



# CONVENIENCIA DE INCORPORAR LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN EL SECTOR TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRÁ<sup>1</sup>

Convenience of incorporating fuel cells in the valle de aburra transport sector

Juan Guillermo Mejía Arango\*

Juan Manuel Montes Hincapié\*\*

## Resumen

El sector energético colombiano, actualmente, afronta el problema de la sostenibilidad del sistema de movilidad limpia debido a que algunas características del sistema de transporte convencional dependen principalmente de los derivados del petróleo, en consecuencia, este sistema resulta contaminante y de baja eficiencia. El presente artículo quiere mostrar la conveniencia de incorporar las celdas de combustible en el sector transporte del Valle de Aburrá por tener un menor impacto negativo, para el medio ambiente que los sistemas con motor de combustión interna, diversificar el uso de los recursos energéticos para

no depender exclusivamente de los derivados del petróleo, intensificar el uso de las energías renovables, ser más eficiente, propender mejorar el índice de calidad de vida de los ciudadanos y dar un impulso al desarrollo económico de la región. La metodología de análisis consiste en estudiar la situación actual en el mundo, en Colombia y en el Valle de Aburrá, en cuanto a las necesidades de transporte, la contaminación y daño económico ocasionado por este sector, consumo de energía y eficiencia de los automotores. Finalmente, se presentan las celdas de combustible funcionando con hidrógeno como opción para el desarrollo de un sistema de transporte masivo sostenible.

**Palabras clave:** Celdas de combustible, hidrógeno, energía, transporte.

## Abstract

Currently, Colombian energy industry is facing a problem of sustainability of the clean mobility system due to the fact that some features of the conventional transport systems depend mainly on petroleum products which pollute and have a low efficiency. This paper aims at showing the positive aspects of incorporating fuel cells in the transport industry in Valle de Aburrá: they are more efficient and have a lower negative impact

<sup>1</sup> El Valle de Aburrá está ubicado en el departamento de Antioquia, Colombia. Oficialmente es conocido como Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Lo conforman los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas. Su núcleo es Medellín, capital del Departamento.

\* MSc(c) en Gestión Energética Industrial del INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO de Medellín, Colombia. [juanmejia@itm.edu.co](mailto:juanmejia@itm.edu.co)

\*\* Investigador-Docente del INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO de Medellín, Colombia. Ph.D en Proyectos de Innovación Tecnológica en la Ingeniería de Producto y Proceso de la Universitat Politècnica de Catalunya. [juanmontes@itm.edu.co](mailto:juanmontes@itm.edu.co)

on the environment than internal combustion engine systems; they diversify the use of energy sources so that we don't depend so much on the use of petroleum products; with these cells we intensify the use of renewable energies; the use of these cells improves the life quality index and boosts the economic development in the region. The analysis methodology was the study of the global, domestic (Colombia) and local (Valle de Aburrá) situation regarding, on the one hand, transportation needs, pollution and economic harm caused by this industry and, on the other hand, energy consumption and automobile efficiency. Finally, hydrogen fuel cells are presented as a new possibility for the development of a sustainable mass transportation system.

**Keywords:** fuel cells, hydrogen, energy, transport.

## Introducción

En la sociedad actual, los medios de transporte son fundamentales para el desarrollo económico y social de una región. Sin embargo, bajo las condiciones actuales de operación del sistema de transporte mundial, este es insostenible [Claus & Wietschel, 2008]. Algunas de estas condiciones están relacionadas con el crecimiento de la población ligado al aumento de automotores, al crecimiento económico, a las limitaciones en la tecnología y eficiencia de los automotores, a los combustibles empleados por los motores, cantidad empleada, disponibilidad y precios de combustibles y a los contaminantes, producto del uso de estos combustibles.

---

Por otra parte, el sector energético colombiano está afrontando un problema para la sostenibilidad de un sistema de movilidad limpia, debido a la lenta evolución de la tecnología en el sector transporte<sup>2</sup> y a las presiones de tipo ambiental en Colombia y en el mundo.

---

<sup>2</sup> En Colombia el transporte motorizado es insostenible, fundamentado en el transporte particular en lugar del masivo. El Valle de Aburrá se caracteriza por un parque automotor de elevada edad, donde el contenido de azufre de los combustibles usados es superior al de otras regiones [AM, 2007]. La tecnología en el sector transporte actual se soporta en vehículos de combustión interna que se caracterizan por tener una eficiencia baja, inferior al 25%, lo que significa que desperdician más del 75% de la energía suministrada [IEA, 2005], [Osses & Montero, 2001], [Nada Zamel, 2006], [Kruger, 2006]. Estos

El uso de diésel y gasolina por el sector transporte consume el 82% de los derivados del petróleo en Colombia [UPME, 2008], lo que trae como consecuencia el deterioro del medioambiente y de la salud de los colombianos.

Ante esto, el gobierno de Colombia ha implantado algunas medidas y proyectos que pretenden enfrentar el problema, algunas de ellas son:

- Impulsar programas de aumento de eficiencia en los motores para transporte público entre los que se encuentran los programas de chatarrización, importación de motores de última generación, ajuste de los periodos de mantenimiento de motores, obligación del certificado de emisiones, entre otros
- Programas de pico y placa en las principales ciudades del país
- Fomento a proyectos de transporte masivo (Metro, Metro cables, MÍO de Cali, Transmilenio de Bogotá y Metroplús en Medellín)
- Incentivos a la producción y uso de biocarburantes en el transporte público del país entre los que se encuentran las gasolinas verdes<sup>3</sup> y las mezclas de etanol con gasolina
- Programa de masificación de gas natural y la reconversión del parque automotor a GNC (gas natural comprimido)

Este artículo tiene como fin mostrar la conveniencia tecnológica y ambiental de introducir las celdas de combustible en el sistema de transporte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Para esto se hace un análisis de la situación energética mundial y local para atender una población en crecimiento,

---

vehículos emplean derivados del petróleo cuya combustión produce la emisión de CO<sub>2</sub> y gases contaminantes, y perjuicios para la salud y el medioambiente [Claus & Wietschel, 2008], [Chaparro & Cuervo, 2001], [Kruger, 2006], [Fuglestedt & Shine, 2009], [Fuglestedt et al, 2007]. Por el contrario, las celdas de combustible que trabajan con hidrógeno son más eficientes y contaminan menos [JC&L, 2007].

