama mundial y nacional del mercado vehicular, las proyecciones a futuro y las barreras para la penetración de los AFV al mercado; en la sección 3, se revisan modelos existentes para analizar la penetración de los AFV; en la sección 4, se presentan los supuestos del modelo propuesto; en la sección 5, se presenta el modelo de toma de decisiones Logit, el cual se usa para determinar la aceptación de una fuente de energía ante un decisor; en la sección 6, se presenta el modelo

de dinámica de sistemas para explicar la penetración de los AFV al mercado vehicular colombiano; en la sección 7, se presentan los resultados obtenidos bajo las condiciones actuales del mercado; finalmente, en las secciones 8 y 9, se enuncian las conclusiones y el trabajo a futuro correspondiente.

II. VEHÍCULOS CON FUENTES ALTERNATIVAS DE ENERGÍA

En la década de los 90, el sector transporte vio el más rápido crecimiento en emisiones de dióxido de carbono comparado con cualquier otro sector de la economía [1]. Según la *Agencia Internacional de Energía* (IEA, por sus siglas en inglés) en el año 1999 la gasolina y el diesel proveían el 99% de todo el combustible vehicular [2]. En el 2005 estos mismos combustibles proveían el 97% del combustible vehicular [1]; lo que hace pensar que al cabo de unos años los combustibles fósiles seguirán siendo el principal combustible en el mercado vehicular. Además se estima que el sector transporte generará el 20% del alza de emisiones de dióxido de carbono para el año 2025. [1]. Por lo tanto cualquier política energética y ambiental global que se piense debe venir acompañada con políticas para el transporte.

A nivel internacional, Claude Mandil, Director Ejecutivo de la Agencia Internacional de Energía dijo en Mayo de 2004: «*Debido a la ausencia de fuertes políticas gubernamentales, se prevee que en el mundo entero el uso del petróleo para el sector transporte se duplicará entre el 2000 y el 2030, trayendo incrementos proporcionales de las emisiones de efecto de invernadero.*» [1]

Las fuentes alternativas de energía en el mercado vehicular presentan dos problemas centrales. En primer lugar, los AFV tienen desventajas en el mercado comparados con vehículos que funcionan con fuentes convencionales. En segundo lugar, comúnmente no proveen una solución costo-beneficio a los problemas energéticos y del medio ambiente, lo cual disminuye las políticas que fomenten el uso de AFV [3].

Por otro lado, en septiembre de 2003, el *US Department of Transportation Center for Climate Change and Environmental Forecasting* dio su análisis: Opciones de fuentes para reducir las emisiones de efecto de invernadero en el sector transporte [4]. El reporte evalúa los sustitutos principales de la gasolina con el fin de reducir las emisiones de efecto de invernadero durante los próximos 25 años. Se concluye que «*la reducción de emisiones de efecto de invernadero gracias a la implantación de otras fuentes alternativas será modesta*».

A nivel de políticas de países, tanto el gobierno de Estados Unidos como el gobierno de Canadá han intentado promover fuentes alternativas de energía para el sector transporte a largo plazo. En el año 1992 dichos países establecieron políticas energéticas para una meta de reemplazos de fuentes convencionales de energía a fuentes alternativas en al menos

un 10% para el año 2000, y un 30% para el año 2010. Cabe resaltar que en el año 2005 las fuentes alternativas de energía en el sector vehicular estaban por debajo del 1% [3].

Los principales factores que han contribuido al surgimiento y fortalecimiento mundial del mercado vehicular con fuentes alternativas de energía son: 1) el aumento permanente en los precios de los combustibles convencionales, 2) la dependencia comercial de proveedores, 3) la disminución en las reservas de los combustibles fósiles [5] y 4) el impacto negativo que el consumo de los combustibles fósiles causa al medio ambiente [3].

Detrás de las inquietudes a implantar las fuentes alternativas de energía desarrolladas, a un costo-beneficio, con el propósito de reducir las emisiones de efecto de invernadero, existen históricamente seis barreras para el éxito de dichas fuentes [3]:

Competitividad, desarrollo e investigación: Inversión inicial para entrar en una nueva tecnología al igual que el nivel de aceptación de la misma dentro de la sociedad.

