

Desarrollo de un modelo para la evaluación de alternativas de transporte particular sostenible en la ciudad de Bogotá

ANDRÉS RÍOS¹

EDWIN RODRÍGUEZ²

MAURICIO RAMÍREZ³

JORGE E. PACHÓN⁴

RESUMEN

Actualmente el sistema de transporte vehicular mundial está basado en el motor de combustión interna caracterizado por su uso ineficiente de la energía y las continuas emisiones de gases contaminantes a la atmósfera que disminuyen la calidad del aire y afectan la población y el ambiente. Sin embargo, en los vehículos particulares existen tecnologías alternativas que ofrecen ventajas tanto económicas como ambientales que están en capacidad de entrar en el sistema de transporte nacional. Este artículo evalúa y analiza esas alternativas para el sistema de vehículos particulares en la ciudad de Bogotá, a partir de un modelo lineal. El modelo compara las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, consumo energético, autonomía y costos asociados de cuatro tecnologías diferentes (automóvil eléctrico, híbrido, hidrógeno y convencional de gasolina), con el objetivo de evidenciar los puntos más críticos de cada tecnología y definir la mejor alternativa para un posible comprador y un futuro modelo de transporte particular en el distrito capital. Se encontró que existen alternativas con el potencial de disminuir el impacto ambiental y en la salud asociadas al uso del vehículo convencional, dichas opciones tienen también el potencial de mitigar la dependencia del precio y la disponibilidad del petróleo a unos costos que soportan la viabilidad de una futura transición de tecnologías.

Palabras clave: modelo, vehículo, emisiones contaminantes, eficiencia energética, tecnologías.

¹ Ingeniero, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Especialista en Instrumentación y Automatización de Procesos. Especialista en Gestión Energética y Ambiental, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Estudiante de Energías Renovables y Desarrollo Sostenible de la Universidad de Reading, Reino Unido. Correo electrónico: andresrios12@gmail.com

² Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Especialista en Gestión Energética y Ambiental, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: edwinrodriguez@gmail.com

³ Ingeniero industrial, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. Estudiante de Gestión Energética y Ambiental, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: mauro449@hotmail.com

⁴ Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jpachon@unisalle.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 25 DE ENERO DE 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 20 DE ABRIL DE 2013

Cómo citar el artículo: Ríos, A.; Rodríguez, E.; Ramírez, M. y Pachón, J. E. (2013). Desarrollo de un modelo para la evaluación de alternativas de transporte particular sostenible en la ciudad de Bogotá. *Épsilon* (20), 121-143.

Development of a Model to Assess Sustainable Private Transport Alternatives in Bogota

ABSTRACT

Currently, the world's vehicle transportation system is based on the internal combustion engine, characterized by its ineffective use of energy and constant emission of polluting gases into the atmosphere, decreasing the quality of air and affecting the population and the environment. However, private transport offers alternative technologies that have both economic and environmental advantages capable of entering the national transportation system. The present article assesses and analyzes these alternatives for the private transport system in Bogota, based on a linear model. This model compares the emission of polluting and greenhouse gasses, energy consumption, autonomy and associated costs of four different technologies (electric, hybrid, hydrogen and conventional fuel cars) in order to highlight the most critical aspects of each technology and define the best alternative for potential buyers and a future model of private transport in the capital city. Results show that there are alternatives capable of decreasing the environmental and health impacts associated to the use of conventional vehicles; said options also have the potential to mitigate the dependence on price and availability of oil at a cost that supports the feasibility of a future technology transition.

Keywords: Model, Vehicle, Polluting Emissions, Energy Efficiency, Technologies.

Desenvolvimento de um modelo para a avaliação de alternativas de transporte particular sustentável na cidade de Bogotá

RESUMO

Atualmente o sistema de transporte veicular mundial está baseado no motor de combustão interna caracterizado por seu uso ineficiente da energia e as contínuas emissões de gases contaminantes à atmosfera que diminuem a qualidade do ar e afetam a população e o ambiente. Porém, nos veículos particulares existem tecnologias alternativas que oferecem vantagens tanto econômicas quanto ambientais que estão em capacidade de entrar no sistema de transporte nacional. Este artigo avalia e analisa essas alternativas para o sistema de veículos particulares na cidade de Bogotá, a partir de um modelo lineal. O modelo compara as emissões de gases contaminantes e de efeito estufa, consumo energético, autonomia e custos associados de quatro tecnologias diferentes (automóvel elétrico, híbrido, hidrogênio e convencional a gasolina), com o objetivo de evidenciar os pontos mais críticos de cada tecnologia e definir a melhor alternativa para um possível comprador e um futuro modelo de transporte particular no distrito capital. Comprovou-se que existem alternativas com o potencial de diminuir o impacto ambiental e na saúde associadas ao uso do veículo convencional, estas opções têm também o potencial de mitigar a dependência do preço e a disponibilidade do petróleo a uns custos que suportam a viabilidade de uma futura transição de tecnologias.

Palavras chave: modelo, veículo, emissões contaminantes, eficiência energética, tecnologias.

Introducción

A nivel mundial, el 95 % de los vehículos hacen uso de combustibles fósiles convencionales como la gasolina y el diesel para poder desplazarse (Black, 2010). En el año 2011 esta actividad caracterizada por el uso ineficiente de la energía contribuyó con el 23 % de contaminación del aire a nivel mundial, calculado en 49.000 millones de toneladas de CO₂ al año adicionales a la emisión de gases contaminantes como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos totales (THC), entre otros (IEA, 2012). Dentro de la problemática que presenta este tipo de contaminantes se evidencian complicaciones de salud en las personas, como el caso del CO que se refleja en enfermedades cardiovasculares, interfiere con las capacidades cognitivas, disminuye la capacidad laboral y afecta la visión (Black, 2010). Los NO_x promueven cambios en la función pulmonar y un aumento en la resistencia de las vías aéreas, también se consideran otros posibles efectos relacionados con cambios inmunológicos, adicionalmente son los causantes del *smog* fotoquímico (Black, 2010). Los THC se asocian con irritación de ojos, nariz y garganta, dolores de cabeza, náuseas, y en tiempo prolongado de exposiciones es causante de daño en los riñones e incluso cáncer (Colman *et al.*, 2012).

Los países en desarrollo, y en particular la región de Latinoamérica, en medio de su crecimiento económico, demandan intensamente el uso de vehículos privados basados en combustibles tradicionales (Sivak y Tsimhoni, 2008; Sivak, 2013; Binsted, 2012) siendo estas las fuentes de contaminantes de mayor crecimiento anual (The World Bank, 2012). Colombia hace parte de esta tendencia que incrementa la dependencia de fuentes fósiles y las emisiones de gases contaminantes producto de un sistema de transporte insostenible.

