



**UNIVERSIDAD LATINOAMERICANA DE CIENCIA Y
TECNOLOGIA**

**CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EMPRESARIAL
POSTGRADO**

MAESTRIA EN ADMINISTRACION DE EMPRESAS

CON ENFASIS EN MERCADEO

INVESTIGACION EMPRESARIAL APLICADA

Artículo Científico

**“Tecnología del hidrógeno, rentabilidad sostenible para las
empresas de transporte en Costa Rica”**

Profesor: Luis Enrique Porras, MBA.

Alumna: Arlyn García Jiménez

Junio 2007

Tecnología del hidrógeno, rentabilidad sostenible para las empresas de transporte en Costa Rica

Arlyn García Jiménez¹

Resumen

Las proyecciones mundiales indican que los combustibles fósiles tienen reservas para los próximos cuarenta años, y prácticamente todos los requerimientos de energía para satisfacer las necesidades de la vida moderna se extraen de estos combustibles, se derivan de ellos o reciben su influencia de algún otro modo. Es urgente plantear nuevas soluciones energéticas, que sean sostenibles y renovables, y que puedan resolver los problemas ambientales, con precios más accesibles que los del petróleo y que no causen contaminación.

Actualmente, existe el reto de impulsar toda tecnología que busque reducir los costos país, y que disminuya la factura de importación petrolera, específicamente en las áreas de energía. Para lograr este objetivo, en este artículo se pretende demostrar que es factible, desde el punto de vista financiero, que las empresas puedan sustituir sus flotillas vehiculares (transporte público) por otras con diferente tipo de tecnologías, en este caso el hidrógeno, que representa una menor contaminación del medio ambiente y es menos onerosa.

Palabras clave: Celdas de combustible, hidrógeno, transporte público, desarrollo sostenible.

Abstract:

The world-wide projections indicate that the fossils fuels have reserves for the next forty years, and practically all the aspects of the modern life extract his energy from these fuels, derive materially from them or receive their influence of some other way. Its urgent to consider preemptive energetic solutions, sustainable and renewable, so they can solve the environmental problems, looking for alternatives for the high prices of petroleum and contamination.

Actually we have the challenge to impel all technology that try to reduce to the country cost , diminishing the invoice of oil import, specifically for energy areas. In order to obtain this objective, in this article it pretends to prove how companies can financially replace their transportation equipment, in this case the hydrogen, and that it contributes with a smaller contamination to environment.

Keywords: Fuel Cells, Hydrogen, public transportation, sustainable development.

¹ Bachiller en Administración de Empresas con énfasis en Finanzas, candidata a máster en Administración de Empresas con énfasis en Mercadeo. Correo electrónico: arlynana@hotmail.com

1. Introducción

"I think water will be used one day as a fuel. Hydrogen and Oxygen will be an infinite source for heat and light" (Jules Verne, 1870).

Las empresas tienen dentro de sus costos variables el transporte, el cual depende principalmente de los derivados del petróleo. Con este trabajo se pretende impulsar la tecnología del hidrógeno, con el fin de motivarlos a sustituir los vehículos, sin que el cambio les signifique un costo adicional a mediano plazo, y que de paso se logre una mejor armonía con el medio ambiente.

De acuerdo con las proyecciones mundiales, se estima que los combustibles fósiles tienen reservas para los siguientes 38 años, de ahí la urgencia mundial energética de sustituir las fuentes actuales por medios sostenibles y renovables. Dentro de las soluciones se encuentran el uso del gas natural, etanol, energía solar y energía nuclear, entre otros. El hidrógeno, por su parte, es una tecnología naciente que promete competir con los vehículos que utilizan la gasolina y el diesel; sin embargo, todavía se encuentra en su etapa de desarrollo con proyectos iniciales de comercialización.

La mayoría de la energía que usamos en la actualidad proviene de combustibles fósiles; cada día utilizamos más energía, principalmente hulla (carbón), para producir electricidad.

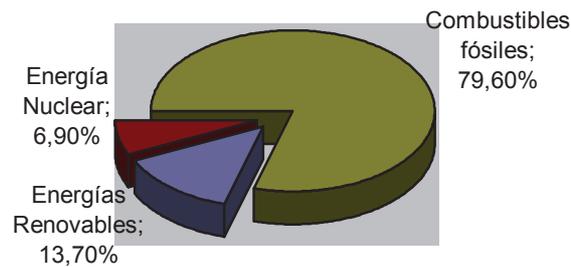
La disminución progresiva de las reservas de combustibles fósiles y los problemas de contaminación ambiental asociados a su combustión, han atraído la atención de los investigadores hacia la búsqueda de nuevas alternativas energéticas. El hidrógeno es uno de los portadores de energía más prometedor del futuro. Es de alta eficiencia; produce baja polución; y puede ser usado para transporte, calor y generadores de poder en lugares donde es difícil utilizar electricidad.

Corresponde al gobierno, específicamente el área de energía, impulsar toda tecnología que busque reducir los costos país, disminuyendo la factura de importación petrolera. Por decisión gerencial, le corresponde a la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, S.A. (CNFL) desarrollar esta labor, por lo que busca demostrar a las empresas cómo pueden sustituir sus flotillas vehiculares con este tipo de tecnologías, y que si bien es cierto que requieren una inversión inicial más alta, a mediano plazo, el costo es igual o menor por el ahorro que se genera y, a su vez, se contribuye con una menor contaminación del medio ambiente.

2. El problema energético

Las fuentes fósiles de energía son las más utilizadas a nivel mundial; según datos de la UNDP, al 2004, el 13,7% de la energía mundial provenía de fuentes renovables, y este número decreció un 0.2% y aumentó el porcentaje de energía atómica desde 1998.

Gráfico 1. Consumo mundial de energía primaria



Durante años, los especialistas han estado diciendo que nos restan menos de 40 años de disponibilidad de petróleo crudo. Ahora, algunos de los más importantes geólogos están sugiriendo que la producción de petróleo global podrá alcanzar su pico e iniciar un decaimiento abrupto al final de esta década, lo que va a elevar considerablemente los precios del petróleo.

Tabla 1. Disponibilidad de fuentes fósiles

Fuentes fósiles de energía	Años de disponibilidad
Petróleo	38
Gas natural	61
Carbón	248

Traducido y adaptado al 2007 con datos de World Energy Assessment: Overview 2004 Update, UNDP. (Pág. 28).

La economía de hidrógeno es la más deseable en el futuro para resolver los problemas ambientales y de suministro inherentes a los combustibles fósiles. El uso democrático del hidrogeno reducirá drásticamente las emisiones de dióxido de carbono y aliviará los efectos del calentamiento global. Como el hidrógeno es tan abundante, porque existe en todas partes, todos los seres humanos, una vez que

posean la tecnología, se tornarán productores de energía, lo cual resultará en el primer régimen de energía verdaderamente democrático de la historia.