Alto costo del vehículo. Costo para el usuario final, de un vehículo capaz de funcionar con fuentes alternativas de energía.

Almacenamiento del combustible: Tamaño y seguridad del almacenamiento utilizado por el usuario final.

Seguridad y responsabilidad: Facilidad y seguridad de los equipos utilizados para el suministro del combustibles alternativos, como las estaciones de servicio o los transportadores.

Costo de las fuentes Comparado con la gasolina: precios, producción y las reservas de los energéticos.

Estaciones de servicio limitadas: Disponibilidad (cantidad) y accesibilidad de dicha fuente (problema del huevo y la gallina)

Estas barreras se asocian una o la gran mayoría a cada una de las fuentes alternativas de energía en el sector vehicular; por ejemplo, un vehículo con gas natural sufre del problema de las estaciones de servicio limitadas, es decir existe una baja cantidad de estaciones de servicio para cubrir la demanda de vehículos con ésta fuente.

En la Figura 1 se observa el consumo final de energía por energético en el sector transporte mundial y colombiano.

Si se parte de estas cifras, se comprueba que en el mercado colombiano las barreras a una posible penetración han sido similares pero a escalas un poco diferentes.

Si se observa detenidamente en el caso colombiano, se nota una gran cantidad de vehículos trabajando con diesel, este fenómeno se da por la famosa «dieselización» del parque automotor dada a principios del año 2000. En el caso del GNV se explica dicho porcentaje gracias a los incentivos para su masificación dados a partir de 2004. En el caso del Etanol su tendencia es a capturar mayor nicho de mercado, debido a la nueva reglamentación que impulsa en el mediano y largo plazo este biocombustible.

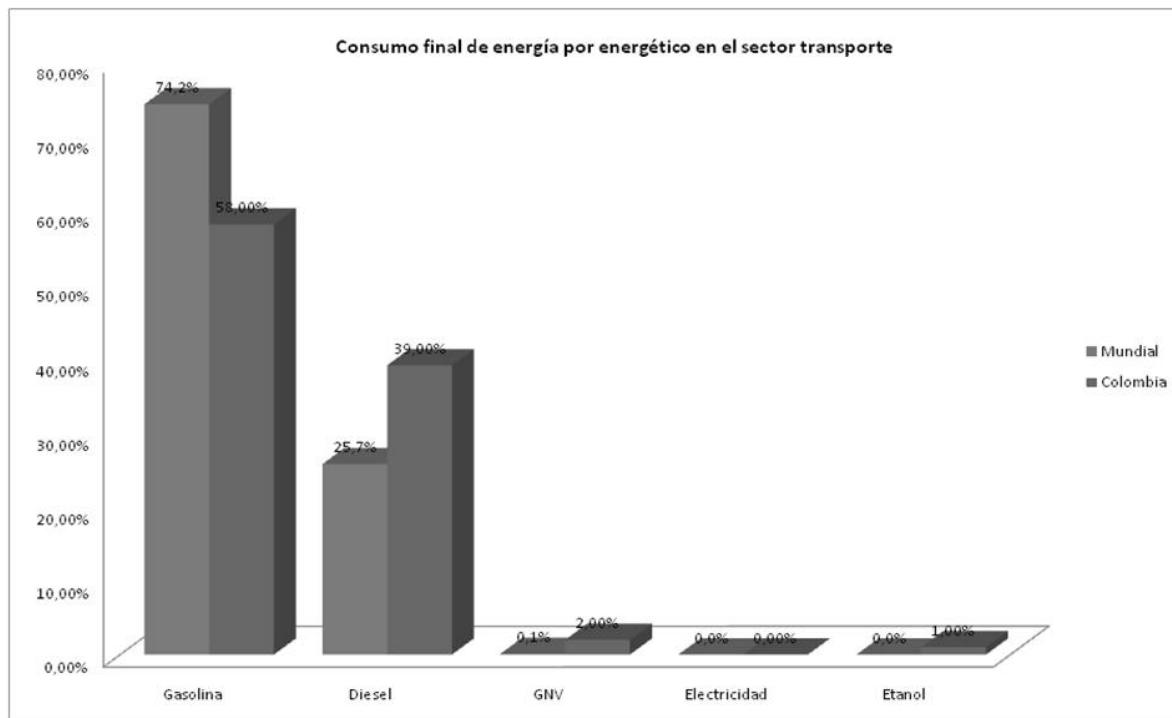


Figura 1. Consumo final de energía por energético en el sector transporte. Año 2005