<sup>3</sup> Ecopetrol tiene un programa de gasolina verde que consiste en un proceso gradual para eliminación del aditivo de plomo, incremento del octanaje, reducción de azufre, mezcla de aditivos surfactantes y reducción de la volatilidad e incorporación de etanol, esto con el fin de reducir el impacto ambiental producido por el uso de la gasolina [Ecopetrol, 2006], [CORPODIB, 2004].

con unas necesidades específicas en el sector transporte que tiende a ser insostenible, desde el punto de vista económico y ambiental; luego se presenta la cadena de producción y utilización del hidrógeno a través de las celdas de combustible como alternativa a la solución del problema del transporte en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Además, hace parte de la tesis de maestría en Gestión Energética Industrial denominada “**Definición de escenarios para la penetración de las celdas de combustible en el sector de transporte masivo del Valle de Aburrá**”. En él se definen los aspectos técnicos, económicos y ambientales, para que una parte de la flota de transporte público de pasajeros del Valle de Aburrá opere con celdas de combustible.

Aunque para este artículo no se tuvo en cuenta la metodología para la definición de los escenarios propuestos, nos parece importante mencionarla. Por una parte, se reconoce la situación actual y las condiciones potenciales de las celdas de combustible que funcionan con hidrógeno. Luego, se identifican las variables estratégicas a través de encuestas aplicadas a expertos pertenecientes a diferentes grupos de investigación y sectores relacionados con los sectores energético, tecnológico y ambiental. Más adelante, se aplica un análisis para la estructuración de ideas empleando el método Micmac, desarrollado por el Instituto de Innovación Informática para la Empresa 3IE y que permite obtener las variables esenciales para la evolución del sistema y, por último, se obtienen los escenarios, aplicando el método de impacto cruzado el cual da un enfoque analítico para determinar la probabilidad de ocurrencia de cada escenario.

## PANORAMA MUNDIAL

### Población y vehículos

---

La población mundial está creciendo y de igual forma el número de automotores para suplir las necesidades de movilidad.

---

Por ejemplo, la población mundial del año 2000 fue de 6.000 millones de personas [Kruger, 2006], se prevé que para el año 2050 la población total sea de 9.000 millones. Para el año 2000 se tenían 680 millones de vehículos en el mundo (cerca de 1 vehículo por cada 8 personas) [Claus & Wietschel, 2008]. Por su parte para el año 2003, se tenían 715 millones de vehículos y 6.270 millones de personas (cerca de 1 vehículo por cada 9 personas) [Moriarty & Damon, 2008].

Según estimados, para 2010 se tendrían 6.800 millones de habitantes y más de 1.000 millones de vehículos (casi 1 vehículo por cada 6 personas). Esta tendencia muestra como los países se desarrollan en torno a la cultura de los automóviles, tanto es así que, después del 2003 la tendencia mostró más de 1.000 millones de automóviles en todo el mundo<sup>4</sup>.

### Contaminación

El desarrollo del transporte tiene un impacto directo sobre la población y el medioambiente. Estos efectos incluyen las muertes prematuras, las molestias y alteraciones para la salud, causadas por la exposición al ruido, los gases y partículas en suspensión emitidos al aire, las alteraciones del clima por la emisión de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y el agua, así como el deterioro de los hábitats naturales y bióticos [Claus & Wietschel, 2008]. El CO<sub>2</sub> es uno de los gases de efecto invernadero y de calentamiento global que ayudan al deterioro de la capa de ozono [Chaparro & Cuervo, 2001] y [Kruger, 2006].

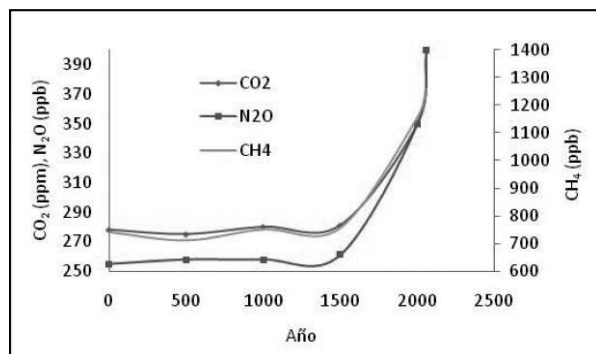
Según informe de la *International Energy Agency* (IEA) [IEA, 2003] las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> están estrechamente ligadas al consumo de energía: en el 2002 estas fueron de 22.500 millones de toneladas y se proyecta que para los años 2010, 2030 y 2050 las emisiones de CO<sub>2</sub> sean de 27.500, 38.000 y 60.000 millones de toneladas, respectivamente (IEA, 2005).

<sup>4</sup> Motavalli, Jim. (2001). Forward Drive. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=zVXQf9as6XgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=motavalli+forward+drive&ots=bvc79PRz67&sig=KoUyiHe-H57dRmOVXfhd1Z3KfzA#v=onepage&q&f=false>. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2011.

En el año 2000, el sector del transporte mundial es la mayor fuente de emisiones antropogénicas de óxidos de nitrógeno (NOx) (37% del total de NOx emitido a la atmosfera), CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles (21% del total de CO<sub>2</sub> emitido), carbono orgánico volátil (COV) (19%) y CO (18%) y el negro de carbón (*Black carbón*) (14%) [Fuglestvedt & Shine, 2009] y [Fuglestvedt et al, 2007], [Claus & Wietschel, 2008].

En la ilustración 1 se observa el crecimiento pronunciado de los gases efecto invernadero alrededor del año 1900 hasta el presente.

**Ilustración 1:** Concentración de gases de efecto invernadero desde el año 0 a 2005. [Foster & Ramaswamy, 2007].



En la tabla 1 se presentan las emisiones de gases efecto invernadero en giga-toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> y su correspondiente participación en el año 2004. Es apreciable la mayor participación que tiene el CO<sub>2</sub> proveniente de la utilización de los combustibles fósiles.

**Tabla 1:** Emisiones y participación de GEI en el año 2004 [PNUMA, 2008]

Gases GEI año 2004	Gt CO <sub>2</sub> eq/año	Participación
CO <sub>2</sub> uso de combustibles fósiles	27,7	56,60%
CO <sub>2</sub> deforestación y degradación de la biomasa	8,5	17,30%
CH <sub>4</sub>	7,0	14,30%
N <sub>2</sub> O	3,9	7,90%
CO <sub>2</sub> otros	1,4	2,80%
Gases-F	0,5	1,10%
Total	49	100%

## Cuantificación de efectos provocados por el sector transporte

Es difícil evaluar económicamente los costos causados por la emisión de gases y contaminantes liberados al medioambiente. Teniendo en cuenta los certificados de emisión para los mecanismos de desarrollo limpio (MDL), las estimaciones actuales varían entre €5 y €140 por tonelada de CO<sub>2</sub> [Claus & Wietschel, 2008] y [NU, 2009].