En Colombia, los efectos negativos en la salud relacionados con la degradación ambiental son superiores a los de otros países con niveles de ingresos similares, y se calcula que la contaminación del aire urbano debido a actividades antropogénicas, entre ellas el transporte, causan alrededor de 6000 muertes prematuras, 7400 nuevos casos de bronquitis crónicas y 13.000 hospitalizaciones anuales (Sánchez, 2011). Las consultas externas y de urgencias por este motivo ascienden a 255.000 anuales. En términos económicos la contaminación del aire urbano le cuesta a la nación el 0,8 % del Producto Interno Bruto (PIB) que se cuantifica en 1500 miles de millones de pesos anuales (Sánchez, 2011) lo que es una limitante para el desa-

rollo del país, y una evidencia de que existe una relación directa entre el deterioro ambiental y el aumento de la pobreza (DNP, 2010).

La ciudad de Bogotá aporta el 27 % del PIB nacional, con un crecimiento en promedio de 4,5 % en los últimos 7 años (Centro de Estudios, 2013), esta tendencia ubica a la capital como la octava economía urbana en América Latina (CCB, 2013). Para el año 2013 cuenta con una población de aproximadamente 7'300.000 habitantes dividida en 52 % mujeres y 48 %, hombres con una edad media relativamente joven de 29,5 años (DANE, 2011). A nivel de Latinoamérica, la capital colombiana es la tercera ciudad con mayores problemas de contaminación atmosférica junto con ciudad de México y Santiago de Chile (Maggiora y López, 2006). Bogotá emite cerca de 11 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) al año entre fuentes móviles y fijas (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010). De esta cifra, en el 2008 el transporte terrestre fue responsable de la emisión de cerca 5 millones de toneladas de CO_2 , 450.000 toneladas de CO, 30.000 toneladas de NO_x y 60.000 toneladas de THC (Hernández y Jiménez, 2010; Rodríguez y Behrentz, 2009), generadas por el movimiento de 1,2 millones de vehículos automotores de los cuales casi el 80 % corresponden a vehículos de uso privado que se alimentan con gasolina (Rodríguez y Behrentz, 2009).

Para el periodo 2008-2012 el número de vehículos particulares (NVP) aumentó de 915.647 a 1.289.495 unidades (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010), lo que se traduce en 177 vehículos por cada 1000 habitantes. Es importante destacar que la totalidad de los vehículos depende de fuentes fósiles y, por ende, no renovables como la gasolina y el gas natural (UPME, 2012) causantes de la contaminación ambiental y cuyo costo asociado tiene una tendencia al alza. Para el año 2004 el precio de un galón de gasolina oscilaba alrededor de 4400 pesos colombianos y para el año 2013 supera los 8200 (UPME, 2012); por su parte, el gas natural aumentó de 680 pesos por metro cúbico (normal) a 1499 para el mismo periodo (UPME, 2013).

Actualmente existen tecnologías alternativas a la combustión interna que ofrecen ventajas tanto económicas como ambientales, estas son: 1) el vehículo híbrido (eléctrico/gasolina), que combina un motor de gasolina (como generador) y baterías eléctricas alimentando un motor eléctrico; 2) el vehículo eléctrico, que hace uso de la carga eléctrica almacenada en un sistema de baterías recargables, y 3) el vehículo de hidrógeno cuyo funcionamiento consiste en la integración de un

motor eléctrico alimentado de una celda de hidrógeno que convierte este elemento en corriente eléctrica (Hernández y Jiménez, 2010; Cadena y Rosales, 2011). A nivel nacional ya existen algunas iniciativas de nuevas tecnologías para el sector transporte, llevadas a cabo por empresas de los sectores público y privado (Endesa, 2011); a nivel distrital la Alcaldía Mayor de Bogotá exonera del pago de aranceles a este tipo de automóviles respaldados por el Decreto 677 de 2011.

Este estudio plantea diferentes alternativas tendentes a disminuir la problemática del sistema de transporte. Se evalúan cuatro tecnologías de vehículos cuyos fabricantes y modelos existen o están siendo probados en el mercado nacional: 1) híbrido eléctrico/gasolina, 2) eléctrico, 3) hidrógeno y 4) combustión interna, por medio de la simulación de un modelo lineal, relacionando sus parámetros técnicos como el tipo de energía para desplazarse, rendimiento, costos y emisiones. Se encontró que existen alternativas con el potencial de disminuir el impacto ambiental y en salud asociado al uso de combustibles fósiles en vehículos, y de mitigar la dependencia de un modelo económico basado en el precio y la disponibilidad del petróleo.

Métodos

Para la evaluación de las diversas tecnologías con las que puede funcionar un vehículo se utiliza un modelo lineal que simula de forma simplificada el recorrido de un vehículo de pasajeros en movimiento en Bogotá. El modelo calcula valores como el consumo energético, la autonomía, el valor del recorrido y el impacto ambiental por contaminantes emitidos para cada tecnología, a partir de parámetros definidos por las fichas técnicas del vehículo simulado (tabla 1), y las variables de entrada definidas como la distancia recorrida, el valor de la energía y la duración de la simulación.

Entradas del modelo

Las entradas se definen como los valores que alimentan el modelo. Para el caso aquí descrito se dividen en dos grupos: Parámetros del vehículo y Variables del modelo.

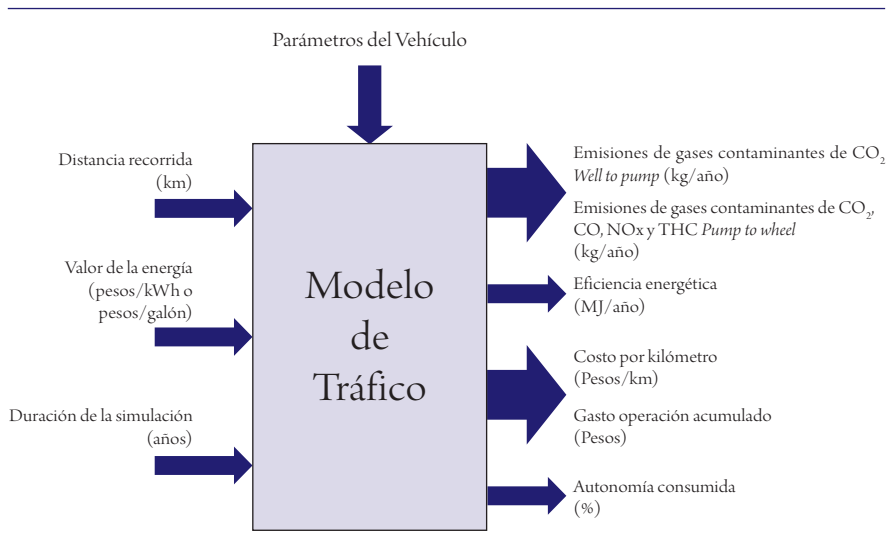


Figura 1. Diagrama del modelo

Fuente: elaboración propia.