Partiendo de estas cifras y de la actual problemática de penetración de fuentes alternativas de energía en el mercado vehicular colombiano, es que se concentra en la meta de desarrollar un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas. Este modelo considera variables tales como precio del vehículo, impuestos, incentivos, índice de volatilidad, producción del energético, inversión y desarrollo de las tecnologías alternativas, precio de venta del energético, facilidad de almacenamiento y otros. El modelo facilita la obtención de proyecciones de consumo para cada fuente de energía y el análisis de la variación de políticas de consumo. El modelo considera las fuentes de abastecimiento y la demanda para cada tecnología.

Dentro del modelo se tienen 5 posibles fuentes de energía utilizables para el mercado vehicular particular colombiano: 1) gasolina, 2) diesel, 3) gas natural vehicular, 4) etanol y 5) electricidad. No se tienen en cuenta otras fuentes como las celdas de combustible o el hidrógeno por ser fuentes alternativas escazas o nulas dentro del país. Se desarrolla en el marco colombiano con el fin de reducir el alcance del mismo. Además es importante recalcar que los datos parten de vehículos particulares y no tienen en cuenta datos de vehículos de transporte público o carga.

III. OTROS MODELOS

En la literatura y en las bases de datos investigativas se lograron encontrar varias simulaciones desarrolladas por

entidades gubernamentales y privadas [6], con el objetivo de explicar también una posible penetración de fuentes alternativas en el sector automotor, pero quizás en otros contextos, sectorizados en algún país o algún problema específico. Por mencionar, tenemos ADVISOR (ADvanced VehIcle SimulatOR) que es un modelo de simulación avanzado de vehículos desarrollado por el NREL (National Renewable Energy Laboratory) que permite el análisis, el estudio y la posible «comercialización» de vehículos a nivel sistemático con fuentes convencionales y alternativas. Es ideal para hacer estudios paramétricos de diseño debido a su alta velocidad de ejecución (MATLAB / Simulink) y su entorno de programación abierto. Actualmente lo usan más de 20 organizaciones y por medio de validaciones de usuarios realizadas en varias universidades la herramienta se alimenta y se afina cada vez más a nivel de componentes.

IV. SUPUESTOS DEL MODELO

Para la elaboración del modelo propuesto se parten de los siguientes supuestos

- Los datos son tomados de patrones y referencias colombianas. Las principales fuentes de referencia son: UPME, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Transporte, EIA (Energy International Agency).
- El modelo se plantea para un tiempo de 15 años.
- El nicho del mercado a modelar es el de vehículos particulares, que representan el 50% del total de vehículos según el Ministerio de Transportes.

- Las preferencias por escoger una tecnología i en particular son iguales para todos los individuos. Todos los individuos tienen el mismo peso en las preferencias: estaciones de servicio, cantidad de vehículos, inversión inicial y precio del vehículo. Esto significa que todos los individuos les dan el mismo valor a cada una de las preferencias al momento de escoger. Se parte de los principios del mercado de la demanda.
- Los vehículos con fuente energética diesel y con fuente energética electricidad no podrán reconvertirse debido a sus altísimos costos de reconversión. Estos vehículos estarán destinados a seguir con estas fuentes energéticas por el transcurso de la vida útil del vehículo.
- Los vehículos con fuente energética: gas natural, etanol y electricidad la tasa de obsolescencia, es decir el proceso de chatarrización de un vehículo es de 0 debido a que la tasa de obsolescencia es de 30 años y como el modelo está diseñado a 15 años aun no logran chatarrizarse.
- Existe un modelo de toma de decisiones que hará dos cosas: 1) cuantos vehículos se reconvierten de una fuente energética i a una fuente energética j. 2) cuantos vehículos ingresan nuevos a una fuente energética i.