Por otra parte en [PNUMA, 2008], se estima que para un incremento de temperatura de 4 °C con respecto a los años 1980-1999, la media de pérdidas mundiales puede estar entre 1% y 5% del producto interno bruto (PIB).

El costo social del carbono<sup>5</sup> es en promedio USD 12 por tonelada de CO<sub>2</sub>, estando las estimaciones entre USD 3 y USD 95 por tonelada de CO<sub>2</sub>.

## Consumo energético y rendimiento de automotores

Los motores de combustión interna empleados en el sector transporte son máquinas térmicas que se caracterizan por tener una eficiencia muy baja, inferior al 25%, lo que significa que desperdician más del 75% de la energía suministrada [IEA, 2005]. Un vehículo tradicional está sujeto a las siguientes pérdidas: 6% en la transmisión, 11% por ociosidad<sup>6</sup>, 65% en el motor, y 2% en accesorios, y queda solo un 16% de energía útil [Osses & Montero, 2001] y [Nada Zamel, 2006].

En la tabla 2 se presenta la matriz de la canasta energética del mundo, para el año 2006 de acuerdo con las fuentes y con los sectores de consumo. Se observa la participación del sector transporte con un 28% y cómo este sector depende en un 95% de los derivados del petróleo, y en un 3% del gas natural.

<sup>5</sup> Las emisiones de CO<sub>2</sub> causan daños al medioambiente y a la salud de las personas que son difíciles de cuantificar en términos económicos. Un intento para estimar el costo social son certificados de emisión para los mecanismos de desarrollo limpio (MDL)

<sup>6</sup> Por ociosidad se entiende el tiempo transcurrido mientras el vehículo no se desplaza pero su motor si está en funcionamiento.

Tabla 2: Matriz de la energía primaria en el mundo 2006 [EIA, 2009]

Energía primaria en el mundo por fuente y consumo por sector 2006 (cuadrillones de BTU)									%
Consumo	Carbón	Petróleo	Gas	Geotérmica	Renovables	Electricidad	Calor	Total	
<b>Total</b>	<b>27.7</b>	<b>138.2</b>	<b>48.9</b>	<b>0.4</b>	<b>41.3</b>	<b>53.4</b>	<b>10.8</b>	<b>320.8</b>	100%
	9%	43%	15%	0%	13%	17%	3%		
<b>Industria</b>	21.8	13.1	17.2	0.0	7.5	22.2	4.7	<b>86.5</b>	27%
	25%	15%	20%	0%	9%	26%	5%		
<b>Transporte</b>	0.1	83.5	2.8	0.0	0.9	0.9	0.0	<b>88.4</b>	28%
	0%	95%	3%	0%	1%	1%	0%		
<b>Otros sectores</b>	4.5	18.7	23.5	0.4	32.9	30.3	6.2	<b>116.6</b>	36%
<b>Uso no energía</b>	1.2	22.8	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>29.4</b>	9%

A escala global se está presentando un problema de reserva energética, producto del crecimiento económico y del aumento de la población, lo que ocasiona mayor demanda de energía y más problemas ambientales [Kruger, 2006]. La demanda también está influenciada por el aumento de consumo de energía per cápita y el rápido crecimiento de economías en transición. A su vez, el aumento de la demanda incide en el aumento de los costos de los energéticos y también acorta el horizonte de disponibilidad de las principales fuentes primarias, como son el petróleo y el gas natural. Llama especial atención que en la actualidad un 87% de la energía que se consume es agotable, circunstancia que genera inseguridad con respecto al abastecimiento y volatilidad en los precios [UPME, 2008].

La disponibilidad del petróleo y sus derivados está disminuyendo en el mundo; algunas publicaciones hablan de que para el año 2100 este recurso ya estará agotado; otras hablan de un horizonte de 70 a 100 años [Solo Energía, 2004]. En la ilustración 2, se aprecia cómo la disponibilidad real de petróleo sigue una trayectoria en forma de campana [Kruger, 2006], donde la parte creciente de la campana coincide con petróleo fácil de extraer, de buena calidad y precios bajos, mientras la parte decreciente de la campana se caracteriza por lo contrario.

La ilustración 3 presenta una tendencia decreciente de los descubrimientos de petróleo después de 1965, mientras que el precio del petróleo muestra una tendencia creciente.

Ilustración 2: Tendencia en la disponibilidad de petróleo en forma de campana adaptado de [Kruger, 2006]

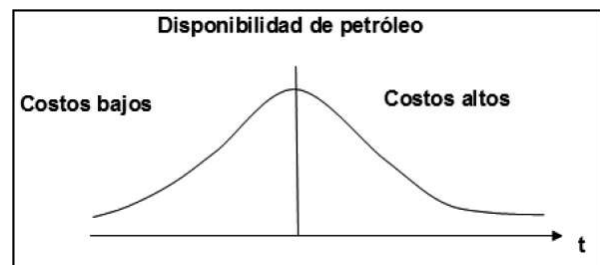
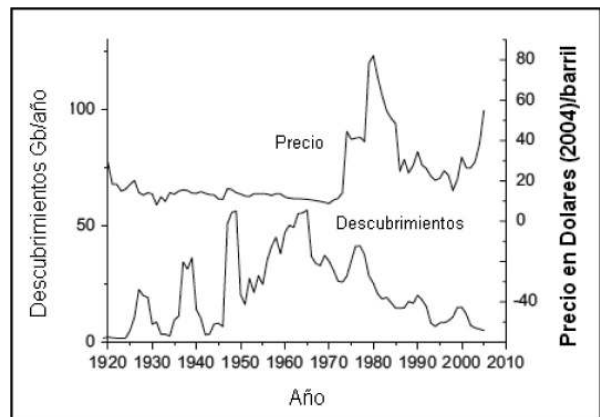


Ilustración 3: Tendencias de descubrimientos y precios del petróleo [Bardi, 2009]



## Panorama en Medellín y en Colombia

El Valle de Aburrá no es ajeno a la problemática provocada por el sector transporte mundial que se expresa en fenómenos como: crecimiento del parque automotor, ineficiencia de los vehículos, dependencia de los derivados del petróleo, disponibilidad y precios de los mismos, y consecuencias negativas para el medioambiente,

la salud y la economía. A continuación se describen estos problemas, que, si bien son del orden nacional, afectan directamente al Área Metropolitana.