2.1. Hidrógeno: características principales

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica; su símbolo es H, su número atómico es 1, su peso atómico es 1,0079. Es el elemento más abundante en el universo y totaliza casi el 75% de la masa del Sol.

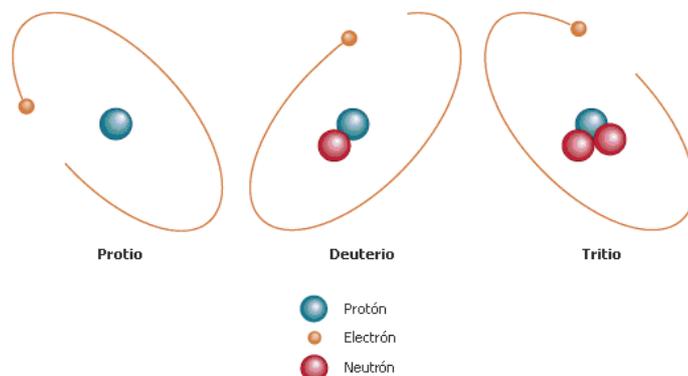
El hidrógeno siempre tiene un protón (+) en su núcleo, cuya carga está equilibrada por un electrón (-). Los isótopos del hidrógeno son:

1H: Protio, sin neutrones

2H: Deuterio, un neutrón (también conocido como Hidrógeno pesado)

3H: Tritio, dos neutrones.

Ilustración 1: Átomo de hidrógeno y sus isótopos



Enciclopedia Encarta, © Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido, altamente inflamable y no es tóxico, se quema en el aire, formando una llama azul pálido casi invisible. Es el más ligero de los gases conocidos, por esta razón, su manipulación requiere cuidados especiales para evitar accidentes, ya que bastan sólo 4 partes por 100 de aire para causar una explosión.

A pesar de ser un gas, no existe en forma natural en la tierra. Sólo se puede encontrar en forma compuesta. Combinado con oxígeno es agua (H₂O); y combinado con carbón, es una forma orgánica tal como el metano (CH₄), hulla y petróleo, entre otros. Se encuentra en todos los organismos crecientes (biomasa): azúcares, almidones, grasas y proteínas.

2.2. Producción del hidrógeno

Como el hidrógeno no se encuentra en forma pura en la naturaleza, solamente en compuestos, se tienen que buscar métodos eficientes y económicos para producirlo. Entre estos métodos se pueden mencionar:

2.2.1. Hidrógeno a partir de hidrocarburos: En este método, el hidrógeno se obtiene por la descomposición de hidrocarburos, haciendo pasar vapor de agua sobre choque caliente (residuo sólido de carbón y ceniza producto del calentamiento de hulla a altas temperaturas en ausencia de aire); se forman así monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H). Esta mezcla se llama "*gas de agua*", ya que ambas sustancias son combustibles.

Para obtener hidrógeno puro con este método, se trata la mezcla con vapor en presencia de un catalizador.

Otra forma utilizada es circulando una mezcla de gas natural como el metano (CH₄) y vapor de agua H₂O sobre un catalizador de níquel a alta temperatura; la reacción produce hidrógeno y dióxido de carbono CO₂. Esta es la forma como se produce actualmente en una escala industrial (9 Mtons/año en los EE.UU.), y la mayoría del hidrógeno obtenido se utiliza en fertilizantes y las industrias químicas.

Los recursos del gas natural serán suficientes para varias décadas, otras reservas tales como el carbón o materias de biomasa, se podían utilizar para generar el hidrógeno con procesos de reformación; sin embargo, estos recursos generan aproximadamente dos veces más CO₂ por la cantidad de hidrógeno producido.

Este factor pone una presión adicional en el desarrollo de métodos para la captura del carbono y el CO₂ producido.

2.2.2. Hidrógeno por electrólisis del agua: Dado que la fuente más abundante de hidrógeno es el agua, lo ideal es que este fuese el proceso más económico.

La electrólisis es un proceso electroquímico para romper la molécula de agua (H₂O) en sus elementos constitutivos (hidrógeno y oxígeno) por medio de energía eléctrica. La ventaja de este proceso es que provee un hidrógeno libre de impurezas del carbón y de sulfuros. La desventaja es que el proceso es costoso, comparado con la reformación del gas

natural, debido al costo de la energía eléctrica utilizada para conducir el proceso.

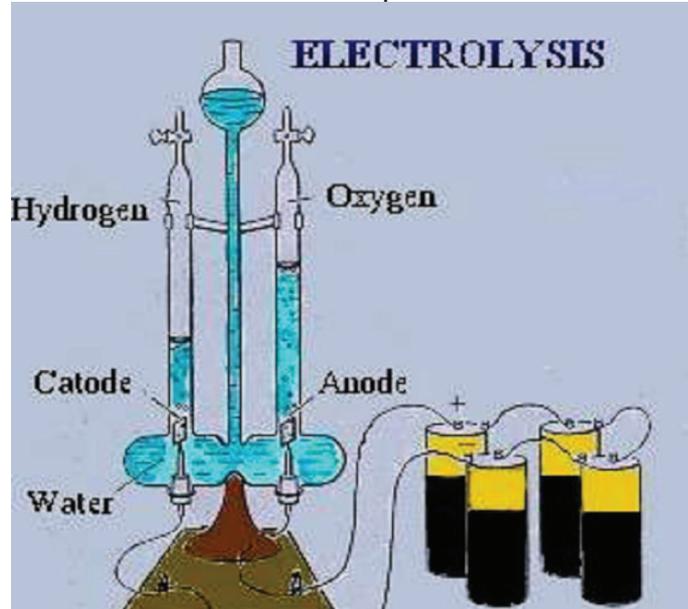
Físicamente, un electrolizador se diseña con dos electrodos sumergidos en una solución acuosa común llamada electrolito. La reacción se puede pensar que ocurre en dos "mitades de la celda" separadas por una membrana impermeable al gas del electrolito.

Debido a que el agua es una molécula muy estable, se requiere una entrada de energía eléctrica para producir la separación.

En principio, la reacción se puede realizar con un voltaje aplicado de 1.23 voltios;

en la práctica, los voltajes aplicados son algo más grandes 1.55-1.65 voltios debido a la lenta energía cinética que existe en las dos mitades de la celda.

Ilustración 2: Esquema de electrólisis



2.2.3. Otras formas de producción

Solamente se mencionan como ampliación de expectativas, pero no se describen en detalle:

Hidrógeno solar: es producido por la electrólisis del agua, donde la energía eléctrica utilizada es producida mediante celdas solares. También existen procesos de fotocatalisis, por separación fotobiológica o por procesos termales solares.