Parámetros del vehículo

Los parámetros de vehículo son las características propias de su fabricación, por tanto, no se consideran modificables al momento de realizar la simulación. Los principales parámetros de los vehículos seleccionados son:

- Tipo de fuente de energía: esta puede ser de tres tipos dependiendo de la tecnología del vehículo por analizar (gasolina, energía eléctrica o hidrógeno).
- Tecnología del vehículo: esta se clasifican en cuatro tipos: motor de combustión interna, híbrido eléctrico/gasolina, baterías intercambiables, baterías eléctricas e hidrógeno gaseoso comprimido.
- Eficiencia equivalente (KPG_e): es el valor promedio de distancia recorrida por unidad de energía consumida.
- Eficiencia vehículo gasolina/eléctrico/hidrógeno: es el valor promedio de distancia recorrida por galón de gasolina, kilovatio de energía o kilogramo de hidrógeno consumido respectivamente.

- Rango máximo: este dato representa la distancia máxima a la que puede viajar un vehículo sin necesidad de realizar una nueva recarga de energía o llenado de combustible.
- Tiempo de recarga: este parámetro corresponde al tiempo que se demora la fuente en ser considerada como cargada al 100 %. En el caso del vehículo de combustión interna y de hidrógeno representa el tiempo en llenar el tanque de gasolina o gas según el caso, en un vehículo eléctrico es el tiempo de carga de las baterías.
- Emisiones *Well to pump* (desde el pozo hasta la estación de servicio): dependen del tipo de fuente que es necesaria para recargar el vehículo. Se consideraron dos casos, un primer caso se asocia con las emisiones de CO₂, en kg/galón para la extracción, producción y transporte del combustible fósil desde el pozo hasta la estación de servicio. Un segundo caso son las emisiones de CO₂ kg/kWh para la producción y el transporte de la energía eléctrica (Ministerio de Minas y Energía, 2010).
- Emisiones *Pump to wheel* (desde la estación de servicio hasta el funcionamiento del vehículo): obedece al tipo de tecnología asociada al vehículo. Estas emisiones son los gases que producen los vehículos al realizar su recorrido. En el modelo estas emisiones se asocian solamente al motor de combustión interna y al vehículo híbrido en kilogramos de CO₂, CO, NOx y THC por kilómetro recorrido (Rodríguez y Behrentz, 2009).

Variables del modelo

Las variables se definen como el valor numérico de las entradas que no son constantes, y pueden ser modificadas para arrojar resultados del modelo que aporta a las conclusiones de la simulación.

- Distancia recorrida: se establece como el recorrido promedio del vehículo en kilómetros por día. Se seleccionó un valor promedio de 30 km/día por vehículo, que equivale a 10.950 km/año (Rodríguez y Behrentz, 2009).
- Valor de la energía: está asociada con el precio en Colombia del tipo de fuente de energía que utiliza el vehículo durante el tiempo de la simulación, desde el

año 2013 hasta el 2023. El valor estimado de la gasolina es tomado de reportes de entes oficiales (UPME, 2012) mientras que el valor de la electricidad se extrapola a partir de datos históricos de precios de energía eléctrica (kWh) dados por Codensa para el estrato 4 en Bogotá (UPME, 2013).

- Duración de la simulación: es el tiempo de prueba del vehículo de diez años, desde el año 2013 hasta el 2023.

Salidas del modelo

Las salidas son el resultado del modelo al elegir unos parámetros y definir los valores de las variables de entrada.

- Emisiones de gases contaminantes de CO₂ en kg *well to pump* por año: representan las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de energía que consumirá cada vehículo para realizar el trayecto determinado.
- Emisiones de gases contaminantes de kg CO₂, CO, NO_x y THC *pump to wheel*: para el vehículo de motor de combustión interna son las emisiones de contaminantes por kilómetro multiplicadas por la distancia total recorrida. Para el caso del vehículo eléctrico y de hidrógeno no aplica.
- Eficiencia energética: corresponde al consumo energético en MJ/año de combustible fósil o kilovatios-hora que necesitó el vehículo para recorrer la distancia definida.
- Autonomía: representa el tiempo que debe ser recargada la fuente energética del vehículo para cumplir con el trayecto establecido. Puede leerse también como el porcentaje del tiempo que el vehículo no estará disponible por encontrarse en fase de carga.
- Costos: es el precio del combustible o la tarifa eléctrica para el periodo seleccionado. Para realizar el análisis de los gastos acumulados y costos por kilómetro es necesario evidenciar que no fueron asumidos los costos por mantenimiento y reparaciones de los automóviles a lo largo de su vida útil.

Los costos se dividen en:

- Costo por kilómetro: es el costo en pesos colombianos del combustible o energía utilizada dividido por el total de kilómetros del recorrido simulado.
- Gasto operación acumulada: representa la suma del valor de la gasolina o energía eléctrica consumida a lo largo de los diez años más el costo de operación.

Tabla 1. Parámetros de los vehículos

REFERENCIA	VEHÍCULO HÍBRIDO	VEHÍCULO ELÉCTRICO	VEHÍCULO DE HIDRÓGENO	VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN INTERNA
Potencia del motor	149 hp	110 hp	134 hp	138 hp
No. puertas y pasajeros	5 / 4	5 / 4	5 / 4	5 / 4
Precio (mercado Estados Unidos)	US\$36.145	US\$26.986	Sin información	US\$19.000
Tipo de fuente de energía	Eléctrica/Gasolina	Eléctrica	Hidrógeno celda PEM (i)	Gasolina corriente
Tecnología del vehículo	Eléctrico/Gasolina / Híbrido baterías gasolina	Eléctrico de baterías	Hidrógeno gaseoso comprimido	Motor de combustión interna
Eficiencia equivalente (a)	156,8 KPGe	158 KPGe	96 KPGe	50,7 KPGe
Eficiencia gasolina	59,2 km/gal (e)	No aplica	No aplica	50,7 km/gal (b)
Eficiencia eléctrico	4,7 km/kW (e)	4,7 km/kW (h)	No aplica	No aplica
Eficiencia hidrógeno	No aplica	No aplica	96 km/kg (i) (j)	No aplica
Rango máximo	608 km (e)	117 km (h)	384 km (i)	673 km (b)
Tiempo de recarga de la fuente energética	0,15 h / 7 h (e)	7 h (h)	0,15 h	0,15 h (c)
Emisiones CO ₂ <i>well to pump</i> gasolina (d)	2,17 kg CO ₂ /gal	No aplica	No aplica	2,17 kg CO ₂ /gal
Emisiones CO ₂ <i>well to pump</i> generación eléctrica (f)	0,285 kg de CO ₂ /kWh	0,285 kg de CO ₂ /kWh	0,285 kg de CO ₂ /kWh	No aplica