V. MODELO DE TOMA DE DECISIONES

El modelo Logit es un modelo de toma de decisiones, en donde se evalúan los costos anuales (o mensuales) equivalentes de las tecnologías y por medio de estos se puede determinar los porcentajes de aceptación de las mismas ante un decisor determinado [7], este modelo es probablemente el más ampliamente utilizado en aplicaciones prácticas [8]. La ecuación del modelo Logit se muestra a continuación:

$$PE_i = \frac{\sum_i AEC^{\gamma}}{\sum_j AEC_j^{\gamma}} \quad \text{donde } i,j=1,2,\dots,k \quad (1)$$

PE_i = Probabilidad de seleccionar la fuente energética i.

i: Tecnología.

AEC_i: Atributos: precio, color, estatus, moda, tamaño, etc.

γ : Factor gamma, sensibilidad a los cambios en los atributos.

De la ecuación (1) se puede apreciar que la fuente energética se escoge según sea la magnitud de sus atributos comparados con los de las demás fuentes energéticas. En nuestro caso los atributos escogidos son: # de estaciones de servicio, precio del energético, precio reconversión o precio del vehículo, # de vehículos de la fuente energética i. Es por esta razón que la probabilidad de escogencia dependerá de 3 parámetros y una relación de causa. Así por ejemplo a un valor inferior en el precio del energético i mayor será la probabilidad de escogencia del energético i.

El valor del parámetro gamma es fundamental en los resultados del modelo. Es así como, valores de gamma superiores a uno favorecerán la selección de tecnologías más baratas en una proporción mayor que la simple división entre la sumatoria de los atributos de la fuente energética i y la sumatoria de los atributos de la fuente energética j. De lo anterior se puede derivar que un gamma infinito produciría un efecto similar a de optimización, en donde la tecnología más barata tendría una probabilidad de 1 de ser escogida. Similarmente, valores de gamma inferiores a 1 aumentarían las probabilidades de escogencia de las fuentes energéticas más costosas, y valores de gamma negativos, favorecen las tecnologías costosas en detrimento de las más baratas.

VI. MODELO

En la Figura 2 se observan los supuestos y las variables del modelo en sus relaciones causales. Se observan varios ciclos de refuerzo, balance. Los ciclos R1, R2 y R3 exponen la forma en que los vehículos abandonan una cierta tecnología i para ingresar a otra tecnología j o para salir definitivamente del sistema. La forma de salir del sistema es por chatarrización o accidentes.

Existen dos formas de ingresar al sistema, comprando un nuevo vehículo o reconvertiendo un vehículo con una fuente energética i a una fuente energética j. La decisión de comprar o reconvertir un vehículo a una fuente energética i se evalúa a partir de un Modelo Logit de toma de decisiones donde se evalúan los atributos: cantidad de estaciones de servicio con el energético i, cantidad de vehículos con el energético i, precio de reconversión al energético i, precio del vehículo i. El Modelo Logit expone cuantos vehículos salen de cierta tecnología i para ingresar a otra tecnología j (reconversión) y cuantos vehículos son comprados nuevos de cierta tecnología i.

Una de las principales barreras es el dilema de las estaciones de servicio limitadas, en el modelo existe una relación de causalidad lo que demuestra que entre más vehículos adopten cierta fuente energética i deberán construirse más estaciones de servicio con el energético i.

Como antes se mencionaba existen 6 barreras en la penetración de fuentes alternativas de energía en el mercado vehicular. En el modelo se tienen presentes 3 de ellas: precio del vehículo, costo del energético y cantidad de estaciones de servicio. Las demás barreras se tendrán en cuenta en trabajos futuros.