Hidrógeno de sistemas biológicos y de biomasa: a la captura de la energía solar basada en fotosíntesis puede seguir una biofotólisis; se parte del agua, la cual se separa en hidrógeno y oxígeno utilizando algas azul-verdosas o verdes.

Energía termal para la producción del hidrógeno: la producción del hidrógeno de fuentes de energía termales es una tecnología

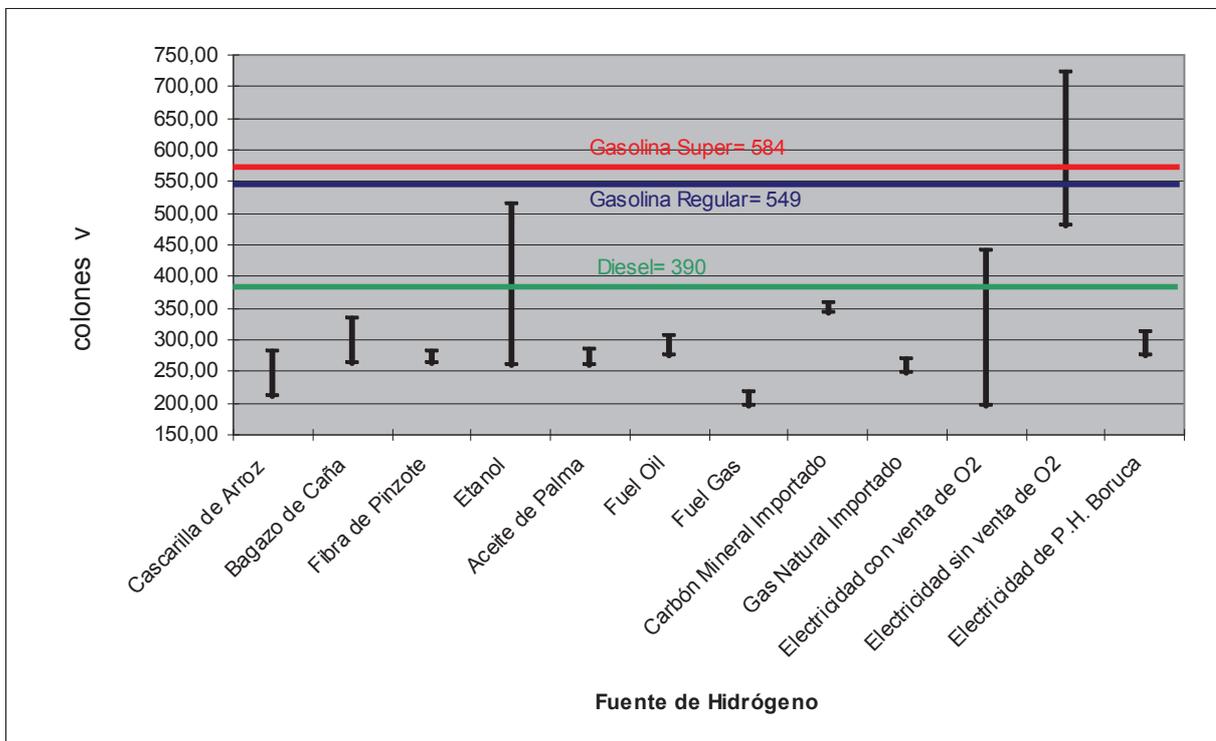
convencional; se basa en los procesos de conversión de la energía termal a la electricidad, y de la electricidad al hidrógeno y el oxígeno mediante la electrólisis del agua.

2.3. Costos de producción del hidrógeno

En el cuadro siguiente se demuestra que el costo del hidrógeno en la boca del tanque de un vehículo es competitivo con la mayoría de las fuentes posibles para Costa Rica, casi todas ellas renovables, cuando se comparan sus costos de producción contra el combustible hidrocarburado (diesel o gasolina) convencional.

Como se ve, las fuentes biomásicas nacionales son las más económicas, junto a la electricidad de grandes proyectos hidroeléctricos. Aún las fuentes fósiles de hidrógeno son competitivas, pero su costo aumentaría al considerar el costo de la captura del CO₂ emitido.

Gráfico 2. Costos mínimos y máximos de producción hidrógeno Fuente: Roldán y Spazzafumo (2006). Costos ajustados para el tipo de cambio de 519,03 colones por dólar, del 31 de mayo de 2007.



2.4. Almacenamiento de hidrógeno

Los desafíos que se establecen para que el hidrógeno se convierta en una fuente de energía útil son el almacenamiento y su entrega eficaz.

Por ser un portador de energía para varios usos, el hidrógeno requiere ser almacenado para su posterior utilización. Se debe tomar en consideración su almacenaje, para transportarlo desde el punto de producción hasta el lugar de uso, y luego la carga y descarga desde el contenedor que lo transporta.

2.4.1. Sistemas de almacenaje estacionarios: se utilizan para producción eléctrica en industrias y hogares; también para la calefacción y el aire acondicionado residencial, generación eléctrica de vecindad y muchos usos industriales.

Ilustración 3. Sistemas estacionarios de almacenamiento de hidrógeno

Gabinete de almacenamiento de hidrógeno Casete de almacenamiento de hidrógeno



2.4.2. Sistemas de almacenaje móviles: estos sistemas, en contraste con el anterior, funcionan con especificaciones mínimas del volumen y del peso, y almacenan el hidrógeno suficiente para que un vehículo recorra 500 kilómetros; además, debe efectuarse la carga y descarga cerca de la temperatura ambiente y proveer hidrógeno en rangos bastante rápidos, de forma que brinde energía para la locomoción de los automóviles y autobuses. Los requisitos de almacenaje del hidrógeno para los usos del transporte son hasta el momento más rigurosos y difíciles de alcanzar que para las aplicaciones móviles.