## Aspecto ambiental en el Valle de Aburrá

En la tabla 3 se presentan las principales emisiones de gases contaminantes provocadas por fuentes móviles en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. En ella se evidencian los efectos de estos agentes contaminantes en la salud.

**Tabla 3:** Emisiones de contaminantes por fuentes móviles en el Valle de Aburrá y los efectos para la salud [UPB, 2006], [Martínez López & Quiroz, 2007] y [Sepúlveda Villada, 2007]

Componente	Cantidad toneladas año	Efectos para la salud
CO	109.266,80	Déficit de oxígeno en los tejidos, disminución de la función cardíaca, afecta la concentración de glóbulos rojos, deterioro visual, insensibilidad, disminuye capacidad laboral, dolor de cabeza, náuseas y vómito.
NOx	15.987,40	Irritación en los ojos, nariz y garganta. Falta de aliento, quemaduras, espasmos, oxigenación de los tejidos y líquido en los pulmones.
COT*	28.755,80	
PM10	2.011,20	Afecta el sistema respiratorio
SOx	1.037,70	Destruye cilios del epitelio del sistema pulmonar, tos, fiebre, asfixia, afecciones de la vista y piel, asma, alergias respiratorias, agrava padecimiento cardiovascular.

COT\* Compuestos orgánicos

En el Valle de Aburrá se emiten en promedio 3.414.679,8 ton/año de CO<sub>2</sub>. De esta cantidad el sector transporte es el de mayor aporte, si se tiene en cuenta que del total de las emisiones, este sector participa con el 70% [UPB, 2007], [IDEAM, 2006], [Sepúlveda Villada, 2007] y [Kruger, 2001].

En el 2005 el parque automotor del Valle de Aburrá alcanzó los 550.619 vehículos [UPB, 2006]. Y para el 2006 ya se hablaba de más de 600.000 vehículos.

El parque automotor emplea como fuente de combustible la gasolina, el diésel (ACPM) y el gas natural, principalmente [Martínez López & Bedoya Vealásquez, 2007], [Sepúlveda Villada, 2007]: de ellos, la gasolina es el mayor contaminante por la forma como es empleada<sup>7</sup>.

En un estudio de transporte del municipio de Medellín en el 2005 [Alcaldía de Medellín, 2005], se muestra que por la ciudad circulan 62.843 vehículos de transporte de pasajeros (exceptuando taxis) que consumen en promedio 1.042.365 galones de combustible por día y un recorrido de 11.596.055 kilómetros día; de estas cifras se deduce un rendimiento de 11 km/galón, y una emisión de 136 kg de CO<sub>2</sub>/vehículo de pasajeros por día, para un total anual de 8.6 t/CO<sub>2</sub>.

## Los derivados del petróleo en Colombia

Según la UPME [UPME, 2009], el petróleo mueve la economía de Colombia. Con la explotación del petróleo se abastecen las necesidades nacionales y se exporta el resto. Sin embargo, la autosuficiencia energética y las exportaciones no se podrán mantener a largo plazo y para un futuro cercano se debe contar con el descubrimiento de nuevos yacimientos. En el informe de la UPME del plan energético nacional 2006-2025, se estima que el pico de producción de petróleo se puede dar hacia el año 2037.

La canasta energética tiene una fuerte dependencia de los derivados del petróleo [UPME, 2009]. El consumo de energía primaria en Colombia en el período 1990-2005 pasó de 230.660 teracalorías a 285.950 teracalorías; el sector transporte es el de mayor demanda, con un 39%, además, depende en un 91% de la gasolina y el ACPM [UPME, 2008]. De 2003 a 2007 el consumo de gasolina pasó de 88.615 barriles diarios a 66.777 barriles diarios.

Esta disminución se explica por el programa de masificación de gas natural en el sector transporte y por la mezcla de gasolina con etanol. En este mismo período, el ACPM aumentó de 70.000 barriles diarios a 81.295 barriles diarios. La producción de alcohol desnaturalizado<sup>8</sup> alcanzó

<sup>7</sup> La contaminación causada por un combustible está asociada con la eficiencia con que se realiza la combustión. La antigüedad de los vehículos y la falta de mantenimiento y la inadecuada calibración de los equipos incrementa la contaminación ocasionada por este combustible.

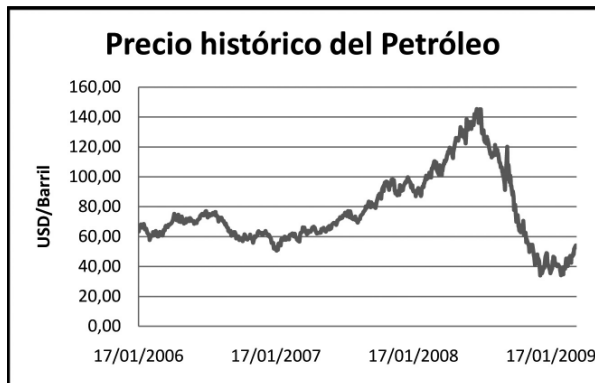
<sup>8</sup> El alcohol carburante y/o etanol anhidro desnaturalizado es un compuesto orgánico de naturaleza diferente a los hidrocarburos y al

en el año 2008 los 212 millones de litros.

## Precios de combustibles en Colombia

Los precios de los distintos combustibles en Colombia han estado ligados al mercado internacional del petróleo y también conservan su tendencia al alza. En la ilustración 4 se muestra el precio histórico del petróleo en Colombia desde 2006 a 2009, el cual se caracteriza por su volatilidad. Es de destacar que en épocas en las que el precio internacional del petróleo aumentó, los precios internos del combustible aumentaron. Sin embargo, para el primer trimestre del 2009 cuando el precio internacional del petróleo bajó a 40 USD/b [Clavijo, 2009] y el precio de la gasolina en EE. UU. llegó a un nivel de 1,78 USD/galón (4.200 \$/galón), en Colombia se mantuvo un valor de \$7.548 /galón, valor muy superior al que se paga en EE. UU.

**Ilustración 4:** Precio histórico del petróleo en Colombia adaptado de [Ecopetrol, 2009]



## Hidrógeno y celdas de combustible

Ante la problemática que presenta el sector transporte mostrada anteriormente, se están dando importantes esfuerzos por parte de comunidades científicas y gobiernos por implementar fuentes energéticas de menor impacto para el medioambiente, que no tengan plena dependencia de los derivados del petróleo, más eficientes y que

cual se le agrega una sustancia desnaturalizante para convertirlo en no potable [MME, 2007].

sean renovables [Kruger, 2006].