El gas natural empieza la carrera de adopción de nuevos vehículos, su gran beneficio de precio comparado con otras fuentes energéticas y su relación de estaciones de servicio actual da la seguridad de ser una fuente energética que tendrá mucha parte del mercado en el mediano plazo. La posibilidad de tener las dos fuentes energéticas en un solo vehículo: gasolina y gas natural vehicular impulsa de manera fuerte la escogencia de dicha combinación por parte de la demanda [9].

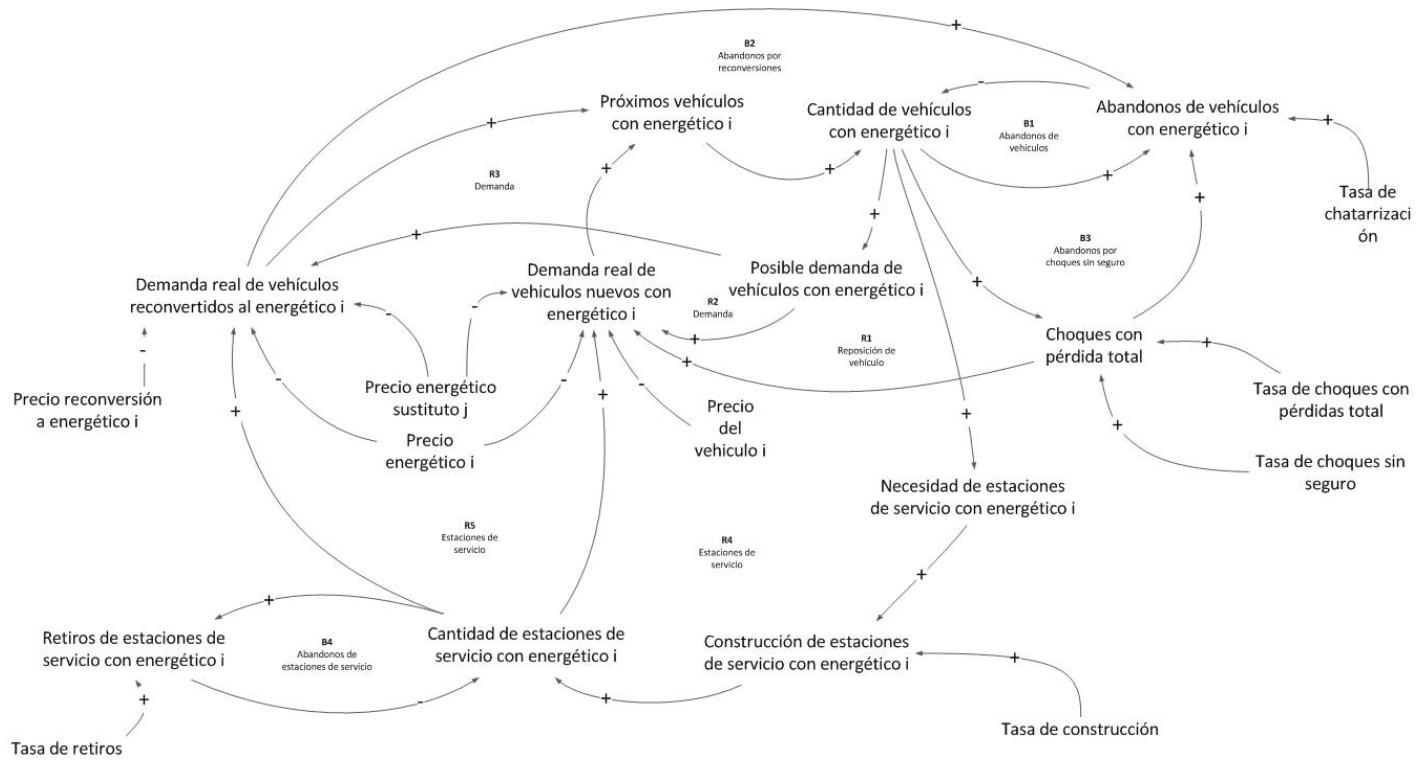


Figura 2. Diagrama causal del Modelo propuesto

El etanol E85 (85% Etanol, 15% Gasolina) será sin lugar a dudas un buen competidor de las actuales fuentes de energía vehicular. Su relación costo del energético, estaciones de servicio y costo de la reconversión dan un gran beneficio al cliente [5]. Como resultado al cabo de 15 años dicha tecnología estaría en el segundo lugar como segmento del mercado particular colombiano.