Ilustración 4. Ejemplo de tanque de almacenamiento de 5000 libras de presión



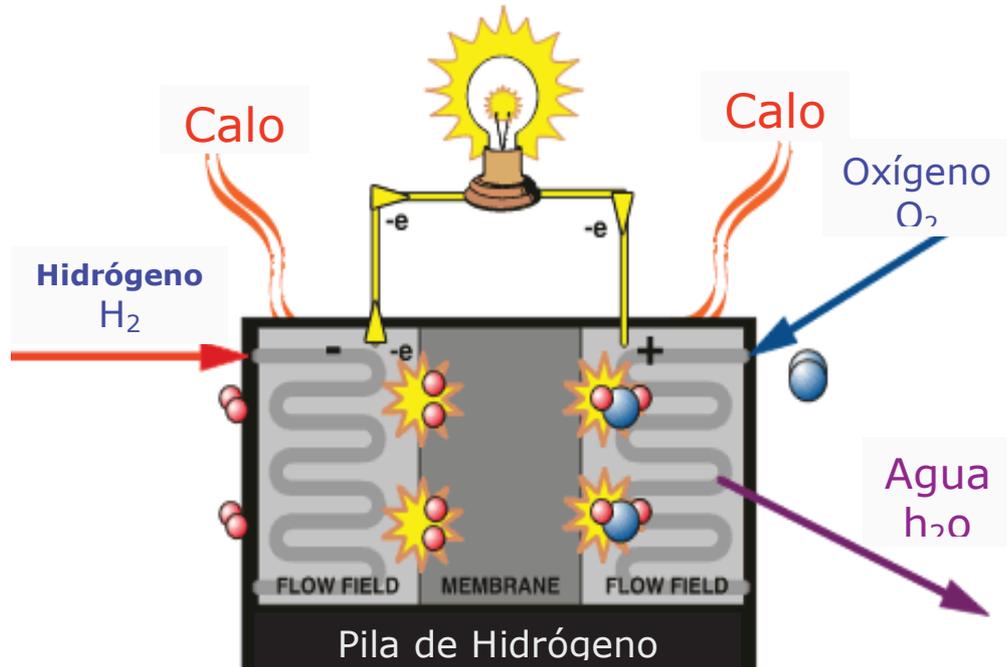
Un lapso de recarga de combustible de menos de 5 minutos se apunta para el 2015. La tecnología actual para el almacenaje del hidrógeno es en tanques en los cuales se almacena como un gas comprimido o como líquido superenfriado, donde es fácilmente accesible para el uso.

2.5. Potencia eléctrica con celdas de combustible

Las celdas de combustible proporcionan el paso final en una economía del hidrógeno, en la cual la energía química contenida por el hidrógeno se transforma directamente en potencia eléctrica y el residuo de esta reacción es agua pura y calor. La misma electroquímica que conduce la conversión del hidrógeno en electricidad en celdas de combustible también conduce la producción del hidrógeno por la electrólisis del agua. Estas dos tecnologías –electrólisis y celdas de combustible– encierran los medios limpios y sostenibles de la producción y del uso energético.

La celda de combustible fue inventada por Sir William Grove en 1839. En los años 50, la NASA construyó las primeras celdas de combustible prácticas para producir la energía para los vehículos espaciales.

Ilustración 5. Esquema simplificado de una celda de combustible

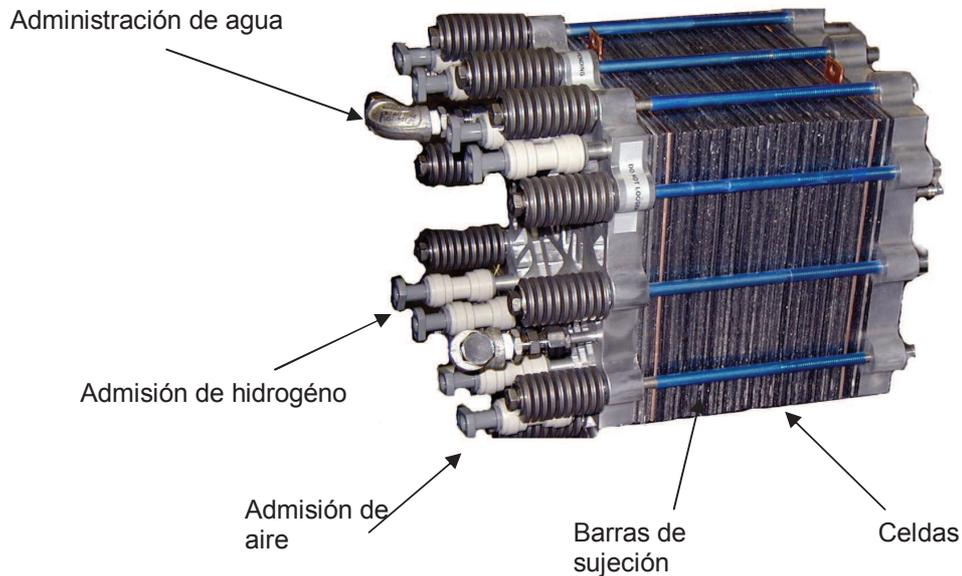


El bloque fundamental en la construcción de la celda de combustible es la celda electroquímica que consiste en dos electrodos separados por un medio iónico conductor (o membrana). El combustible se incorpora a la celda por el lado izquierdo y el oxígeno entra en el derecho; el producto de la reacción también debe salir de la celda. Mientras que se oxida el combustible, los electrones se lanzan para viajar a través del circuito externo, donde el oxígeno consume los electrones.

La ilustración 6 muestra las partes esenciales de una celda de combustible verdadera que se omiten en el diagrama: todo el envase y materiales de ayuda que mantienen fluyendo el combustible y el oxígeno (separados) y dirigen los productos de la reacción fuera de la celda, las interconexiones entre celdas y otras funciones.

Las estimaciones actuales de los costos del sistema de celda de combustible aplicables al transporte, para competir económicamente con el motor de combustión interna, se acercan a los US\$100/kW. En la actualidad, los costos para la producción con poco volumen son de alrededor de \$4,000/kW para los sistemas basados en hidrógeno.

Ilustración 6. Núcleo de celdas de 1.5 kW de potencia



La necesidad de reducir los costos por casi 40 veces señala un camino largo hacia la meta del uso automotor de las celdas de combustible; para los usos estacionarios, pueden ser viables costos mucho más altos en términos de dólares por kilovatio. La durabilidad de las celdas en usos del transporte es una cuestión clave que se ha amplificado en importancia mientras que la ingeniería de la celda de combustible se ha madurado. Se esperan 5.000 horas de vida útil, con base en un cálculo simple de un curso de la vida del vehículo de 250.000-kilómetros a una velocidad media de 50 km/h.

2.5.1. Celdas de combustible a alta temperatura

Otras celdas de combustible, las de óxido sólido (SOFC, por sus siglas en inglés) son la tecnología actualmente con más desarrollo, pero requieren altas temperaturas de operación (cerca de 800° C). Funcionan con una amplia gama de combustibles: gas natural, hidrógeno e hidrocarburos. Ellas pueden permitir una transición de los hidrocarburos al hidrógeno. Además, las celdas de óxido han demostrado un periodo de vida más largo que cualquier sistema de la celda de combustible. Un sistema de 100-kW fabricado por Siemens-Westinghouse ha producido con éxito la energía para más de 20.000 horas, sin ninguna degradación considerable en el funcionamiento. Sin embargo, estas celdas no son aplicables a sistemas móviles de transporte.