REFERENCIA	VEHÍCULO HÍBRIDO	VEHÍCULO ELÉCTRICO	VEHÍCULO DE HIDRÓGENO	VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN INTERNA
Emisiones CO ₂ <i>pump to wheel</i>	50 g CO ₂ /km (e)	No aplica	No aplica	153 g CO ₂ /km (b)
Emisiones CO <i>pump to wheel</i>	0,5 g CO/km (e)	No aplica	No aplica	1 g CO/km (b)
Emisiones NOx <i>pump to wheel</i> (g)	0,63 g NOx/km (g)	No aplica	No aplica	0,7 g NOx/km (g)
Emisiones THC <i>pump to wheel</i> (g)	0,81 g THC/km (g)	No aplica	No aplica	0,9 g THC/km (g)
Velocidad promedio	30 km/h	30 km/h	30 km/h	30 km/h
Valor de la galón de gasolina	(Tarifa 2013-2023)	no aplica	no aplica	(Tarifa 2013-2023)
Valor del kilovatio-hora	Tarifa estrato 4 (2013-2023)	Tarifa estrato 4 (2013-2023)	Tarifa estrato 4 (2013-2023)	No aplica
Duración de la simulación	10 años	10 años	10 años	10 años

- a) KPG: kilómetros por galón equivalente.
- b) Información consultada en página web (<http://www.car-emissions.com/cars/view/45203>).
- c) Tiempo promedio que se demora en llenar un tanque de gasolina de 11 galones de capacidad máxima.
- d) Transportation Research Focuses on DOE's Energy Resources Goals (<http://www.veva.bc.ca/wtw/index.htm>).
- e) Información consultada con el fabricante (<http://www.chevrolet.com/volt-electric-car/>).
- f) Resolución 180947 del 2010, el factor de emisión de gases de efecto invernadero para generación eléctrica en Colombia es 0,2849 Kg CO₂/KW-h.
- g) Rodríguez (2009). Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. Tabla 3. Factores de emisión para los vehículos de carga liviana.
- h) Información consultada con el fabricante (<http://nissan-leaf.net/2010/11/23/epa-rates-the-2011-nissan-leaf-a-99-mpg>).
- i) Información consultada con el fabricante (<http://www.hydrogen-motors.com/honda.html>) (<http://automobiles.honda.com/fcx-clarify/specifications.aspx>).
- j) Se asume generación de hidrógeno por medio de electrolisis considerando 70kW-h necesarios para generar 1 kg de hidrógeno. Fuel-Cell Vehicles: Stephen S. Eaves April 7, 2003. (www.veva.bc.ca/wtw/EAVES_BEV_VS_FCV%20040703.pdf)
- k) Para el precio de los vehículos en pesos colombianos se multiplica por \$1800 COP.

Resultados y análisis de resultados

Impacto ambiental

Para los resultados de la emisión de CO₂ fueron consideradas las emisiones de dos fases independientes: WTP (*well to pump*) y PTW (*pump to wheel*), la suma

de estos dos valores considerados a lo largo del funcionamiento del vehículo son las emisiones totales de cada tecnología, indicadas como *well to wheel* por año.

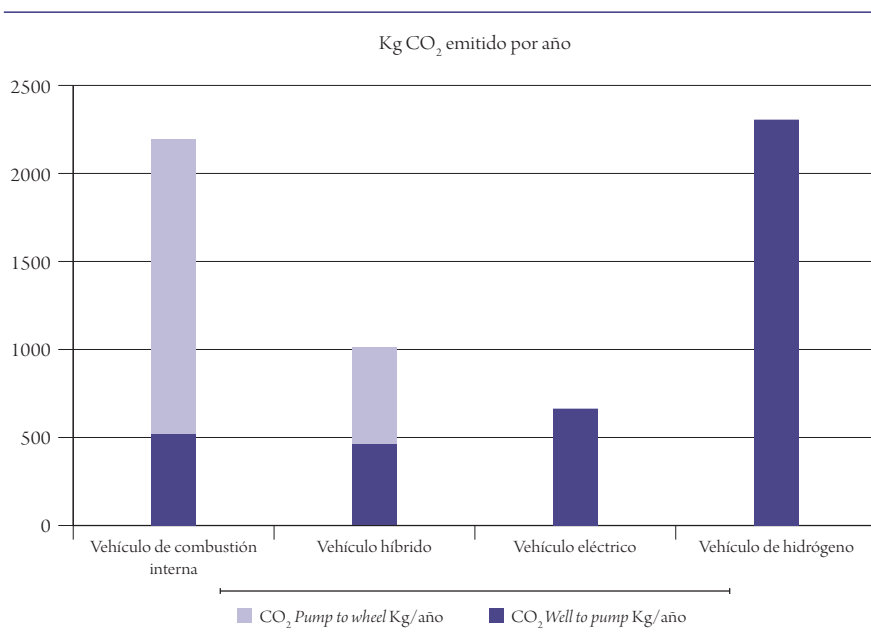


Figura 2. Emisión total de CO₂ según la tecnología del vehículo

Las emisiones totales de CO₂ son más altas en el vehículo de combustión interna y automóvil con celda de hidrógeno, aunque por motivos disímiles. La mayor proporción de las emisiones para el vehículo de combustión interna son el resultado de la fase de operación mientras se moviliza a lo largo del trayecto.

En el caso del vehículo de hidrógeno, por el contrario, no hay emisiones de CO₂ mientras se moviliza a lo largo del trayecto; sin embargo, la obtención del hidrógeno como fuente de energía para el vehículo por medio de electrolisis demanda altos consumos, lo que se traduce en altas emisiones de CO₂ asociadas a la generación eléctrica (Ministerio Minas y Energía, 2010). Si se compara el efecto agregado de esta tecnología, bajo el desarrollo alcanzado en la actualidad, no se presenta una reducción de emisiones de gases (Eaves y Eaves, 2003).

Por otro lado, los vehículos híbrido y eléctrico presentan una emisión menor a una tonelada de CO₂/año. Para el automóvil eléctrico y de hidrógeno las emisiones se dan en el proceso de generación de energía eléctrica y no existen emisiones

asociadas a su uso. Sin embargo, el vehículo eléctrico presenta una reducción del 70 % de CO₂ frente al automóvil de combustión interna.

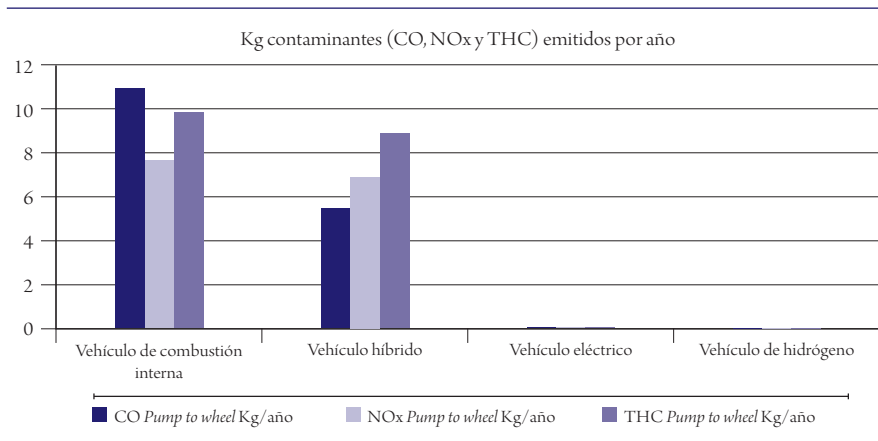


Figura 3. Emisión de CO, NO_x y THC por categoría vehicular

Otro tipo de contaminantes también fueron evaluados en el modelo producto del uso de combustibles fósiles como CO, NO_x y THC. Evidentemente las emisiones más elevadas se asocian al funcionamiento del vehículo de combustión interna, junto con el híbrido; en contraste, para los vehículos eléctricos y operados por hidrógeno se consideran cero emisiones de estos contaminantes (figura 3).