Para mitigar los efectos del sector transporte convencional, aparece la tecnología de las celdas de combustible, una tecnología que tiene como combustible esencial el hidrógeno. La utilización del hidrógeno en el sector transporte se fundamenta en dos aspectos estratégicos: (a) la sustitución de combustibles fósiles cada vez más escasos y costosos y (b) la reducción de la contaminación del aire [Kruger, 2006].

## El hidrógeno

En la tabla 4 se puede observar cómo el hidrógeno es un combustible que tiene la mayor energía específica por unidad de masa 125.000 kJ/kg, comparado con la gasolina y el gas natural, pero es el que tiene menor energía específica por unidad de volumen 10.400 kJ/m<sup>3</sup>, y ocupa mucho mayor espacio que los combustibles como la gasolina y el gas natural. Ante este problema se están desarrollando tecnologías para trabajar el hidrógeno a altas presiones o utilizarlo en forma líquida, aspectos que incrementan considerablemente los costos [Kruger, 2006].

**Tabla 4:** Propiedades energéticas del hidrógeno comparado con gasolina y gas natural [Kruger, 2006]

Propiedad	Unidad	Hidrógeno	Gasolina	Gas Natural
Densidad (g)	g/l	0,0899		
Densidad (l)	g/l	71		
Energía específica	kJ/kg	125.000	44.500	48.000
Energía volumétrica	kJ/m <sup>3</sup> Estado libre	10.400	32.000.000	37.300
Energía volumétrica	kJ/m <sup>3</sup> Gas a 2400 PSI	1.510.000		6.290.000
Líquido	kJ/m <sup>3</sup> Líquido	8.520.000	32.000.000	21.100.000

Dependiendo de la forma de producción, el uso de hidrógeno implica poca o cero emisiones de gases contaminantes y de CO<sub>2</sub> cuando se utiliza en celdas de combustible. Mientras el uso de la gasolina por medio de los motores de combustión interna (MCI) produce emisiones de 1.97 g de (CO<sub>2</sub> equivalente)/km, las celdas de combustible, operando con hidrógeno producido a partir del GN, producen 0.93 g (CO<sub>2</sub> equivalente)/km [Kruger, 2006].

## Producción de hidrógeno

La producción mundial actual de hidrógeno es de 45 millones de toneladas año; la mayor parte, esto es, 96% es obtenida a partir del gas natural, y solo el 4%, a partir de la disociación del agua mediante electrólisis. El 50% del hidrógeno producido se utiliza en la industria química para producir amoníaco que se emplea en fabricar fertilizantes y explosivos, 37% se produce y utiliza en la industria del petróleo, 8% en la fabricación de metanol y 5% para procesos de metalurgia y aplicaciones químicas, analíticas y espaciales [IEA, 2005] y [Bravo, 2006].

El Departamento de Energía de Estados Unidos estima que se necesitarían unos 150 millones de toneladas en el 2040, solo para las aplicaciones en el transporte vehicular. El consumo medio de un automóvil se estima en un kilogramo de hidrógeno cada 100 km, o unos 200 kg al año, suponiendo recorridos del orden de 20.000 km [Bravo, 2006].

Actualmente, la materia prima para la producción de hidrógeno proviene principalmente de los combustibles fósiles, gas, carbón y derivados del petróleo, o recursos renovables como el agua o la biomasa [Bravo, 2006]. En cuanto a las tecnologías de producción actuales se encaminan a la electrólisis y al reformado de gas natural.

En la tabla 5 se presentan las fuentes para la producción de hidrógeno, tecnologías de uso y los sectores que lo utilizan [CE, 2003].

**Tabla 5:** Fuentes para la producción de hidrógeno, sectores y tecnologías para su uso [CE, 2003]

Suministro	Carbón	Gas natural	Energías renovables				Eléctrica	Termo	
			Solar	Solar fotovoltaica	hidroeléctrica	Viento			
Demanda	Motores de combustión interna	Motores con celdas de combustible	Térmica	Electrólisis				Nuclear	nuclear
			Biomasa						
			Comercial	Residencial	Terciario	Poligeneración	Procesos de síntesis	Turbinas y máquinas de combustión interna	

Cuando el hidrógeno se produce por electrólisis son cuatro los parámetros básicos que afectan el costo final del hidrógeno: costo de la electricidad, costo de la tecnología del electrolizador, longitud de la tubería de distribución y del valor de la disminución de la contaminación

del aire. Algunos estudios que tienen en cuenta estos cuatro factores estiman un costo de USD 25/ GJ (USD 3,125/kg) [Kruger, 2006].

En la tabla 6 se resumen las tecnologías, fuentes, tipo de producción de hidrógeno y los costos proyectados para el año 2030. Se destaca que los costos de producción serán competitivos a mediano y largo plazo.

**Tabla 6 :** Costos de producción de hidrógeno para varias tecnologías y fuentes proyectado para 2030. Adaptado de [IEA, 2005]

Tecnología		Producción	Costo US\$/GJ
Electrólisis		Descentralizada	12.5 a 25
Combustibles fósiles	Gas natural sin captura de CO <sub>2</sub>	Descentralizada	10 a 15
		Centralizada	5 a 7.5
	Gas natural con captura de CO <sub>2</sub>	Centralizada	6 a 8
	Gasificación carbón CC	Centralizada	7 a 10
Disociación del agua a alta temperatura	Nuclear	Centralizada	7.5 a 20
	Calentamiento solar	Centralizada	20 a 30
Biomasa		Centralizada	12 a 16
Fotoelectrólisis			
Fotobiológica			

## Almacenamiento del hidrógeno

Como se mencionó anteriormente, el hidrógeno tiene una mayor energía por unidad de peso entre los combustibles, pero debido a la baja densidad (0.0899 kg/m<sup>3</sup> st lo que equivale a 11.1 m<sup>3</sup> st/kg) la energía por unidad de volumen es de las más pequeñas. Por ejemplo, si se tiene en cuenta que un kilogramo de hidrógeno es aproximadamente igual a un galón de gasolina en el sector automotriz,



un tanque de un auto de 15 galones puede requerir uno de 167 galones para un contenido equivalente de energía con hidrógeno gaseoso [Kruger, 2006]. Por esto es preferible almacenarlo en estados más condensados para conseguir una buena relación entre la energía almacenada, el volumen y peso del sistema de confinamiento [Bravo, 2006].

En la actualidad se dan tres formas de almacenamiento: almacenar el hidrógeno en estado gaseoso a alta presión, en estado líquido a temperaturas criogénicas y en asociación física o química con otros materiales (hidruros, materiales carbonosos, entre otros.) [Bravo, 2006].