3. Aplicación del hidrógeno al transporte en Costa Rica

Durante muchos años, en los países desarrollados se aceptó que el consumo de energía debía crecer a un mismo ritmo que el desarrollo económico y social. Esto implicaba que si la producción industrial se duplicaba, debía doblarse el crecimiento energético. Esta teoría fue rota por países como Japón y Francia, que a finales del siglo pasado lograron producir más sin aumentar de forma paralela los consumos de energía y materiales.

En comunicación personal con el Ing. Erick Bogantes, Jefe del Depto. De Transporte Eléctrico de la CNFL el 23 de mayo de 2007, indica que si en Costa Rica se continúa con el crecimiento del consumo de energía al mismo ritmo que en la actualidad, se constituye un reto garantizar su abastecimiento. Al 2015, el consumo de energía se duplicaría y el consumo de electricidad se triplicaría.

La producción o importación de energía es una de las actividades que consumen mayor cantidad de recursos o divisas. Además, la producción de energía es una de las actividades humanas que podría producir un impacto importante en el ambiente. Por eso es imperativo definir una estrategia que nos permita garantizar que se produzca la energía necesaria con el menor impacto ambiental posible.

La producción de hidrógeno se haría a través de una energía renovable, la hidráulica, la cual se obtiene a partir del agua de los ríos. Se consideran energías renovables aquellas fuentes energéticas basadas en la utilización del sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal. No utilizan, pues, como las convencionales, combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural), sino recursos capaces de renovarse ilimitadamente. Su impacto ambiental en comparación con aquellas es muy escaso, pues además de no emplear esos recursos finitos, no generan contaminantes.

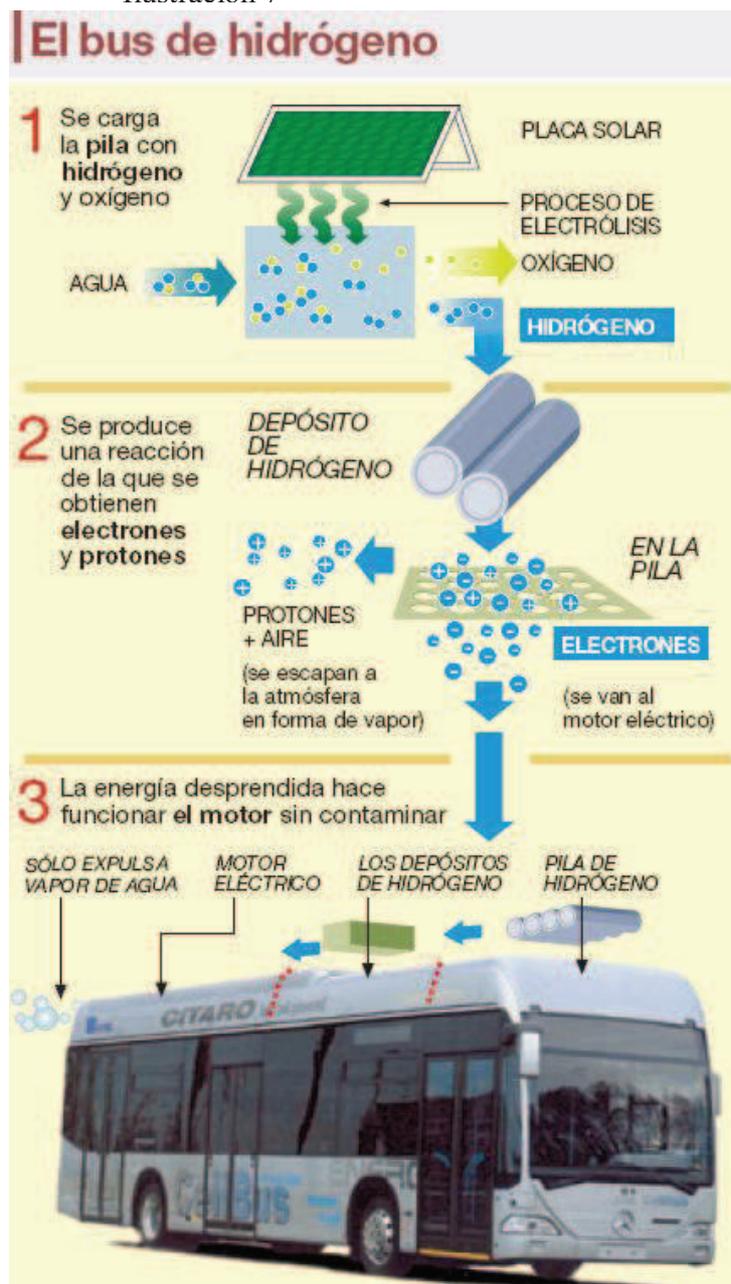
Se debe establecer un programa de investigación y aplicación de tecnología de hidrógeno para transporte masivo y autónomo, que tenga como fin buscar alternativas a los problemas crecientes en el aumento del precio de los derivados del petróleo, contaminación y congestión vehicular en el Gran Área Metropolitana.

A nivel de país, se debe realizar un esfuerzo nacional que aglutine los sectores involucrados: empresas de energía, empresas de transporte, entes financieros, investigadores académicos, usuarios, ambientalistas y otros.

3.1. El bus de hidrógeno

Los vehículos de celdas de combustible utilizan hidrógeno combinado con oxígeno del aire para generar electricidad y operar como autobuses eléctricos autónomos, sin depender de una línea elevada, ni de subestaciones eléctricas como en el caso del trolébus. Debido a que el subproducto de la reacción del hidrógeno con el oxígeno es solo vapor de agua, estos vehículos no producen emisiones de contaminantes.

La energía sería producida con recursos renovables, por lo que no produciría emisiones ni en el sitio de producción ni en el punto de uso final. Se considera que esta, en comparación con los hidrocarburos, es una alternativa carbono neutral limpia y sostenible.



3.2. Inversiones

Las inversiones consideradas en un proyecto de transporte a hidrógeno son para la obra civil (calles, vías y estaciones) iguales a las requeridas para tecnología hidrocarburada convencional. Las diferencias de inversión se dan en el equipo rodante y su sistema electrolizador requerido para la producción del hidrógeno.

Se realizó una investigación de la oferta existente en el mercado de transporte público nacional, y se encontraron los siguientes precios unitarios para dos tipos de vehículo: buseta y autobús:

Tabla 1. Precio de nuevos autobuses y busetas en el mercado local

MARCA	CAPACIDAD EN PASAJEROS	TIPO DE CARROCERÍA	PAÍS DE ORIGEN	COMBUSTIBLE	PRECIO EN DÓLARES
HYUNDAI	28 + 1 = 29	Microbús country	Corea	Diesel	US\$ 53.000,00
TOYOTA	29 + 1 = 29	Microbús "coaster"	Japón	Diesel	US\$ 72. 000,00
MERCEDES BENZ	45 + 1 = 46	Autobús urbano	Brasil	Diesel	US\$ 80. 000,00
DAEWOO	46 + 1 = 47	Autobús urbano	Costa Rica	Diesel	US\$ 60.000,00

Fuente: Investigación propia en el mercado local.