Eficiencia energética

Con el fin de realizar una comparación cuantitativa, el consumo energético se llevó a una unidad de medida en común, Mega joule por año (MJ/año). El vehículo basado en hidrógeno presentó un consumo de 28.743 MJ (figura 4). El alto consumo energético se basa en la inclusión de la electrólisis como proceso físico-químico para disociar el agua con el objetivo de generar hidrógeno libre (H₂) para alimentar la celda de hidrógeno (Bossel, 2006). Esta tecnología se limita por la eficiencia actual de la electrólisis menor de 45 %, pero a futuro se espera que sea mayor.

El vehículo de combustión interna presentó el segundo consumo más alto de energía (26.200 MJ), seguido por el vehículo híbrido. Estos vehículos están limitados por la naturaleza de su tecnología, ya que ambos sistemas basan su funcionamiento en la combustión de gasolina que tiene una eficiencia térmica entre 25 y 30 %, con pérdidas del 75 % en forma de calor (Rajput, 2005). Sin embargo, el caso del

automóvil híbrido puede mejorarse, ya que se asumió una combinación de 90 % combustible fósil y 10 % de batería eléctrica para realizar el recorrido total.

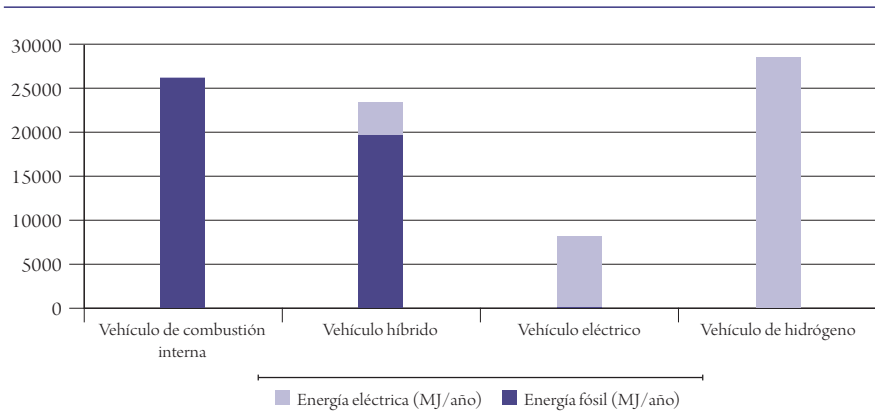


Figura 4. Total de energía consumida por cada tecnología vehicular

El vehículo eléctrico presenta un consumo de 8280 MJ/año. El total de la energía consumida por este automóvil representa el 32 % del consumo del vehículo de combustión interna para un mismo recorrido.

Autonomía

Para evaluar la autonomía de los vehículos fue necesario considerar que cada uno realizaba un recorrido de 30 km diarios, a una velocidad promedio de 30 km/h, que equivale a 1 hora de trayecto promedio por día. Este escenario se repitió a lo largo de un año, lo que arroja un uso promedio de 365 horas recorridas al año (tabla 2).

Tabla 2. Horas en recarga al año y porcentaje de tiempo no disponible

	HORAS EN RECARGA/AÑO	PORCENTAJE DE TIEMPO NO DISPONIBLE (%)
V. combustión interna (gasolina)	2,44	0,7
V. híbrido	180,10	6,0
V. eléctrico	655,13	64,2
V. hidrógeno	4,28	1,2

Los vehículos de combustión interna y de hidrógeno presentan el mejor porcentaje de tiempo no disponible. Esta característica en común hace atractivo el uso del hidrógeno para largos trayectos.

El automóvil eléctrico presenta una fuerte limitación si se considera que el 64 % del tiempo debe estar fuera de funcionamiento debido a su necesidad de ser recargado por fuentes eléctricas. El panorama que plantea esta tecnología en este caso no es el mejor debido a los grandes tiempos requeridos para recargar las baterías, sin embargo, existen módulos de recarga rápida que mejoran este aspecto, pero a un costo más elevado (Ecotricity, 2012). De esta forma, la tecnología eléctrica se presenta como una óptima solución únicamente para trayectos cortos, de 20 a 40 km/día (DNP, 2010), ya que no consume toda su carga y es posible recargarlo cuando está estacionado. Sin embargo, se presenta como una solución factible para trayectos urbanos, considerando que es la distancia promedio en Bogotá.

Costos

Desde el año 1999 hasta el 2013 se observa en términos generales que la tendencia de precios de la gasolina ha sido ascendente (figura 5). De acuerdo con el pronóstico realizado por las entidades del gobierno se espera un precio por galón de gasolina de aproximadamente \$12.600 para el año 2023, lo que significa un incremento proyectado del 4,27 % (UPME, 2012). Adicionalmente, el valor de la gasolina no considera el costo real de su uso por motivos de contaminación y deterioro pasivo ambiental para su extracción (externalidades ambientales), algunos autores señalan que el costo real del combustible debería ser de US\$12 que, convertidos a pesos colombianos, son \$21.600 del año 2013 (Brown, 2009).

Esta tendencia creciente del precio de la gasolina es consecuente si se consideran dos motivos; el primer motivo es que la demanda fósil no tiende a disminuir (Banco de la República, 2012); el segundo motivo es que las reservas petroleras de Colombia son limitadas trayendo como consecuencia aumento de precios por baja oferta y alta demanda (Black, 2010). Es importante destacar el segundo punto ya que para el año 2011 las reservas remanentes de crudo totalizaron 2259 millones de barriles y una producción de 1 millón de barriles diarios, esto significa que existe un límite de las reservas alrededor de 6 años dado el caso que no se encuentren nuevos pozos petroleros (ACP, 2012).