Los carros híbridos con motor de gasolina y electricidad por ahora y a mediano plazo no invadirán en gran medida el mercado particular colombiano, esto debido al gran costo de compra del vehículo y su pequeña o incluso inexistente base de estaciones de servicio que soporten la cantidad de vehículos de dicha tecnología en el mercado. Sin embargo no deja de ser una fuente energética muchísimo más limpia, con menos emisiones de efecto invernadero pero de la cual hace mucha más investigación y desarrollo para romper barreras de penetración en el mercado [10].

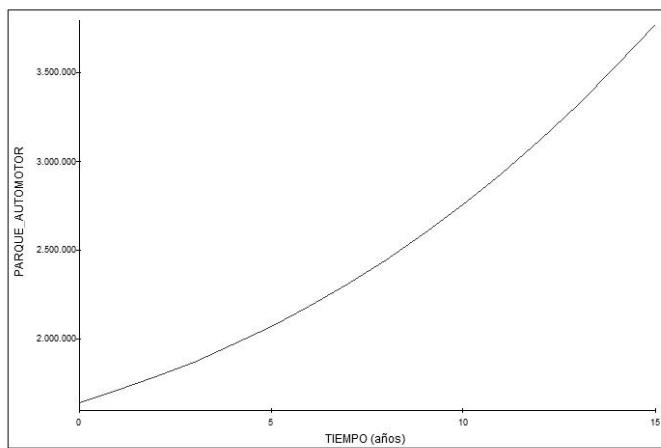


Figura 3. Crecimiento del parque automotor particular colombiano en los próximos 15 años

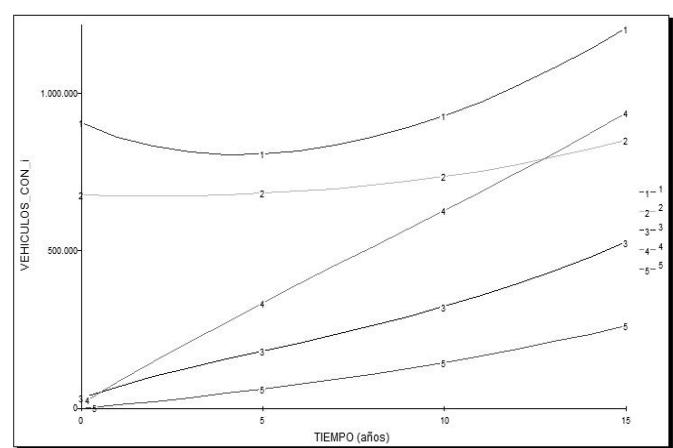


Figura 4. Cantidad de vehículos por cada fuente energética i al cabo de 15 años.

VIII. ESCENARIOS

A. *Masificación del GNV*

El escenario planteado es mirar cómo se puede conseguir mayor incursión del gas natural vehicular en el mercado particular colombiano. A continuación se plantea el siguiente escenario.

La Figura 5 está planteada sobre las hipótesis teóricas de:

1. Un subsidio por parte del estado o de entes privados para que la reconversión de vehículos de otras fuentes energéticas a al gas natural tenga un precio de \$1.500.000 en total (incluyendo financiación y cuota inicial).
2. La cantidad de estaciones de servicio de gas natural vehicular son iguales a las de gasolina y diesel o se pueden complementar las estaciones de servicio actual para que también vendan gas natural vehicular.