Según la ley 7600, los autobuses urbanos deben tener rampa para los usuarios con discapacidad; las busetas no cuentan con este sistema, solo bajo pedido especial.

Para los autobuses de hidrógeno, resultó más difícil obtener un costo unitario, ya que actualmente se fabrican solo bajo pedido especial y los costos asociados a la producción están sobrecargados con otros rubros como investigación, administración de los proyectos y otros.

El costo aproximado de cada bus a hidrógeno en este momento de etapa demostrativa varía de US\$800.000,00 para busetas, a US\$1.200.000,00 para un bus de tamaño convencional.

Tabla 2 Vehículos de hidrógeno

<p>PRODUCT NAME TRANSIT BUS</p>  <p>MANUFACTURER SYNERGY FLEET</p>	<p>PRODUCT # 13-100-M</p> <p>SPEED: 65 Miles Per Hour</p> <p>RANGE: 200 mile Hybrid</p> <p>PURPOSE: 35 Passenger Composite Transit Bus in Diesel or Fuel Cell</p> <p>PRICE: \$380,000 - \$800,000</p>	<p>Buseta para 35 pasajeros</p> <p>Costo US\$800.000</p>
		<p>Autobús para 45 pasajeros</p> <p>Costo US\$1.200.000</p>
		<p>Autobús para 45 pasajeros</p> <p>Costo US\$500.000</p> <p>Aún no disponible en el mercado</p>

3.2.1. Fuentes de financiamiento

Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE): El BCIE ofrece información detallada en el documento *El mercado de carbono bajo el Protocolo de Kyoto y oportunidades de intervención para el BCIE (2006)*, elaborado por Sol Villa Miel a.m., junio 2006, para el proponente dispuesto a invertir y desarrollar proyectos de intención en el campo ambiental y relacionados con la reconversión de fuentes energéticas contaminantes, protección y conservación del patrimonio natural de la región; así como a incrementar el financiamiento del

Banco para programas y proyectos amigables con el ambiente, identificar y mitigar impactos ambientales o adversos y promover el mercado de carbono.

El BCIE incentiva la búsqueda de la sostenibilidad ambiental de la región dada la creciente demanda energética en Centroamérica, y promueve la generación de energía limpia que reduzca la dependencia de los combustibles fósiles y los niveles de emisiones contaminantes, mediante el financiamiento y participación accionaria en la inversión en proyectos, bajo la forma de préstamos convencionales, participaciones accionarias, préstamos subordinados y financiamiento sindicado o cofinanciamiento directo o intermediado, y los enfoca en actividades de eficiencia energética y energías renovables.

Fondo Mundial para el Medioambiente (GEF): Es una entidad financiera que costea proyectos de conexión de retos del medio ambiente y las medidas para conservar la diversidad biológica y disminuir los riesgos del cambio climático, proteger la capa de ozono y mitigar la contaminación. El GEF ha desarrollado el financiamiento de proyectos demostrativos con buses de hidrógeno en las mayores capitales del mundo en desarrollo: Beijing, El Cairo, México D.F., Nueva Delhi, São Paulo y Shangai. Un total de casi US\$60 millones en fondos GEF han sido propuestos para financiamiento, y casi US\$36 millones han sido aprobados.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD: Esta entidad opera asociada con el GEF en proyectos para ayudar a reducir las emisiones y gases de efecto invernadero producidas por el transporte, de las cuales se proyecta que en el 2010 las de los países en desarrollo superarán las emisiones de los países desarrollados.

3.4. Rentabilidad

3.4.1. Costos de operación

Entre las alternativas evaluadas, se consideran invariables los costos de operación, los costos de planillas, administración, utilidades y otros, es decir, que no hacen una diferencia en la evaluación del proyecto. Entonces la evaluación se centra en el monto de la inversión inicial, unas diez veces mayor para el equipo a hidrógeno y los costos del combustible. El diesel derivado de petróleo para autobús convencional hidrocarburado y el hidrógeno de fuentes renovables para el autobús de hidrógeno.

El costo del diesel se tomó al costo de punto fijo, es decir, el costo de venta en los planteles de RECOPE para clientes mayoristas.

Este escenario de evaluación utiliza una ruta urbana en San José, de 12 Km de recorrido por sentido, por viaje.

Plantilla de cálculo de costos de energía			
Autobús			
Cantidad de buses	1		
Viajes diarios por bus	9,00		
Kilómetros por viaje	12		
Días de operación por mes	21		
Total de kilómetros recorridos por bus, por mes	2.268,00		
Consumo medio lt x km por unidad	0,42		lt
Costo diesel (mayo del 2007)			
	358,48		
Total del consumo mensual del diesel (nota 2)	952,56		lt
Costo total de la flota de diesel	341.473,71		colones
Tipo de cambio BCCR (al 31 de mayo)	<u>Venta</u>		519,03
Costo total del diesel por mes	657,91		US\$
1-Fuente	http://www.recope.go.cr/index.htm		
Rigen a partir del 18 de mayo de 2007			
Productos	Precio/ litro sin imp. único	Imp. único	Precio/litro total
Diesel			
Precios publicados en <i>La Gaceta No. 94 del 17 de mayo de 2007</i>	271,98	86,50	358,48
2- Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP): MÉTODO DE CÁLCULO DE LA TARIFA QUE UTILIZA EL MODELO			
VIGENTE, DESARROLLADO POR EL MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES (MOPT), "ECONOMÉTRICO"			
Consumo 0,42 lt/Km			

El costo de operación por combustible diesel es de 341.473 colones mensuales por cada bus que se incorpore en la flotilla.

3.4.2. Ingresos

Como ingresos del proyecto se consideran los ahorros producidos al utilizar hidrógeno en lugar de diesel en la flota de transporte. El costo del pasaje al usuario no se considera en la evaluación y asumimos que es indiferente de la tecnología.

Plantilla de cálculo de costos de energía		
Autobús de hidrógeno		
Cantidad de buses	1	
Viajes diarios por bus	9,00	
Kilómetros por viaje	12	
Días de operación por mes	21	
Total de kilómetros recorridos por bus, por mes	2.268,00	
Consumo medio lt x Km por unidad	0,42	lt
Costo del hidrógeno (mayo del 2007)	275,00	
Total del consumo mensual del hidrógeno (nota 2)	952,56	lt
Costo total de la flota de autobuses de hidrógeno	261.954,00	colones
Tipo de cambio BCCR (al 31 de mayo)	Venta	519,03
Costo total del hidrógeno por mes	504,70	US\$

El costo de operación por combustible hidrógeno es de 261.954,00 colones mensuales, por cada autobús que se sustituya en el parque de equipo rodante. Los ingresos mensuales corresponden al ahorro por la diferencia entre ambas alternativas de combustible; en este caso, la operación es 79.520,00 colones más económica con hidrógeno que con diesel derivado de petróleo.