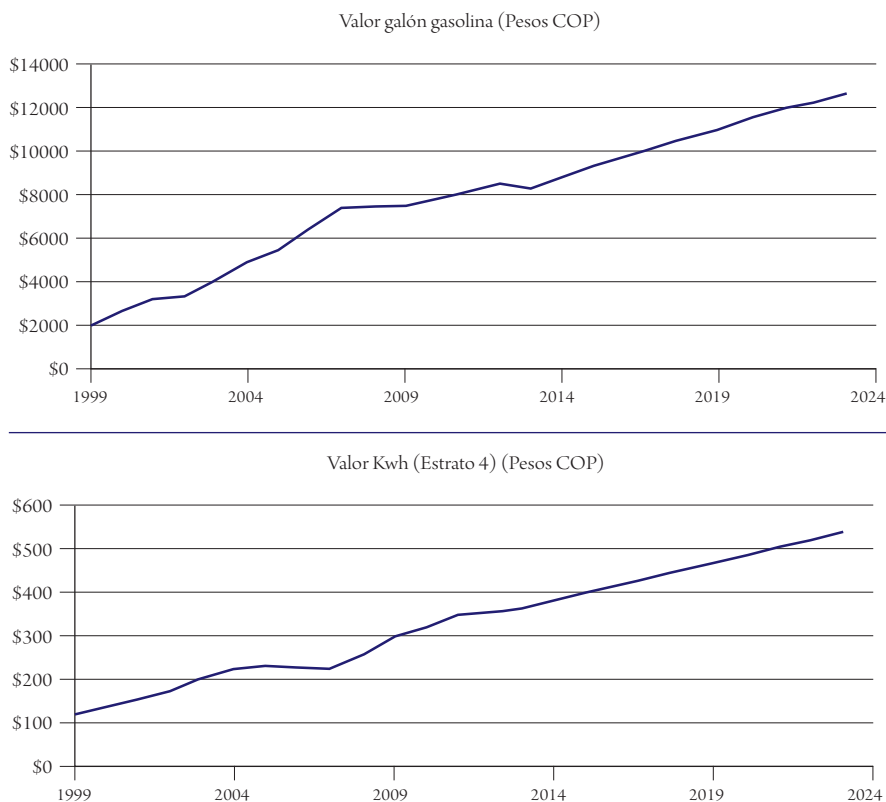


Figura 5. Proyección del crecimiento del costo del galón de gasolina y la energía eléctrica en Colombia

Para la tarifa de la energía eléctrica en el estrato 4, analizando el periodo comprendido entre 1999 y 2013, se evidencia una tendencia al incremento del valor por año equivalente al índice de precios al consumidor (IPC) colombiano promedio (Banco de la República, 2012). Basados en la tendencia de este periodo, y por medio de una regresión lineal proyectada a 10 años, se espera que en el año 2023 el precio de la energía eléctrica para Bogotá, estrato 4, será aproximadamente de \$537,08 equivalente a un incremento proyectado del 4% al año en la tarifa eléctrica. Sin embargo, si se tienen en cuenta los datos oficiales de la UPME y la relación directa entre el precio de la energía en la Bolsa y la tarifa del usuario final (Banco de la República, 2012), el costo de la energía eléctrica puede estar por debajo ya que la proyección del precio de Bolsa de la energía eléctrica presenta una tendencia a la baja.

A diferencia de las fuentes fósiles, la generación eléctrica es considerada una fuente estable de energía, donde se planean grandes proyectos para abastecer la demanda de energía reconociendo la capacidad de generación en Colombia (UPME, 2010). Sin embargo, es importante anotar que esta fuente es vulnerable ante variaciones climáticas (Lozano, 2010).

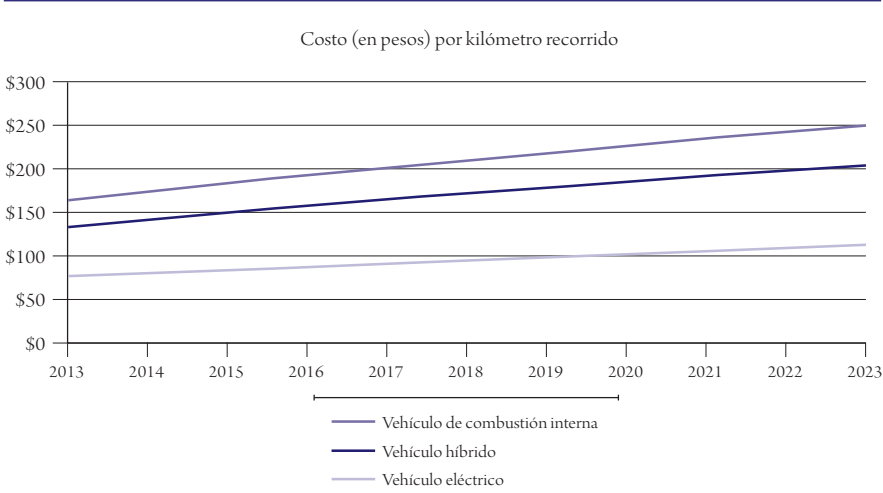
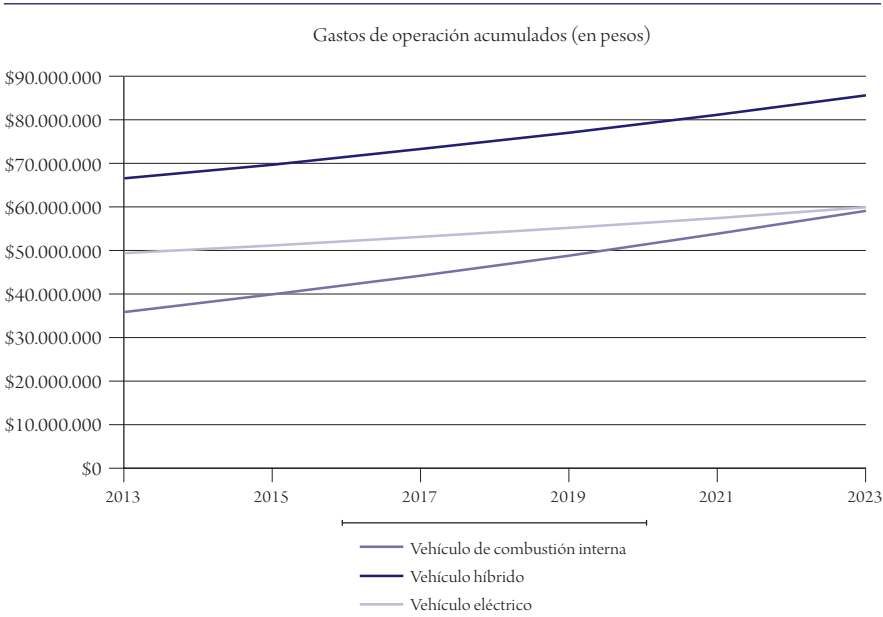


Figura 6. Gastos de operación y costo por kilómetro por tecnología vehicular

Tanto los costos por kilómetro recorrido como los gastos de operación acumulados presentan la misma tendencia, que depende básicamente del costo de la fuente de energía y la eficiencia con la que se use. La tecnología convencional —combustión interna—, que depende del costo de la gasolina, tiene unos gastos de operación de 59 millones de pesos al 2023 que incluyen el costo inicial del vehículo: inicia con un costo por kilómetro aproximado de 160 pesos y finaliza con un costo de 250 pesos/km en el 2023.