El almacenamiento en forma gaseosa en el rango de 350 a 700 bares y en forma líquida a (-253°C) está comercialmente disponible, pero son opciones costosas. El costo de los tanques varía entre los USD 600-800/kg H<sub>2</sub> y se requiere de energía eléctrica para la compresión y la licuefacción que es más del 12% y 35% de la energía contenida en el hidrógeno. En la actualidad la opción más atractiva para el sector transporte es la compresión a 700 bar [IEA, 2005].

---

La energía teórica para la licuefacción del hidrógeno es de 3.2 kWh/kg pero la energía actual es de 13 a 14 kWh/kg. Así la energía necesaria para producir hidrógeno por electrólisis a 800 bar es de 53 kWh/kg y para la producción de hidrógeno líquido es de 64 kWh/kg. Esto quiere decir que si el costo de la energía eléctrica es de 5¢/kWh el costo de del hidrógeno gaseoso sería de US\$2.65/kg, y el del líquido, de US\$3.2/kg [Kruger, 2006].

---

Típicamente el hidrógeno se distribuye en camiones que lo transportan en estado gaseoso a alta presión o en estado líquido. Los tanques para gas a alta presión son muy pesados, lo que limita la capacidad de transporte y aumenta el costo de distribución. Los tanques para transporte de hidrógeno líquido son más livianos debido a

que operan a presiones bajas (1 a 10 atmósferas). De acuerdo con esto, un tanque que transporte hidrógeno líquido tiene 10 veces más hidrógeno que un tanque de hidrógeno gaseoso comprimido [Berry & Aceves, 2006].

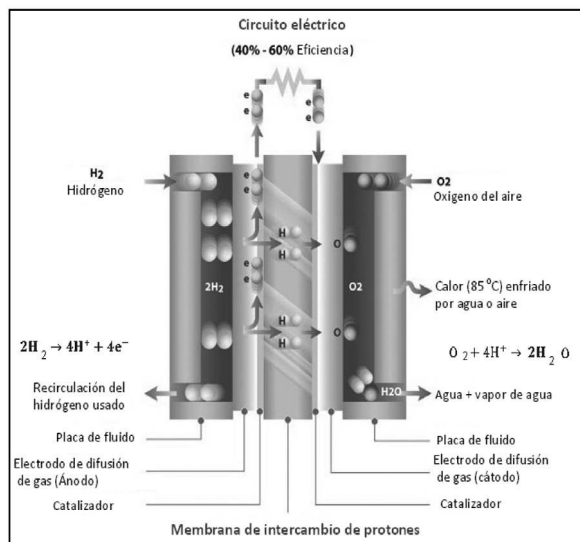
## Celdas de combustible

Las celdas de combustible consisten en aparatos que, en un proceso electroquímico y con la ayuda de un catalizador, transforman la energía química de un combustible, que por lo general es el hidrógeno, en electricidad y agua, y dan la posibilidad de conectarlas a motores eléctricos para impulsar vehículos. Esta transformación de energía química a eléctrica se da con un alto rendimiento (>50%), y no requiere partes móviles y prácticamente no emite contaminantes. Las pilas de combustible se ven como uno de los principales medios que en el futuro disminuirán la presión medioambiental ocasionada por la dependencia de los combustibles fósiles. Las ventajas incluyen: mayor eficiencia de conversión energética que los procesos de combustión, cero o muy baja emisión de gases contaminantes dependiendo del combustible de partida, flexibilidad en el combustible y ausencia de ruido [Bravo, 2006].

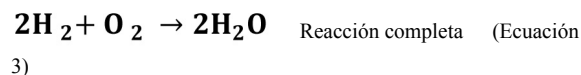
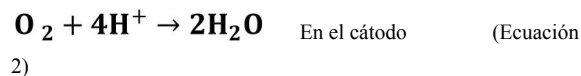
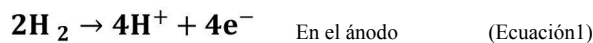
## Principio de funcionamiento

En la ilustración 5 se presenta como el hidrógeno (H<sub>2</sub>) ingresa a una cámara en contacto con el electrodo negativo que se llama ánodo para disociarse en presencia de un catalizador, en iones positivos H<sup>+</sup> y electrones. Los electrones siguen un camino eléctrico hasta llegar al otro electrodo llamado cátodo. El cátodo está en contacto con una cámara por donde ingresa oxígeno (O<sub>2</sub>) que viene del aire el cual también se disocia en presencia del catalizador en iones O<sup>-</sup>. A través de un electrolito los iones positivos del hidrógeno ven un camino para llegar al cátodo, se mezclan con los iones de oxígeno y se convierten en agua.

**Ilustración 5:** Principio de funcionamiento de una celda de combustible adaptada de [Ballard, 2010], [Kruger, 2006]



Las reacciones que tiene lugar en la celda de combustible son [Kruger, 2006]:



La celda de combustible de membrana de intercambio de protones PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) se perfila como la tecnología que se utilizará en los futuros vehículos equipados con celdas de combustible; su eficiencia es mayor de 40% [IEA, 2005] y [Bockris, Reddy, & Amly, 2003]. Para el año 2005 el costo de las PEMFC supera los 2.000 USD/kW pero con la disminución de costos y economías de escala pueden llegar a 100 USD/kW; sin embargo, para que sean consideradas como competitivas deberán caer por debajo de 50 USD/kW. Los vehículos con celdas de combustible podrían tener un sobre costo de USD 2.200 a USD 7.600 por vehículo comparándolo con los motores de combustión interna.

En un estudio de la proyección del mercado de las celdas de combustible en Alemania, se parte de

un precio de € 62.000 por vehículo con celda de combustible en 2013 sin subsidio para llegar a € 28.000 por vehículo en 2014 con subsidios [Keles & Wietschel, 2008].

En la actualidad hay múltiples proyecciones del desarrollo de las celdas de combustible en diferentes países y en el mundo. Por ejemplo, en Berry & Aceves [2006] se proyecta que en los Estados Unidos se van a introducir las celdas de combustible a gran escala a partir del año 2015, que todos los vehículos nuevos operarán con hidrógeno en el año 2040 y que todos los vehículos funcionarán con hidrógeno en el 2050.