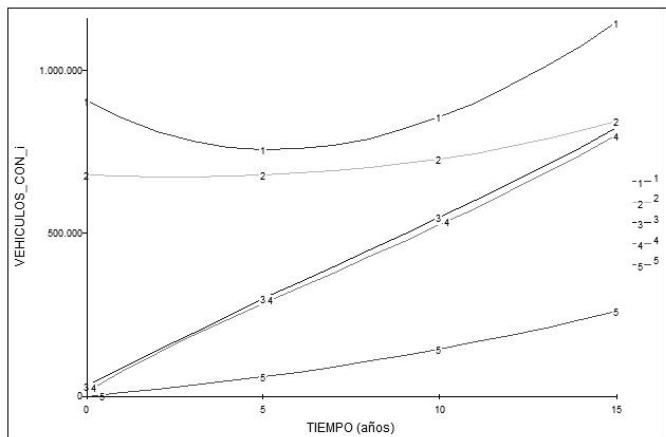


Figura 5. Posible apalancamiento del gas natural vehicular en el mercado de vehículos particulares en Colombia

Partiendo de estas dos hipótesis teóricas es que se logra observar que el mercado vehicular particular colombiano se apoya sobre las fuentes energéticas diesel, gas natural y biocombustibles, metas a mediano plazo del Ministerio de Minas y Energía.

B. *Posible apalancamiento del vehículo híbrido gasolina-electricidad*

El escenario planteado es mirar cómo se puede conseguir mayor incursión del vehículo híbrido gasolina-electricidad en el mercado particular colombiano. A continuación se plantea el siguiente resultado.

En la Figura 6 se plantea sobre las siguientes hipótesis teóricas:

1. Se logra encontrar a nivel mundial una forma de enchufar dichos vehículos en la corriente eléctrica tradicional. La

conexión sería de bajo costo al igual que la captación de energía sería baja pero útil. Esto lleva al aumento de las «estaciones de servicio» posibles para dicha fuente energética.

2. Se logra reducir los costos de fabricación de los vehículos híbridos gasolina-electricidad consiguiendo un consumo a economías de escala, se logra por lo tanto una reducción en el precio del vehículo; se podría dar también una reducción en el precio por rebaja de aranceles o por subsidios a los mismos.

Si se parten de estas dos hipótesis teóricas es posible una mayor penetración del vehículo gasolina-electricidad dentro del mercado vehicular particular colombiano.

IX. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

A partir del modelo propuesto se da razón a las tantas iniciativas de los gobiernos de todo el mundo por apuntar a la fuente energética Etanol como principal fuente energética para el sector vehicular. Es evidente que la dependencia de los derivados del petróleo seguirá por más de 20 años, sin embargo poco a poco se va abriendo la brecha para la incursión de estas nuevas alternativas de energía.

Otro aspecto importante es el gran nicho de mercado que el gas natural está adquiriendo en los últimos años y que se corrobora en el modelo propuesto. Sin embargo cabe resaltar que la incursión tiene un límite actual y este es la cantidad de reservas de gas en Colombia.

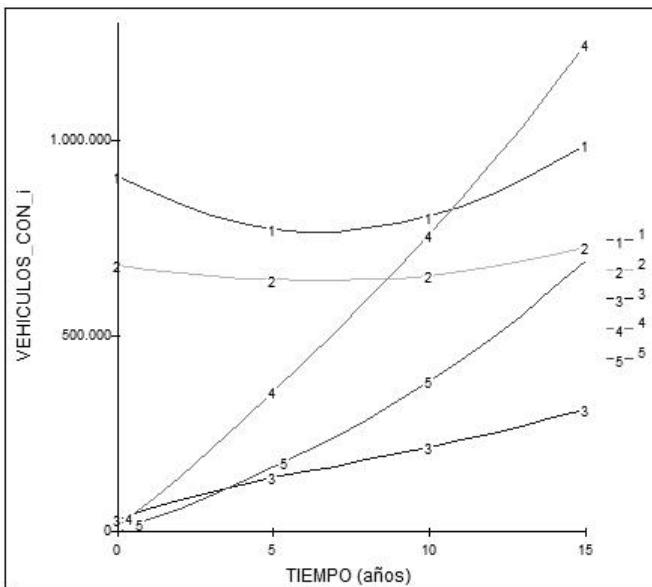


Figura 6. Posible apalancamiento del vehículo híbrido gasolina-electricidad en el mercado de vehículos particulares en Colombia

Como trabajo a futuro se tienen los siguientes desarrollos:

- Modelar la variable precio del vehículo y costo del energético para que dependan de la cantidad de vehículos y de las reservas probadas del energético i y así se obtenga un modelo que considera las curvas de aprendizaje.
- Hacer mediciones de preferencias de los usuarios en el momento de compra o reconversión de un vehículo.
- Reevaluar el modelo propuesto para datos de otros países y así descubrir nuevas relaciones de causalidad dentro del proceso colombiano.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, 2005. World Energy Outlook. Available: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/weo2005.pdf> [citado 12 de Junio de 2008]
- [2] International Energy Agency, 1999. World Energy Outlook Available: www.iea.org/dbtw-wpd/textbase/nppdf/free/1990/weo1999.pdf [citado 12 de Junio de 2008]
- [3] Romm J., 2006. The car and fuel of the future. En: Energy Policy, vol. 34, No. 17, pp. 2609-2614.
- [4] The DOT Center for Climate Change & Environmental Forecasting. Fuel Options for Reducing Greenhouse Gas Emission from Motor Vehicles. Available: <http://climate.dot.gov/publications/docs/fuel.pdf> [citado 12 de Junio de 2008].
- [5] Vesselina P., Acevedo C. A. y Lopez C. A., 2004. El biodiesel a partir de aceites vegetales: una fuente de nuevas bioindustrias. En: TECNO LÓGICAS, vol. 0, No. 14.
- [6] National Renewable Energy Laboratory. Vehicle Systems Analysis. Available: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/vsa/related_links.html [citado 12 de Junio de 2008]
- [7] Franco, C. J., 2002. Racionalidad limitada del consumidor en mercados energéticos desregulados y la función del comercializador y el gobierno [PhD Thesis]. Universidad Nacional.
- [8] Bierlaire M., 1998. Investigating Consumers' tendency to combine multiple shopping purposes and destinations. En: Journal of Marketing Research, vol. 35, No. 2, pp. 177-188.
- [9] Giraldo Ó. de J., 2004. Reconversión de vehículos de transporte público a GNV y contaminación en Medellín. ¿Una solución viable? En: Tecnológicas. ITM. Edición No. 13, 43 P.
- [10] Anderson C. y Anderson J., 2004. Electric and Hybrid Cars: A History, McFarland & Company.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Facultad de Minas



Misión

Ofrecer servicios de apoyo a la docencia en cuanto a la operación de los computadores y del software adecuado con miras al desarrollo integral de los futuros ingenieros.

Visión

Avanzamos en la búsqueda de convertir el Laboratorio de Sistemas e Informática en una dependencia ágil, moderna, facilitadora de procesos y cambios, atenta a las necesidades de otras dependencias de la Universidad, cuya labor apoyamos y articulamos. Serviremos con dinamismo, amabilidad y efectividad a todos los integrantes de la comunidad universitaria y a la sociedad en general. Uniremos esfuerzos para construir un ambiente de trabajo cada vez más positivo que propicie la participación, la creatividad y el desarrollo profesional de los integrantes del equipo de trabajo. Propendemos por un Laboratorio como instrumento gestor y generador de proyectos de investigación sustentado en un equipo interdisciplinario de trabajo en torno a la informática aplicada a la ingeniería.

Cursos

- Lenguajes de Programación Diseño de Páginas Web en ASP.NET con VB.NET, Programación Web PHP y MYSQL, MS-Visual Basic Básico y Avanzado, Java
- Generales Latex, ARCGIS, MS-Office (Word, Excel y PowerPoint), Excel Financiero, Excel Avanzado, Mantenimiento de Hardware y Software Niveles I y II, MS-Access Básico, MS-Project Básico (Programación y Gerencia de Proyectos), AUTOCAD 2D Básico y 3D, Matlab, Moodle de Apoyo a los Procesos de Enseñanza y Aprendizaje.

Para mayor información, por favor comunicarse a los teléfonos: 4255313, 4255312, 4255355. Calle 59A No. 63 – 020 Medellín (Colombia), Bloque M7, quinto piso.

Email: labsis@unalmed.edu.co

<http://xue.unalmed.edu.co/cursos>