3.4.3. Flujo de caja

El supuesto de evaluación aplicado es que el análisis no es para los ingresos de los netos del concesionario, sino que solo considera los costos incrementales de migrar de buses de diesel a bus de hidrógeno.

ANÁLISIS DE COSTOS E INGRESOS								
COMPARACIÓN DE AUTOBUSES DE DIESEL- BUSES HIDROGENO								
(EN COLONES)								
CONCEPTO	HORIZONTE DE EVALUACIÓN EN AÑOS							
	0	1	2	3	4	5	6	7
INVERSION INICIAL								
Autobús de hidrógeno	415.224.000							
Autobús de diesel	41.522.400							
GASTOS DE OPERACIÓN								
- Hidrógeno (a precios constantes)		3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448
- Diesel (a precios constantes)		4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685
DIFERENCIA DE COSTOS POR COMBUSTIBLE		954.237	954.237	954.237	954.237	954.237	954.237	954.237
SALDO NETO INDICADORES FINANCIEROS	-373.701.600	954.237						
Costo del financiamiento	8%							
VAN	368.733.491,63							

La inversión inicial sería el costo de un autobús de hidrógeno o diesel, puesto en Costa Rica. Los gastos de operación se sacan de una planilla de la tabla de modelo tarifario de la ARESEP (MOPT), multiplicando los costos de combustible por doce, que son los gastos anuales.

3.4.4. Indicadores

Como se observa en la tabla del flujo de caja del apartado anterior, el VAN para esta implementación es negativo, y el proyecto solamente podría ser factible gestionando donaciones para un proyecto de transporte limpio, a través de un organismo que destine fondos para el desarrollo o medio ambiente como el PNUD.

El ahorro producido por cada unidad no es suficiente para hacer el repago de la inversión que se realiza en el sistema nuevo de hidrógeno. En el caso de los autobuses de hidrógeno con celdas de combustible, se requiere analizar el proyecto desde una perspectiva más amplia, y tomar en cuenta en el análisis los beneficios indirectos del uso del hidrógeno como combustible limpio, como que beneficia la salud, disminuye emisiones y gases de efecto invernadero, produce menos ruido y otras externalidades que podrían hacer factible económicamente el proyecto; pero, entonces, debe ser un enfoque más amplio de desarrollo sostenible, y no solamente un análisis financiero para el empresario de autobuses.

3.4.5. Análisis de sensibilidad

Dados los resultados de la evaluación, se plantean algunos escenarios que podrían hacer factible la aplicación del hidrógeno en transporte público. Como hemos visto, la utilización de las celdas de combustible eleva el precio de los vehículos hasta el punto de que el sistema de energía es más costoso que el vehículo mismo, aunque se tiene la ventaja de tener costos de producción del hidrógeno de biomasa o electricidad localmente más bajos que los derivados de hidrocarburos importados.

La conversión de un motor de combustión interna para utilizar hidrógeno directamente es similar a la conversión para utilizar gas licuado de petróleo (LPG). La introducción del hidrógeno como combustible automotor en el corto plazo podría lograrse convirtiendo los autobuses actuales. Para esto se requieren algunas modificaciones que incluyen el reemplazo del motor diesel por uno de gas natural o gasolina, y la instalación de cilindros de alta presión, reguladores, sistema de inyección, tanques y otros, con lo cual la eficiencia puede aumentar.

Ilustración 2 Vehículo de combustión alimentado con hidrógeno. Costo estimado: U\$\$10.000,00 para camiones For y Chevrolet incluyendo máquina generadora de hidrógeno.



Ante la escasa viabilidad financiera que representa la adquisición del parque automotor nuevo de vehículos de hidrógeno, es conveniente realizar proyectos de conversión de motores de gasolina a hidrógeno.

En la tabla de evaluación siguiente se demuestra que, en la actualidad, la opción más viable desde el punto de vista financiero es la conversión de autobuses convencionales con motor de gasolina para utilizar hidrógeno en combustión interna. Esta alternativa es la que brinda un equilibrio financiero para el empresario y no requiere subsidios o inversión no recuperable.

ANÁLISIS DE COSTOS E INGRESOS								
COMPARACIÓN DE AUTOBUSES DE DIESEL- BUSES DE HIDRÓGENO								
(EN COLONES)								
CONCEPTO	HORIZONTE DE EVALUACIÓN EN AÑOS							
	0	1	2	3	4	5	6	7
INVERSION INICIAL								
Autobús convertido a Hidrógeno	46.453.185							
Autobús Diesel	41.522.400							
GASTOS OPERACION								
- Hidrógeno(a precios constantes)		3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448	3.143.448
- Diesel (a precios constantes)		4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685	4.097.685
DIFERENCIA DE COSTOS COMBUSTIBLE		954.237	954.237	954.237	954.237	954.237	954.237	954.237
SALDO NETO	4.930.785	954.237						
Costo del Financiamiento	8%							
VAN	37.323,37							

4. Conclusiones y recomendaciones

El hidrógeno ofrece una visión magnífica para la CNFL en relación con la energía del futuro. Sus ventajas son múltiples e incluyen una fuente amplia y sostenible, intercambio flexible con medios existentes de energía y diversidad de usos finales para producir electricidad sin agentes contaminantes ambientales.

Estas ventajas proporcionan la motivación para realizar un amplio esfuerzo a través de políticas públicas para hacer del hidrógeno el combustible del futuro.

En Costa Rica, la obtención del hidrógeno mediante la biomasa y la electrólisis sería la forma más económica de obtenerlo. Los problemas que se tienen que enfrentar y resolver para alcanzar rentabilidad con sistemas de celdas de hidrógeno son considerables y aún no es viable financieramente la sustitución directa de los autobuses.

De realizarse un proyecto como este en Costa Rica, nuestro país se sumará a aquellos que van a la vanguardia en la tecnología de energía alternativa, y se convertirá en un mercado atractivo para la inversión y, posiblemente, se atraerá más capital extranjero.

Se puede explotar la política gubernamental de usar carbonos neutrales, como política para la atracción hacia el transporte público.

Se recomienda profundizar en la investigación sobre la tecnología de conversión de motores convencionales de hidrógeno aplicada al transporte de personas, para determinar su viabilidad a nivel nacional.

Es conveniente proponer un estudio de mercado para determinar el grado de utilización y aceptación de dicha tecnología en el área del transporte, a nivel nacional.

Se deben evaluar los aspectos y requerimientos legales para la introducción y circulación de vehículos con esta tecnología en el parque automotor nacional.

Se recomienda iniciar gestiones con organismos internacionales o fundaciones para efectuar los trámites necesarios con el fin de adquirir una unidad de transporte de hidrógeno y efectuar pruebas piloto con esta tecnología y su equipamiento como obra demostrativa.

A nivel sectorial, se propone establecer un programa de sustitución gradual de vehículos de combustión interna a tecnología de hidrógeno para el sector de transporte público.

Dado que la producción, almacenamiento, distribución y uso final del hidrógeno presentan riesgos asociados a materiales inflamables y al manejo de gases, no se debe iniciar ningún proyecto sin tomar en cuenta las medidas y procedimientos de seguridad correspondientes.

Referencias bibliográficas

- Appleby, J. (1999). The Electrochemical Engine for Vehicles. *Revista Scientific American*, 74-79.
- Asociación Española de Científicos. (2007). *La economía del hidrógeno*. Recuperado el 8 de mayo de 2007, de <http://www.aecientificos.es>
- Cantillo, M., (1979). *Hidrógeno*. Costa Rica: Instituto Costarricense de electricidad.
- Instituto Costarricense de Electricidad. (2007). *Curso de hidrógeno*. Prof. Marcelo Linardi, Instituto de Investigaciones Nucleares de Brasil, del 14 al 24 de mayo de 2007.
- Demonstration for Fuel Cell Bus Commercialization in China*. (2007). Recuperado el 31 de mayo de 2007, de <http://www.chinafc.org>
- El Mercado de Carbono bajo el Protocolo de Kyoto y oportunidades de intervención para el BCIE. (2006) Recuperado el 10 de junio de 2007, de <http://www.oejbcie.org>
- Espinosa, M.; Minero, E.; Hilje, N. y Barrientos, R. (2001). *Química para el Desarrollo*. México: Editorial Limusa.
- Gummer, J. y Head, C. (2003). *Hydrogen, Hydropower and World Poverty*. Documento no publicado.
- I want to convert my car to hydrogen*. (2007). Recuperado el 1º de junio de 2007, de <http://www.clean-air.org/>
- Kenan, C.W.; Kleinfelter, D.C. y Word, J.H. (1985). *Química General Universitaria*. México: Compañía Editorial Continental.
- Praxair. Fuel Cells. (2007). *Product Spotlight: BP, Praxair and Governor Schwarzenegger Launch Hydrogen Fueling Station at LAX*. Recuperado el 2 de mayo de 2007, de <http://www.praxair.com>
- Productos: Casette de almacenamiento de hidrógeno*. (2007). Recuperado el 18 de mayo de 2007, de www.fstenergy.com
- Rodríguez, H. (1993). *El hidrógeno expectativas para su utilización como energía en el transporte*. Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad.

Roldán, C., Spazzafumo, G. (2006). *Análisis actual y tendencias futuras de la producción de electricidad a partir del uso del hidrógeno*. Informe final de consultoría no publicada. Costa Rica: ICE.

Switch to Hydrogen. United Nuclear Research & Development. (2007). Recuperado el 1º de junio de 2007, de <http://www.switch2hydrogen.com/>

Think Quest. Oracle Education Foundation. (2007). *Alternative Energy Sources. Hydrogen*. Recuperado el 7 de mayo de 2007, de library.thinkquest.org/22361/energy/hydrogen.htm

United Nation Development. (2002). *World Energy Assessment: Energy and the challenge of Sustainability*.

United Nations Development Programme. (2004). *Meeting the Climate Change Challenge Sustaining Livelihoods*.



**UNIVERSIDAD LATINOAMERICANA DE CIENCIA Y
TECNOLOGIA**

**CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EMPRESARIAL
POSTGRADO**

MAESTRIA EN ADMINISTRACION DE EMPRESAS

CON ENFASIS EN MERCADEO

INVESTIGACION EMPRESARIAL APLICADA

Resumen Artículo Científico

**“Tecnología del hidrógeno, rentabilidad sostenible para las
empresas de transporte en Costa Rica”**

Profesor: Luis Enrique Porras, MBA.

Alumna: Arlyn García Jiménez

Junio 2007

Tecnología del hidrógeno, rentabilidad sostenible para las empresas de transporte en Costa Rica

Arlyn García Jiménez²

Resumen

Las proyecciones mundiales indican que los combustibles fósiles tienen reservas para los próximos cuarenta años, y prácticamente todos los requerimientos de energía para satisfacer las necesidades de la vida moderna se extraen de estos combustibles, se derivan de ellos o reciben su influencia de algún otro modo. Es urgente plantear nuevas soluciones energéticas, que sean sostenibles y renovables, y que puedan resolver los problemas ambientales, con precios más accesibles que los del petróleo y que no causen contaminación.

Actualmente, existe el reto de impulsar toda tecnología que busque reducir los costos país, y que disminuya la factura de importación petrolera, específicamente en las áreas de energía. Para lograr este objetivo, en este artículo se pretende demostrar que es factible, desde el punto de vista financiero, que las empresas puedan sustituir sus flotillas vehiculares (transporte público) por otras con diferente tipo de tecnologías, en este caso el hidrógeno, que representa una menor contaminación del medio ambiente y es menos onerosa.

Abstract:

The world-wide projections indicate that the fossils fuels have reserves for the next forty years, and practically all the aspects of the modern life extract his energy from these fuels, derive materially from them or receive their influence of some other way. Its urgent to consider preemptive energetic solutions, sustainable and renewable, so they can solve the environmental problems, looking for alternatives for the high prices of petroleum and contamination.

Actually we have the challenge to impel all technology that try to reduce to the country cost , diminishing the invoice of oil import, specifically for energy areas. In order to obtain this objective, in this article it pretends to prove how companies can financially replace their transportation equipment, in this case the hydrogen and that it contributes with a smaller contamination to environment.

² Bachiller en Administración de Empresas con énfasis en Finanzas, candidata a máster en Administración de Empresas con énfasis en Mercadeo. Correo electrónico: arlynana@hotmail.com



**UNIVERSIDAD LATINOAMERICANA DE CIENCIA Y
TECNOLOGIA**

**CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EMPRESARIAL
POSTGRADO**

MAESTRIA EN ADMINISTRACION DE EMPRESAS

CON ENFASIS EN MERCADEO

INVESTIGACION EMPRESARIAL APLICADA

Palabras Clave: Artículo Científico

**“Tecnología del hidrógeno, rentabilidad sostenible para las
empresas de transporte en Costa Rica”**

Profesor: Luis Enrique Porras, MBA.

Alumna: Arlyn García Jiménez

Junio 2007

Palabras clave: Celdas de combustible, hidrógeno, transporte público, desarrollo sostenible.

Keywords: Fuel Cells, Hydrogen, public transportation, sustainable development.