En Hollinshead, Eastman, & Etsell [2005] se hace una proyección del mercado de las celdas de combustible, donde la comercialización del primer 10% se logra al eliminar las externalidades de la tecnología convencional, y el mercado entre el 10% y el 90% se logra por la eficiencia y los costos evitados de la nueva tecnología. Algunas de estas externalidades tienen que ver con las barreras culturales para adoptar nuevas tecnologías y pueden retrasar el ingreso de las celdas de combustible [IEA, 2005].

Por otra parte, en Kruger [2006], se estima que se requieren entre 15 y 20 años para que ocurra el crecimiento exponencial de vehículos con celdas de combustible y el suministro de celdas de combustible desde una producción inicial en busca de una reducción de la demanda de combustibles fósiles.

### **Conviencia de incorporar celdas de combustible en el sector transporte del Valle de Aburrá**

Lo presentado anteriormente muestra la conveniencia de incorporar la celdas de combustible en el sector transporte en el mundo y en el Valle de Aburrá. El aumento de población provoca un aumento del consumo energético y aumento de las necesidades de transporte que, a su vez, requiere de energía. El sistema de transporte convencional con motores de combustión interna depende casi en su totalidad de los derivados del petróleo, combustibles que causan contaminación

y calentamiento global, además de empezar a escasear y a aumentar de precio, afectando la sostenibilidad del sistema de transporte. Los productos de la combustión contaminan, producen enfermedades, calentamiento global, deterioro del hábitat, y deterioro de la capa de ozono, lo que, a su vez, provoca detrimento económico y social para las regiones. Los vehículos de combustión interna se caracterizan por su baja eficiencia y afectan aún más la disponibilidad de recursos energéticos no renovables.

Las celdas de combustible que trabajan con hidrógeno son convenientes para el transporte por tener la posibilidad de operar con energías renovables, por disminuir considerablemente el impacto ambiental y por ser más eficientes; de esta forma mitigan muchos de los inconvenientes presentados por los vehículos convencionales. Se suma a esto que para mediano y largo plazo se dispondrá de un mercado competitivo desde el punto de vista económico y tecnológico de los vehículos con celdas de combustible, lo que constituye una oportunidad de desarrollo sostenible para la región. La investigación y el desarrollo tecnológico en la producción de hidrógeno, y su uso en las celdas de combustible son oportunidades para que la Universidad se involucre en la solución del problema de movilidad del Valle de Aburrá.

## Conclusiones

La población está aumentando y con ello la necesidad de transporte de las personas, por lo tanto, el número de vehículos también está en aumento.

La contaminación derivada del el sistema de transporte actual provoca impactos negativos para la salud y el medioambiente.

El CO<sub>2</sub> es un gas de efecto invernadero que trae como consecuencia el calentamiento global, lo que desencadena hambre, deterioro económico, y afectación para la salud y para los patrones socioculturales. Las emisiones de CO<sub>2</sub> están estrechamente ligadas al consumo de energía,

especialmente en el sector transporte. Esta energía proviene principalmente de los derivados del petróleo, el cual cada vez es más difícil de encontrar y producir y es más costoso. La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera aumenta desproporcionadamente, y de no tomarse medidas eficientes las consecuencias para la tierra y sus habitantes pueden ser irreversibles.

Se deben definir mecanismos para valorar los efectos de la contaminación en proyectos que tengan que ver con el transporte y el consumo energético. Por lo general estos proyectos se valoran con criterios técnicos y económicos pero no se valoran los impactos negativos al medioambiente y la salud.

---

---

Los motores de combustión interna usados en el transporte convencional desperdician más del 75% de la energía suministrada, situación complicada si se tiene en cuenta la escasez de la principal fuente de energía utilizada en la actualidad.

---

---

Colombia y el Valle del Aburrá no son ajenos a la problemática de movilidad: se presenta un aumento de la circulación de vehículos y la contaminación por la emisión de gases con sus consecuencias para la salud, el medioambiente y la economía. La disponibilidad energética basada en derivados del petróleo es limitada y su costo aumenta, lo que invita a pensar en el uso de otras fuentes energéticas.

Para ayudar a mitigar algunos de los efectos provocados por el transporte en la Valle del Aburrá se pueden incorporar tecnologías que se están desarrollando en el mundo como son las celdas de combustible que funcionan con hidrógeno.

La utilización del hidrógeno en el sector transporte es estratégica por permitir la sustitución de combustibles fósiles cada vez más escasos y costosos y por la reducción de la contaminación del aire. La energía para producir el hidrógeno puede provenir de las energías renovables como la solar, la eólica y la hidráulica.

Por su parte, las celdas de combustible pueden

funcionar con hidrógeno, son más eficientes que los motores de combustión interna, los niveles de ruido son menores y su única emisión al ambiente es vapor de agua.

Los habitantes del Valle del Aburrá tienen una responsabilidad ambiental que se asume a través de un proceso cultural, entendiéndose la cultura como toda la actividad del hombre que crea los elementos útiles y necesarios para su desarrollo.

## Bibliografía

Alcaldía de Medellín. (18 de Febrero de 2005). Sitio web: *medellin.gov.co*. Disponible en: [http://www.medellin.gov.co/alcaldia/jsp/modulos/N\\_admon/obj/documentos/asivamos/resumenlineabase.pdf](http://www.medellin.gov.co/alcaldia/jsp/modulos/N_admon/obj/documentos/asivamos/resumenlineabase.pdf). Fecha de consulta: 18 febrero 2011.

AM. (2007). *Plan Integral de Desarrollo Metropolitano (Metropoli 2008-2020), hacia la integración regional sostenible*. Área Metropolitana.

Ballard (2010). Disponible en: [http://www.ballard.com/About\\_Ballard/Resources/How\\_Fuel\\_Cells\\_Work.htm](http://www.ballard.com/About_Ballard/Resources/How_Fuel_Cells_Work.htm). Fecha de consulta: 27 febrero 2010.

Bardi, U. (2009). Peak oil: the four stages of a new idea *Energy Policy*, núm. 34, págs. 323–326.

Berry, G. D., & Aceves, S. M. (2006). La economía del hidrógeno como solución al problema de la estabilización del clima mundial. (U. d. Guanajuato, Ed.) *Acta Universitaria*, núm. 6 (1), págs. 5-14.

Bockris, M., Reddy, J. O., & Amly, K. (2003). *Electroquímica moderna* (Vol. 2). Barcelona, España: Reverté.S.A.

Bravo, J. (2006). *Hidrógeno y pilas de Combustible, Estudio de prospectiva*. Madrid: Fundación OPTI, CIEMAT e INASMET-TECNALIA. Disponible en: <http://www.opti.org>.