Los vehículos que presentan unos costos por kilómetro por debajo de la tecnología convencional son el híbrido y el eléctrico. La tecnología híbrida disminuye en cerca del 10 % los costos del recorrido al compararla con el automóvil de combustión interna; para el año 2023 presenta un costo de 200 pesos/km, pero un gasto de operación de 85 millones de pesos. Por último, el vehículo eléctrico presenta un ahorro de 50 % frente al automóvil de combustión interna, el costo de operación es de 59 millones y muestra unos costos por kilómetros relativamente bajos, 75 pesos/km para el 2013 y finaliza con 115 pesos/km en el 2023. El vehículo de hidrógeno presenta una tendencia creciente al igual que todos los vehículos, pero a causa de su baja eficiencia (en la producción de hidrógeno) arroja un costo de 250 pesos/km para el año 2013 y finaliza con un costo de 400 pesos/km para el año 2023. Debido a la falta de información del precio del vehículo de hidrógeno no se consideraron los gastos de operación en la figura 6.

En general, los gastos de operación y los costos por kilómetro están directamente relacionados con la eficiencia del vehículo (km/gal o km/kW), en consecuencia, al mejorar este parámetro se reduce la cantidad de energía consumida y los costos por kilómetro.

Evaluación final de las tecnologías

Con el objetivo de dar una valoración a cada tecnología vehicular se realizó una tabla que resume las características de cada una. Las categorías evaluadas corresponden a los resultados de la simulación de los cuatro vehículos, sin embargo, se adicionaron dos puntos de análisis: infraestructura para el vehículo e incursión en el mercado. La infraestructura para el vehículo es el término que describe si existen los medios para que el vehículo funcione como fuente de energía y puntos de

recarga. El segundo término pretende evaluar si el automóvil existe en el mercado actual y qué tan fácil es adquirirlo.

Los puntajes varían de 0 a 10, cuando el resultado del punto analizado es el mejor de las cuatro alternativas se asignaron 10 puntos, si es el segundo mejor se asignaron 7,5 puntos, si es el tercero, 5 puntos, y si es el último, equivalente a presentar la peor característica, se asignaron 2,5 puntos. Al final se suman los puntajes para tener una valoración general de cada tecnología.

Tabla 3. Valoración de cada tecnología vehicular

	EFICIENCIA ENERGÉTICA	INFRAESTRUCTURA PARA EL VEHÍCULO	INCURSIÓN EN EL MERCADO	AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO	COSTO POR TRAYECTO REALIZADO	COSTO DE LA ENERGÍA PARA ALIMENTARLO	EMISIONES DE CONTAMINANTES WELL TO WHEEL	PUNTAJE TOTAL
V. C. interna	5	10	10	10	5	2,5	2,5	45
V. híbrido	7,5	7,5	0*	5	7,5	7,5	7,5	42,5
V. eléctrico	10	5	0*	2,5	10	10	10	47,5
V. hidrógeno	2,5	2,5	0*	7,5	2,5	10	5	30

* Solamente se hace la excepción para la incursión del mercado, se asignaron 0 puntos a tres de las cuatro tecnologías evaluadas.

De este análisis se desprende que el mayor puntaje es para el vehículo eléctrico aun cuando no ha incursionado en el mercado y la infraestructura actual es insuficiente lo cual muestra un potencial muy alto para su implementación en un mediano plazo. En contraste, el automóvil a base de hidrógeno obtiene un puntaje incluso inferior al que alcanza el vehículo de combustión interna, limitado principalmente por la ineficiencia de la electrólisis para la obtención del combustible y por la ausencia de estructuras para su comercialización y masificación.

Retos para una futura implementación

En términos macroeconómicos, de presentarse una comercialización en masa de los vehículos eléctricos, implicará un reto para la economía colombiana, ya que se espera una caída del PIB 0,05 % por año y un aumento del desempleo hasta del 1 % para el año 2031 solamente por la transición entre la tecnología convencional del parque automotor y la tecnología eléctrica (The World Bank, 2012), causado

por el bajo mantenimiento y la poca mano de obra que demandan las nuevas tecnologías. Por tal razón es necesario tomar medidas que compensen estas pérdidas como la instalación de fábricas de ensamblaje y la inversión en instalaciones para estos nuevos vehículos.

Actualmente Bogotá carece de la infraestructura y los servicios para una masificación a gran escala de las alternativas presentadas en el modelo. Principalmente es necesario realizar grandes inversiones para suplir la distribución de la energía de las nuevas tecnologías como estaciones públicas y locales de recarga (energía eléctrica y posteriormente de hidrógeno), pero difícilmente empresas del sector privado harán inversiones de este tipo ya que no existen vehículos que demanden estos servicios. Por tal motivo, es necesaria la intervención del Estado con el fin de resolver la falta de demanda por la falta de oferta y viceversa. En esta dirección, el gobierno ha formulado algunos incentivos económicos, como exención de aranceles y disminución de impuestos para vehículos, baterías y sistemas de recarga. Un ejemplo de esto es la Resolución 1688 de 2011 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por la cual se aprobó la importación con 0 % de arancel en 2011 de un contingente de 161 vehículos híbridos, eléctricos y dedicados a gas natural. También se evidencia el Decreto 677 de 2011 de la Alcaldía Mayor de Bogotá que generó beneficios económicos para los vehículos eléctricos dedicados al servicio público.

Adicional a estas ayudas se proponen otras medidas para fomentar la masificación de las alternativas más limpias y desincentivar el uso de las tecnologías que contaminan y hacen uso ineficiente de la energía. Una propuesta para los vehículos eléctricos es la eliminación de restricciones a la movilidad (programa “pico y placa”) (Cadena, 2011), disminución en impuestos de rodamiento y seguros, uso exclusivo de vías públicas, disminución o exención de pago de peajes cercanos a la ciudad y sitios de estacionamiento dentro de la misma, ingreso libre al centro urbano, *leasings* de bajos intereses, financiación estatal por medio de mecanismos de desarrollo limpio, entre otros, como ha ocurrido en otros países. De igual forma se debería comenzar a penalizar económicamente el sistema transporte convencional con impuestos sobre las emisiones de gases contaminantes y uso de fuentes fósiles, aumento en los aranceles de importación, incremento en impuestos de rodamiento y seguros.

El panorama para los vehículos a base de hidrógeno es más incierto aún. Como se evidenció en los resultados del modelo, la mayor limitante es la ineficiencia en el

proceso de electrólisis y la alta demanda de energía en la obtención del hidrógeno. Una vez la tecnología supere estas limitantes, este tipo de vehículos pueden ser una opción para sustituir la flota de transporte público dada su autonomía y la ausencia de emisiones de gases contaminantes.

Conclusiones

El sistema de transporte particular adoptado en la ciudad de Bogotá se caracteriza por hacer un uso ineficiente de la energía proveniente de fuentes fósiles, y continuas emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Considerando que un vehículo en Bogotá realiza un recorrido de 30 km diarios en promedio, emitirá 2 toneladas de CO₂ al año y 30 kg de gases tóxicos como CO, NO_x y THC. El resultado del uso del vehículo convencional es la contribución a la disminución de la calidad del aire con impactos negativos en el ambiente y la salud, que obligan al Estado a realizar gastos para mitigar y adaptarse a los efectos de esta actividad económica. Como no existe un sistema de transporte con cero emisiones y 100 % eficiente, las nuevas tecnologías vehiculares basadas en el motor eléctrico reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en más de un 50 %, e incluso eliminan la contaminación de gases como NO_x y THC, disminuyen el consumo energético en un 70 % y, adicionalmente, pueden generar unas tasas de retorno de la inversión inferiores a diez años por medio de: incentivos a la adquisición de vehículos como el eléctrico e híbrido, considerando el costo real del combustible (Brown, 2009) e incluyendo impuestos sobre el uso de las tecnologías tradicionales que contaminan.

En general, las alternativas vehiculares evaluadas por medio del modelo (eléctrico e híbrido) presentan una mayor inversión inicial, pero unos costos de operación significativamente menores a la tecnología convencional.

Es importante evidenciar que estas alternativas tienen unas limitaciones para el panorama simulado, como por ejemplo la baja autonomía del vehículo eléctrico para realizar largos trayectos. De igual forma, la tecnología basada en hidrógeno está limitada frente a una futura masificación a gran escala debido a la necesidad de agregar un proceso fisicoquímico para producir la molécula de hidrógeno y la baja eficiencia hasta ahora presentada.

Sin embargo, dada la transición del sistema convencional a un sistema de transporte particular alternativo se presentarán unos retos que impactarían la económica del país. Adicionalmente, una futura implementación exige una gran intervención para desarrollar la infraestructura necesaria y fomentar la adquisición de los nuevos vehículos.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá (2010). *Observatorio ambiental de Bogotá*. Recuperado de: <http://oab.ambientebogota.gov.co>
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2011). *Indicadores demográficos y proyecciones de población por localidades*. Recuperado de: <http://www.sedbogota.edu.co>
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2012). *Número de vehículos particulares - NVP*. Recuperado de: <http://oab.ambientebogota.gov.co>
- Alcaldía Mayor de Bogotá, Decreto 677 de 2011. Recuperado de: www.alcaldiabogota.gov.co
- Asociación Colombiana del Petróleo (2012). *ACP Hidrocarburos*, 1. Recuperado de: <http://www.acp.com.co/>.
- Banco de la República (2012). *Informe sobre inflación*. Recuperado de: www.banrep.gov.co
- Binsted, A., Wayman, M. y Allen, H. (2012). *Transport NAMA submissions to the UNFCCC: Domestic frameworks: A review of 5 countries*. Recuperado de: dev.transport2020.org
- Black, W. (2010). *Sustainable Transportation: Problems and Solutions*. New York: Gilford Publications.
- Bossel, U. (2006). Does a Hydrogen Economy Make Sense? *Proceedings of the IEEE*, 94 (10).
- Brown, L. (2009). *Plan B 4.0. Mobilizing to Save Civilization*. New York and London: Earth Policy Institute, Norton and Company.
- Cadena, A. y Rosales, R. (2011). *Mitigation Actions in Colombia. Country Study for Colombia, Universidad de los Andes*. Recuperado de: www.mapsprogramme.org
- Caicedo, E. y Tique, E. (2012). La nueva fórmula de la gasolina y su potencial impacto inflacionario en Colombia. *Borradores de economía*, 698. Bogotá: Banco de la República.
- Cámara de Comercio de Bogotá. *Industriales*. Recuperado de: <http://es.investinbogota.org/>
- Colman, J., Sánchez, E., Sambeth, J. y Porta, A. (2012), Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina. *Atmospheric Environment*, 55, 440-447.
- Centro de estudios de la construcción y el desarrollo urbano y regional (2013). *Boletín estadístico - contexto sectorial Bogotá D.C.* Recuperado de: www.cenac.org.co

- Cepal (2003). *Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- DANE (2011). *Series de Población*. Oficina Asesora de Planeación SED Grupo Estadística. Recuperado de: <http://www.sedbogota.edu.co/>
- DNP (2010). *Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014*. Recuperado de: www.dnp.gov.co
- Eaves, S. y Eaves, J. (2003). Fuel-Cell Vehicles: Solution or Shell Game? Recuperado de: www.veva.bc.ca/wtw
- Ecotricity (2012). *Game-changing moment for electric cars*. Recuperado de: <http://www.ecotricity.co.uk>
- Endesa (2011). *Movilidad eléctrica en Colombia: oportunidades y retos*. Recuperado de: <http://www.actualidadendesa.com>
- Hernández-González, A. y Jiménez, R. (2010). *Desarrollo de un inventario georreferenciado de emisiones de dióxido de carbono por fuentes móviles en el área urbana de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- IEA (2012). *CO₂ emissions from fuel combustion highlights*. Paris: The International Energy Agency.
- Lozano, I. y Rincón, H. (2010). Formación de las tarifas eléctricas e inflación en Colombia. *Borradores de economía*, 634. Bogotá: Banco de la República.
- Maggiore, C. D. y López, J. A. (2006). *Vulnerability to air pollution in Latin America and the Caribbean region*. World Bank.
- Ministerio de Minas y Energía (2010). Resolución 180947.
- Pachon, J., Behrentz, E. y Rojas, N. (2006). Challenges in Bogota Air Quality: Policies and Technology. Proceedings of the 100th A&WMA Annual Conference and Exhibition. Portland, OR, USA.
- Rajput, R. (2005). *Internal Combustion Engines*. Laxmi Publications.
- Rodríguez P. y Behrentz, E. (2009). *Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Sánchez, E. (2011). *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia*. Washington: Banco Mundial Ediciones.
- SDA (2008). *Plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá (PDDAB) 2010-2020*. Recuperado de: ambientebogota.gov.co
- Sivak, M. (2013). *Prediction Vehicles sales from GDP in 48 countries: 2005-2011*. University of Michigan.
- Sivak, M. y Tsimhoni, O. (2008). *Future demand for new cars in developing countries: going beyond GDP and population size*. University of Michigan.

- The World Bank (2012). *Climate Mitigation for Colombia. Energy Unit Sustainable Development Department Latin America and the Caribbean Region.*
- UPME (2009). *Plan de expansión de referencia generación - transmisión 2010-2024.* Recuperado de: www.upme.gov.co
- UPME (2010). *Proyección de demanda de energía en Colombia.* Recuperado de: www.upme.gov.co
- UPME (2012). *Proyección de demanda de combustibles líquidos y GNV en Colombia.* República de Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- UPME (2013). *Sistema de información de petróleo y gas colombiano.* Recuperado de: www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta_Series. Accedido febrero 2013.
- Wang, M. (2003). *Well-to-Wheels Energy and Emission Impacts of Vehicle/Fuel Systems.* California: Argonne National Laboratory.