CE. (2003). *Hydrogen energy and fuel Cells a*

*vision of our future directorate-general for energy and transport*. Final report of the high level group, Comunidad Europea, Directorate-General for Energy and Transport, Bélgica.

Chaparro, L. R., & Cuervo, M. P. (2001). “Emisiones al ambiente en Colombia”. En: IDEAM, *El medio ambiente en Colombia* (2 ed., págs. 531- 543). Bogotá, Colombia.

Claus, D., & Wietschel, M. (2008). “Externalities of the transport sector and the role of hydrogen in a sustainable transport vision”. *Energy Policy* núm. 36, págs. 4069-4078.

Clavijo, S. (2009). *Choques petroleros, marco regulatorio e inversión extranjera*. ANIF, Centro de estudios económicos.

CORPODIB. (2004). *Determinación de la contaminación ambiental debida al porcentaje de evaporación en las gasolinas colombianas*. Informe final. Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología, Bogotá.

Ecopetrol. (2009). *Ecopetrol energía para el futuro*. Disponible en: <http://portal.ecopetrol.com.co/>. Fecha de consulta: 25 marzo 2009.

Ecopetrol. (2006). *El mejoramiento en la calidad de los combustibles de ECOPETROL S. A*. Presentación, Bogotá.

EIA. (2009). *Annual Energy Review 2008*. Reporte, Energy Information Administration, Energy, Washington.

Foster, P., & Ramaswamy, V. (2007). *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University, New York, USA.

Fuglestedt et al. (2007). “Climate forcing from the transport sectors”. *Center for International Climate and Environmental*

*Research (CICERO).*

- Fuglestedt, J., & Shine, K. (2009). "Transport impacts on atmosphere and climate". *ScienceDirect*, núm. 30.
- Hollinshead, M. J., Eastman, C. D., & Etsell, T. H. (2005). "Forecasting performance and market penetration of fuel cells in transportation". *Fuel cells bulletin, 2005. Núm. 12*, págs. 10-17.
- IDEAM. (2006). *Estrategias de reducción de incertidumbre de las variables básicas en la estimación de gases de efecto invernadero (GEI) (módulos cambio en el uso de la tierra y silvicultura, Energía-sector transporte y agricultura)*. Bogotá: Cargraphics S.A.
- IEA. (2005). *Prospects for hydrogen and fuel cells*. (E. I. Agency, Ed.) Paris, Francia: Stedí Média.
- IEA. (2003). *The utilisation of CO<sub>2</sub>, zero emissions technologies for fossil fuels*. Reporte, International Energy Agency, Paris.
- JC&L. (2007). *El hidrógeno y las pilas de combustible*. Junta de Castilla y León.
- Keles, D., & Wietschel, M. (2008). "Market penetration of fuel cell vehicles – analysis based on agent behaviour". (Elsevier, Ed.) *International Journal of Hydrogen Energy*, núm. 33 (16), págs. 4444-4455.
- Kruger, P. (2006). "Alternative energy resources, the quest for sustainable energy (1 ed.)". USA: John Wiley & Sons.
- Kruger, P. (2001). "Electric power requirement for large-scale production of hydrogen fuel for the world vehicle". *International Journal of Hydrogen Energy*, núm. 26, págs. 1137-1147.
- Martínez López, E., & Bedoya Vealásquez, J. (2007). *Contaminación atmosférica y efectos en la salud de la población de Medellín y su Área Metropolitana (documento 2)*. Centro de Investigaciones, Facultad Nacional de Salud Pública. Medellín: Área Metropolitana.
- Martínez López, E., & Quiroz, C. M. (2007). *Contaminación atmosférica y efectos en la salud de la población de Medellín y su Área Metropolitana*. Centro de Investigaciones, Facultad Nacional de Salud Pública. Medellín: Área Metropolitana.
- MME. (2007). *Resolución 18 0158 de febrero 2 de 2007*. Resolución, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá.
- Moriarty, P., & Damon, H. b. (2008). "The prospects for global green car mobility". *Journal of cleaner production*, núm. 16, págs. 1717-1726.
- Motavalli, Jim. (2001). *Forward Drive*. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=zVXQf9as6XgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=motavalli+forward+drive&ots=bvc79PRz67&sig=KoUyiHe-H57dRmOVXfhd1Z3KfzA#v=onepage&q&f=false>. Fecha de consulta: 10 septiembre 2011.
- Nada Zamel, X. L. (2006). "Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada". Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo. (U. o. Department of Mechanical Engineering, Ed.) *Journal of Power Sources*, núm. 155, págs. 297-310.
- NU. (2009). *Informe de la reunión de expertos sobre comercio y cambio climático: oportunidades y desafíos de comercio e inversión en el marco del mecanismo para un desarrollo limpio (MDL), Celebrada en el palacio de las naciones, los días 27 a 29 de abril*. Reunión de expertos, Naciones Unidas, Ginebra.
- Osses, M., & Montero, C. (2001). Vehículos híbridos. (U. d. Departamento de Ingeniería Mecánica, Ed.) *Ciencia abierta*, núm. 13 (3), págs. 1-9.
- PNUMA. (2008). *Cambio climático 2007: informe del grupo intergubernamental de expertos*

sobre el cambio climático informe de síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra.

Sepúlveda Villada, L. A. (2007). “Sostenibilidad ambiental en el sector transporte”, transporte más limpio, caso: clúster corredores viales jurisdicción CORANTIOQUIA. Subdirección de calidad ambiental. Medellín: CORANTIOQUIA.

Solo Energía. (2004). *Solo Energía*. Disponible en: <http://www.soloenergia.com.ar/aprendamas/petroleo/reservas.html>. Fecha de consulta: 12 julio 2011, de UPB. (2006). *Estudio de emisión y dispersión de contaminantes para condiciones de cambio de combustible*. Medellín: Área Metropolitana del Valle del Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana.

UPB. (2007). *Universidad Pontificia Bolivariana*.

Convenio 289 de 2006. *Actualización de Inventarios de emisiones atmosféricas 2007 MODEAM*. Medellín: Área Metropolitana de Valle de Aburrá.

UPME. (2008). *Boletín estadístico de minas y energía 2002-2007*. Bogotá: Unidad de planeación Minero.

UPME. (2009). *Boletín estadístico de minas y energía 2003-2008*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.

UPME. (2007). *Plan energético nacional 2006–2025: contexto y estrategias*. (U. d. Energética, Ed.) Bogotá, Colombia: Scripto Ltda.

UPME. (2007). *Proyección De Demanda Gas Natural PEN 2006-2025*. Documento, Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá.