

00580



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
MEXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**VENTAJAS ESTRATÉGICAS DEL USO DEL  
HIDRÓGENO COMO ALTERNATIVA  
TECNOLÓGICA EN LA TRANSICIÓN  
ENERGÉTICA GLOBAL**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

Innovación y administración de la tecnología

PRESENTA:

**JOSE JORGE NÚÑEZ ALBA**

TUTOR:

M.C. ROCÍO CASSAIGNE HERNÁNDEZ

2005



NÚÑEZ ALBA JOSE JORGE



Universidad Nacional  
Autónoma de México




**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e Impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: JOSE JORGE NUÑEZ ALBA

FECHA: 28 OCT 05  
FIRMA: 

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. JAVIER GARFIAS AYALA *V.*

Secretario: DR. JOSÉ SÁMANO CASTILLO

Vocal: M.C. RODRIGO CÁRDENAS Y ESPINOSA

1er. Suplente: M.I. JOSÉ GUERRA RECASENS

2do. Suplente: M.C. ROCÍO CASSAIGNE HERNÁNDEZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

*FACULTAD DE QUÍMICA UNAM*

**TUTOR DE TESIS:**

M.C. ROCÍO CASSAIGNE HERNÁNDEZ

\_\_\_\_\_  
**FIRMA**

## ÍNDICE

I. ANTECEDENTES	2
II. HIPÓTESIS	2
III. OBJETIVO GENERAL	2
IV. HIPÓTESIS	3
V. INTRODUCCIÓN	3
1. ESCENARIO DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA	4
2. MOVIMIENTO MUNDIAL DE ENERGÍA BASADA EN EL HIDRÓGENO	26
3. TECNOLOGÍAS DE APLICACIÓN DE HIDRÓGENO EN TRANSPORTE	28
4. TENDENCIAS GLOBALES EN TRANSPORTE	32
5. ESTRATEGIAS NACIONALES, CONTINENTALES Y CORPORATIVAS	37
6. TENDENCIAS EN EL USO DE HIDRÓGENO COMO PORTADOR DE ENERGÍA EN LOS NUEVOS ESCENARIOS GLOBALES	49
7. PROSPECTIVA TECNOLÓGICA DEL HIDRÓGENO COMO BASE DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRANSICIÓN	52
8. POSICIONAMIENTO TECNOLÓGICO DEL HIDRÓGENO PARA LOS SISTEMAS DE CONSUMO ENERGÉTICO EN TRANSPORTE	59
9. PROSPECTIVAS DE LAS COMPAÑÍAS ENERGÉTICAS GLOBALES	66
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	74

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **ANTECEDENTES**

La humanidad se encuentra ante el reto más grande de su historia, al tener que confrontar una potencial escasez de combustibles fósiles en una etapa en la que se estima un incremento creciente en la demanda energética global, tanto de países en desarrollo como desarrollados. Este reto significa establecer sistemas de cooperación política, económica, comercial y tecnológica como no se han dado en ninguna otra etapa histórica, y probaran si el modelo de civilización vigente es capaz de reinventarse para sobrevivir en el siglo XXI. En este último quinquenio el hidrógeno ha emergido como una alternativa energética de alta tecnología ante este escenario de sustitución de energéticos fósiles, pero es necesario analizar bajo que condiciones puede ser viable como protagonista de este proceso.

A manera de referencia estratégica se presentan las estadísticas globales más recientes sobre las reservas de combustibles fósiles, para ejemplificar el reto que significa administrar racionalmente estas reservas como soporte de la transición energética hacia fuentes alternas, hasta su desaparición final.

## **HIPÓTESIS**

Tomando como referencia el escenario anterior se plantea que las celdas de combustible para hidrógeno son viables en el contexto global para soportar la transición energética en el largo plazo.

## **OBJETIVO GENERAL**

Analizar las principales tendencias globales que se están desarrollando en esta década en conjunto con las estrategias nacionales, continentales y corporativas para preparar los dispositivos tecnológicos necesarios para la introducción del hidrógeno por etapas en la sociedad. Se analizará el proceso para llegar a una gran escala en el momento histórico seleccionado para mantener vigentes los modelos de consumo/negocio de energía generados en el entorno occidental.

## Objetivos específicos

- Identificar las ventajas competitivas del hidrógeno como combustible alternativo
- Plantear un escenario prospectivo técnico, económico y social
- Proponer políticas que faciliten el desarrollo de esta industria

## METODOLOGÍA

1. Se utilizarán las fuentes documentales más recientes en cuanto a congresos mundiales representativos en el campo del hidrógeno, para evaluar las tecnologías en desarrollo y prueba, las estrategias en curso y el posicionamiento del hidrógeno para los sistemas de transporte a través de las alianzas entre compañías energéticas y automotrices, como parte de programas de alcance nacional.
2. La investigación de campo se realizará mediante comparaciones con escenarios internacionales, estadísticas nacionales y la literatura científica relativa al tema
3. Se llevará a cabo una investigación preliminar sobre los posibles proveedores de las tecnologías asociadas a esta industria.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de transición energética que se está comenzando a vislumbrar en el mundo contiene un alto nivel de complejidad por las estructuras que integran al mercado energético global, con raíces históricas que se remontan al sistema colonial de explotación de recursos en todo el planeta. Si le agregamos la posibilidad de sustitución de los combustibles fósiles por un combustible totalmente diferente y con características altamente deseables desde el punto de vista ambiental, así como la prospectiva de los patrones de desarrollo tecnológico que serían más plausibles en un ambiente de gran incertidumbre en las rutas más viables para la creación de infraestructura, el reto de visualizar las líneas de desarrollo alcanza proporciones de alto interés. En esta tesis se describen los diversos escenarios generados por transnacionales energéticas, países, consorcios, alianzas, etc. para tener una sensibilidad de las estrategias

dominantes en el mercado; el papel de la tecnología; los planes y filosofías de actores relevantes; sus necesidades y aspiraciones para sobrevivir y mantener el control en un mundo diferente al que han conformado por generaciones, y finalmente se plantean las líneas generales de estrategia que se visualizan como mas viables para administrar la transición energética y tecnológica hacia el siglo del hidrógeno.

## ESCENARIO DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La humanidad se encuentra en este año 2005 en el umbral de una era de transición energética, la cual estará caracterizada por una distorsión creciente del mercado de combustibles fósiles, representado por el petróleo, debido a factores inicialmente de oferta-demanda, acelerados por la excesiva demanda de crudo por parte de China, pero alimentados en forma creciente por la incertidumbre de la cada vez menor reposición de las reservas disponibles por parte de las transnacionales petroleras, cuyo nivel de reposición anual de las reservas utilizadas es cada vez menor, lo cual está generando un modelo alternativo de administración de la canasta energética de mediano plazo, al iniciar proyectos que incluyen fuentes altermas de energía en escalas apreciables.

Estos proyectos incluyen ejemplos tales como la granja eólica con una capacidad de 22.5 MW que instalaron conjuntamente British Petroleum (BP) y ChevronTexaco en su refinería Nerefco cerca de Róterdam en Holanda. Es un proyecto de 23 MDD con inicio de operaciones a fines del 2003, constituyendo la primera aplicación significativa de tecnología de turbina eólica para las dos transnacionales petroleras<sup>1</sup>.

Otros proyectos estratégicos de Shell son la construcción de su granja eólica de mayor capacidad en un sitio a 90 millas de Lubbock, Texas, en los condados de Scurry y Borden.

Es un proyecto de 160 MW, a construirse como co-inversión de riesgo al 50% con Padoma Wind Power, y se esperaba completarlo a fines de 2003.

David Jones, director de Shell WindEnergy declaró en julio de 2003 que su empresa "tiene el compromiso de convertirse en un jugador importante en el sector eólico de EUA". Actualmente es propietaria de cuatro parques eólicos en los EUA: Rock River I en Wyoming (50MW), White Deer (80MW) en Texas, y Cabazon (41MW) y Whitewater Hill (61MW) en California. También anunció la adquisición de un porcentaje de 40% en las acciones del parque eólico de La Muela en el noreste de España de la empresa TXU Europe Energy Trading B.V. La transacción marcó el inicio de operaciones eólicas de escala comercial en Europa para el grupo de compañías de la Royal Dutch/Shell.

Shell WindEnergy alcanzará una capacidad eólica de 392 MW en EUA, lo cual la posiciona para eventualmente aprovechar el altísimo potencial eólico del que dispone EUA en los estados del medio oeste, y que tendrá que ser utilizado en forma complementaria en el futuro para cubrir el otro 50% de energía eléctrica que no es suministrado por carbóeléctricas.

Si analizamos esta adquisición de Shell en condados de Texas en conjunto con el proyecto de la ChevronTexaco en Holanda, dado que Shell tiene una gran refinería en Deer Park, Texas (de la cual PEMEX es socio para maquila de gasolina en una sección) veremos un patrón para suministrar energía alternativa a sus refinerías progresivamente de parte de las transnacionales, adelantándose a la etapa en la cual la competencia por estos recursos alternativos sea feroz.

Otro ejemplo relevante es la integración de la sociedad de capital de riesgo CHRYSALIX, basada en Vancouver, cuyos socios son Shell Hydrogen, Mitsubishi Corporation, BASF Venture Capital, Duke Energy, The BOC Group, Ballard Power Systems Inc., y The Boeing Company. El objetivo de esta sociedad es el financiamiento con capital de riesgo de proyectos en etapa temprana enfocados en compañías de celdas de combustible y las tecnologías de combustible relacionadas. CHRYSALIX provee financiamiento inicial, asistencia administrativa,



conocimiento tecnológico, conexión organizada en redes privilegiadas con jugadores industriales y experiencia en el manejo de la propiedad intelectual<sup>2</sup>.

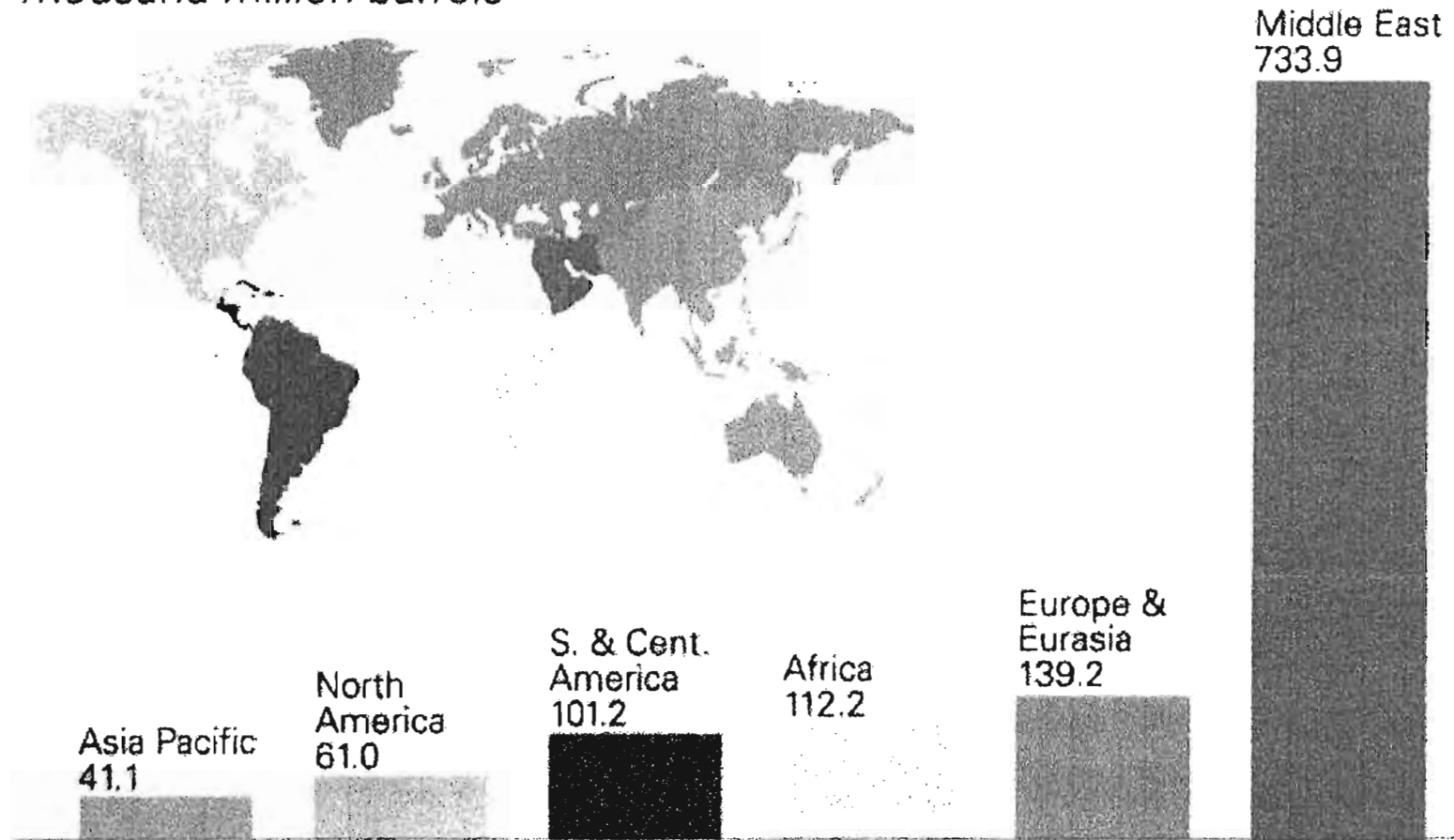
Para efectos del tema a desarrollar en esta tesis, se analizarán las ventajas estratégicas de la sustitución de energéticos tradicionales por hidrógeno, pero tomando en cuenta adicionalmente los aspectos tecnológicos que implica la inclusión progresiva del hidrógeno en las cadenas energéticas de alto consumo, poniendo énfasis en el sector transporte, que es el principal consumidor de combustibles fósiles en el ámbito global.

Se anexan las gráficas de reservas globales en los tres principales combustibles fósiles: petróleo, gas y carbón, disponibles a finales de 2004, para poder visualizar el panorama en cuanto a la concentración de estos energéticos en ciertos países y así entender mejor las líneas de estrategia que se van a desarrollar en el transcurso de los próximos 30 años.

Se puede ver como el petróleo y el gas se concentran principalmente en Oriente Medio teniendo en segundo lugar en gas a Eurasia, lo cual deja en muy mala posición a EUA en cuanto a este energético, por lo cual está desarrollando una amplia infraestructura para la importación de GNL (Gas Natural Licuado), para solventar sus necesidades de combustible de menor impacto ambiental. La única ventaja relativa de EUA sin sus altas reservas de carbón, lo cual le va a permitir establecer una estrategia de mantenimiento de su capacidad carboeléctrica y el eventual desarrollo de una carboquímica como la implementada por Alemania y Sudáfrica. El mensaje final resalta la necesidad de que los grandes consumidores de energía impulsen a sus transnacionales "cazadoras" de energía para asegurar activos energéticos en todo el planeta y si necesitan respaldo militar, no habrá limitaciones según se deterioren las condiciones de negociación en un entorno de escasez creciente.

# Reservas probadas de Petróleo a finales de 2004

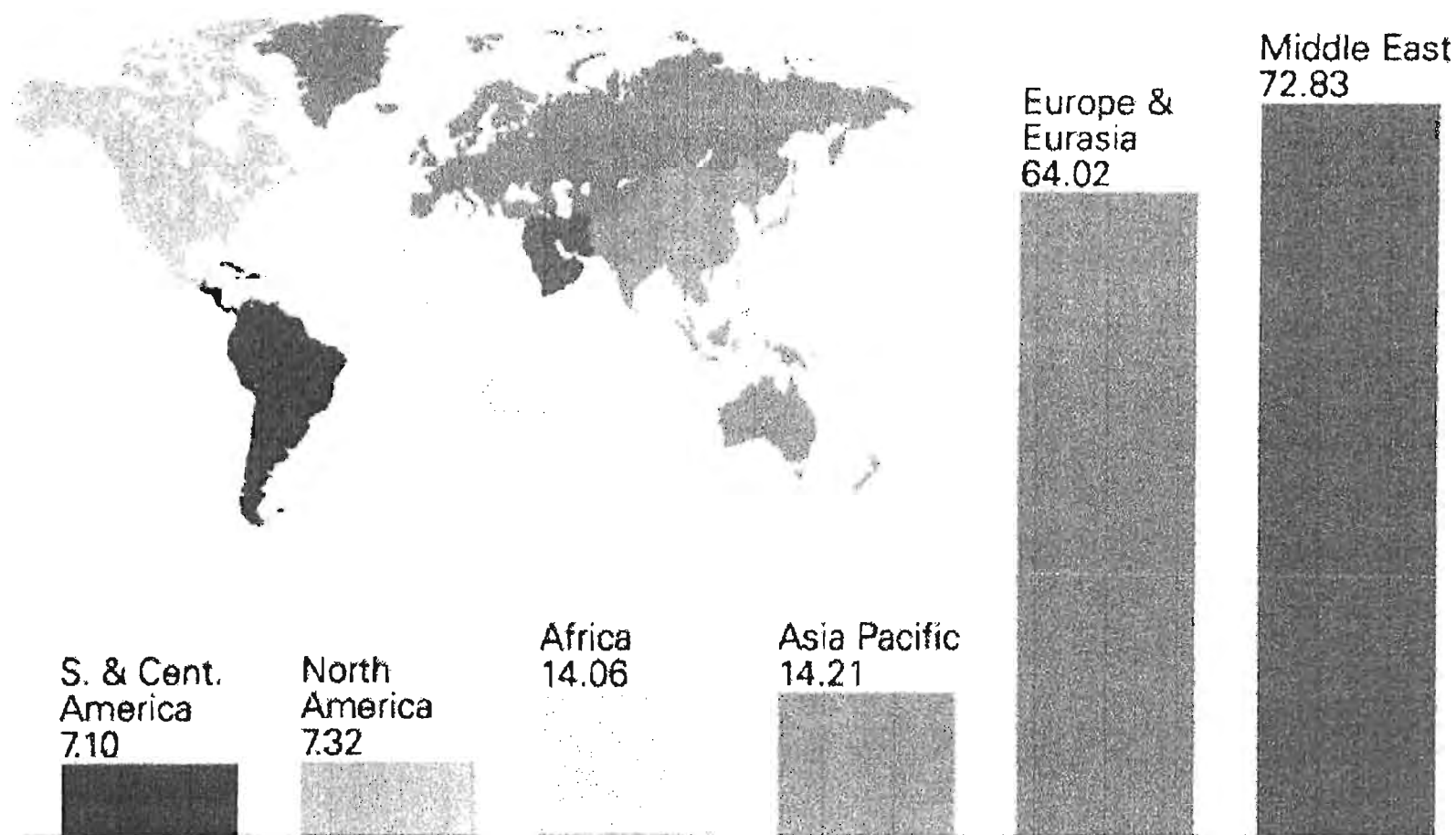
Thousand million barrels



Fuente: BP World Energy Statistical Review 2004

# Reservas probadas de Gas Natural a finales de 2004

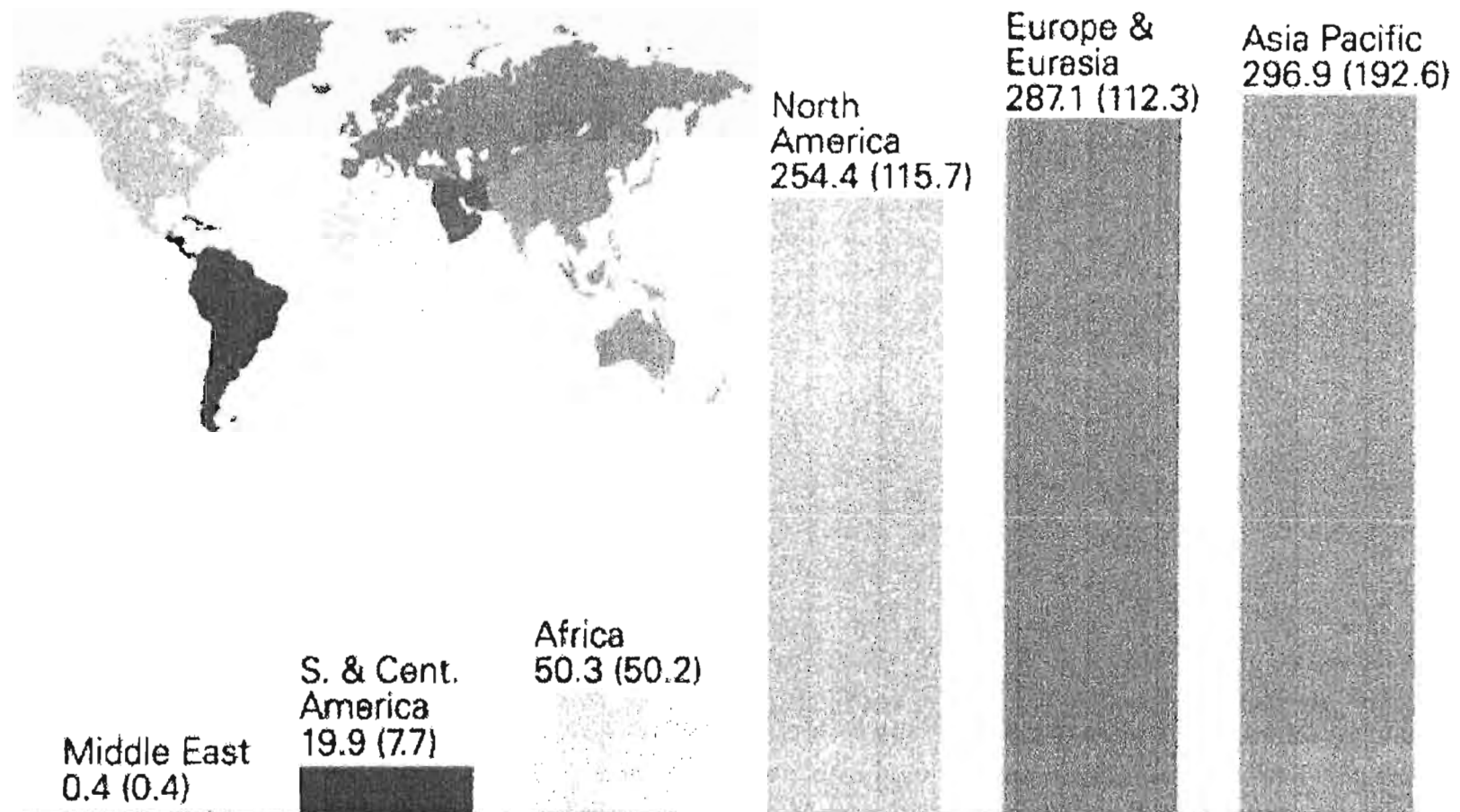
Trillion cubic metres



Fuente: BP World Energy Statistical Review 2004

# Reservas probadas de Carbón a finales de 2004

Thousand million tonnes (share of anthracite and bituminous coal is shown in brackets)



Fuente: BP World Energy Statistical Review 2004

El régimen energético de los combustibles fósiles es tanto la fuerza vital que hace posible la globalización como uno de los principales factores responsables de la creciente distancia entre los países ricos y pobres del mundo. Sin embargo, la infraestructura global creada para explotar los combustibles fósiles está envejeciendo, por lo que nos encontramos a las puertas de un nuevo régimen energético cuya naturaleza y carácter es tan distinto del de los combustibles fósiles como lo era éste del régimen energético anterior basado en la quema de madera.

Ante el escenario anterior, se requiere una amplia exploración e investigación de todas las alternativas energéticas que puedan ser viables para preparar, instrumentar, desarrollar y culminar la transición energética de los combustibles fósiles hacia el o los vectores energéticos del siglo XXI, de la manera menos traumática posible, dado el nivel de adicción de la economía global al sistema energético fósil como fuente de poder económico, político y estratégico.

El hidrógeno es el elemento más ligero, más básico y más ubicuo del universo. Cuando se utiliza como forma de energía, se convierte en "el combustible eterno"<sup>3</sup>. Nunca se termina y, como no contiene un solo átomo de carbono, no emite dióxido de carbono. El hidrógeno se encuentra repartido por todo el planeta: en el agua, en los combustibles fósiles y en los seres vivos. Sin embargo, raramente aparece en estado libre en la naturaleza (la gasolina tampoco aparece en estado libre), por lo que tiene que ser extraído de fuentes naturales.

Hoy día están en proceso de desarrollo progresivo las bases para la economía del hidrógeno. En los próximos años, la revolución de la informática y las telecomunicaciones se fusionará con la nueva revolución de la energía del hidrógeno, una potente combinación que podría llegar a reconfigurar los fundamentos de las relaciones humanas en los siglos XXI y XXII<sup>4</sup>.

La **Red energética mundial del hidrógeno** [Hydrogen Energy Web, HEW] será la próxima gran revolución tecnológica, comercial y social de la historia. Sigue los pasos del desarrollo de las comunicaciones a nivel mundial en los años noventa y, al igual que éste, traerá consigo una nueva cultura del compromiso.

Sin embargo, la red energética del hidrógeno se enfrenta a la amenaza del control del mercado energético por las grandes transnacionales del petróleo y a un reto para redefinir un nuevo equilibrio entre el negocio energético y la descentralización del acceso a las alternativas energéticas.

El paso a la economía del hidrógeno puede poner fin a la dependencia del mundo respecto de las importaciones de petróleo y contribuir a rebajar la tensión del peligroso juego geopolítico que practican actualmente los militantes musulmanes (de Oriente Medio y el resto del mundo) con los poderes occidentales. Y un paso igualmente importante es la posibilidad de desconectar al mundo del régimen energético hiper-dependiente de los combustibles fósiles para limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> a sólo el doble de los niveles preindustriales y mitigar los efectos del calentamiento global sobre la ya castigada biosfera de la tierra.

Entre los aspectos utópicos de esta revolución energética se maneja la creación de un régimen energético descentralizado basado en el hidrógeno, el cual ofrece la posibilidad de llevar a cabo una "reglobalización" en diferente sentido a la desarrollada hasta ahora.

La era de los combustibles fósiles trajo consigo nuevas formas de organizar la sociedad, como la actividad industrial, el gobierno de los Estados-nación, los densos asentamientos urbanos y un estilo de vida burgués. Las grandes diferencias del hidrógeno respecto a las diversas formas de energía basadas en los hidrocarburos darán pie al surgimiento de un nuevo tipo de infraestructura energética, así como a un conjunto de instituciones económicas radicalmente distintas y a nuevos modelos de asentamiento humano, igual que sucedió en el

pasado con el carbón y el motor de vapor y más tarde con el petróleo y el motor de combustión interna. La posibilidad de desconcentrar la producción de energía permitiría desconcentrar en cascada al comercio y, a su vez, los asentamientos humanos.

La centralización del poder y las economías de escala que caracterizaban la era de los combustibles fósiles han llevado en forma inevitable a la concentración de la población en mega-ciudades que consumen grandes cantidades de energía y que resultan en último término **insostenibles**.

La creación de redes energéticas alternativas descentralizadas de hidrógeno entre los usuarios finales haría posible el establecimiento de asentamientos humanos más dispersos y más sostenibles en relación con los recursos medioambientales locales y regionales.

En la era del petróleo, la sensación de seguridad personal de cada individuo refleja los valores organizativos de la gran estructura institucional que gestiona el flujo de energía y la actividad económica. La autonomía y la movilidad se han convertido en forma incuestionable en las virtudes sociales de la época, tanto en la vida personal como en la institucional. Si queremos sobrevivir como civilización industrial "moderna" deberemos evolucionar de la omnipresente geopolítica de la división, propia de la época de los combustibles fósiles, para dejar paso a una nueva política de la biosfera en la era del hidrógeno.

Los próximos veinte años serán determinantes en nuestra capacidad para administrar la transición energética en forma civilizada para construir un futuro viable para el desarrollo sustentable de la humanidad.

En la actualidad está a punto de producirse un cambio igualmente profundo en nuestra forma de emplear la energía. La era moderna ha sido posible gracias a la explotación del carbón, el petróleo y el gas natural. Todos los avances de los dos últimos siglos, sean de naturaleza comercial, política o social, están conectados,

de un modo u otro, con el aumento masivo de la energía generada por la quema de combustibles fósiles.

Los antropólogos afirman que la cantidad de energía consumida per cápita en una sociedad da una buena medida de su estadio relativo de desarrollo. Durante los últimos doscientos años, la sociedad occidental ha consumido más energía per cápita que todas las demás sociedades históricas juntas. Disfrutamos actualmente de un estándar de vida sin precedentes y debemos nuestra buena fortuna a los depósitos de hidrocarburos que se generaron hace millones de años. Sin embargo, todo lo bueno se acaba algún día.

## **ESCENARIOS**

Los escenarios son una herramienta para ayudar a los líderes corporativos y directores de áreas clave a planear para el futuro – o prepararse para diferentes futuros posibles. Ayudan a enfocarnos en incertidumbres críticas. Sobre todo en las cosas que no conocen que pueden transformar su negocio, así como en las cosas que sí conocen en las que pueden ocurrir discontinuidades inesperadas. Les ayudan a entender las limitaciones de sus "mapas mentales" del mundo. A pensar lo impensable, anticipar lo inconocible y utilizar estas dos informaciones para tomar mejores decisiones estratégicas.

El líder mundial en consumo de combustibles fósiles es Estados Unidos (EUA), y al mismo tiempo emite casi el 25% de todo el bióxido de carbono mundial emitido. Sus apologistas dicen que es el precio que se debe pagar a cambio de dirigir la economía global. Los realistas ven esas cifras como una continua amenaza a la viabilidad del género humano en la Tierra debido a la contaminación y el cambio climático.

La inacción de los EUA respecto a su dependencia petrolera es doblemente frustrante debido a que ya existen fuentes de energía renovables que ofrecen



alternativas prácticas al carbón y el petróleo. Su aceptación pasiva de su dependencia de los combustibles fósiles es particularmente desalentadora al ser la única nación con los recursos, nivel de desarrollo tecnológico y conexiones internacionales requeridas para liderar una revolución energética global.

Si los EUA no controlan su propio desastre energético, entonces se requerirá cooperación internacional sin precedente para que la comunidad mundial establezca un curso nuevo más coherente con la salud global. George W. Bush ha reforzado la alianza ya previamente establecida con los intereses petroleros saudí-árabes, por lo que su administración nunca promoverá seriamente las energías alternativas <sup>5</sup>.

Sin embargo, los vientos de cambio comienzan a soplar para estas energías, lo cual reporta en un estudio Janet L. Sawin <sup>6</sup>.

Las malas noticias en nuevas fuentes renovables, dice Sawin, actualmente aportan solo el 2% del total de la demanda global de energía. De hecho, solo 6 países, Dinamarca, Alemania, India, Japón, España y los EUA, representan el 80% de la capacidad global fotovoltaica y eólica. Las nuevas renovables excluyen las hidroeléctricas a gran escala y la biomasa tradicional. Sin embargo, aún cuando la demanda global de energía se incrementa, las renovables están lamentablemente sub-explotadas. Todavía viven 2 mil millones de personas sin electricidad en el mundo en desarrollo y, la Agencia Internacional de Energía predice que para el 2030, "el consumo de energía global se incrementará un 66% y se podría duplicar el uso de la electricidad".

Ya sea por ignorancia o por un estado de permanente negación, la mayoría de las naciones todavía esperan alegremente que el petróleo aporte esta energía. Sin embargo, los recursos naturales tienen una crisis de reservas. Ahora que somos más dependientes del petróleo para nuestras necesidades energéticas, la producción mundial de petróleo está muy cerca de alcanzar su pico histórico.

La ironía es que a la mayoría de nosotros no nos preocupa de donde proviene nuestra energía, solo queremos energía ilimitada *ahora*, y la queremos barata. Todo esto completa el juego de las transnacionales petroleras. Sus campañas publicitarias nos aseguran que están comprometidas a desarrollar nuevas fuentes de energía, pero aparte de los billones de dólares anuales en beneficios anuales, solo unos millones van hacia la conexión en línea de energías alternas.

El cambio nunca es sencillo, y existen fuerzas muy intensas (incluyendo industrias con poder político) que actúan para mantener el status quo. Hoy en día la mayoría del mundo está encerrado en un sistema energético basado en el carbono que no es mejor ni necesariamente más barato que la energía renovable, sino simplemente es el legado de decisiones de inversión y políticas del pasado<sup>6</sup>.

El respaldo político para la energía renovable se está incrementando por nuevas legislaciones fuertes que abren mercados para la energía renovable en una lista de países que crece rápidamente. Un gran número de naciones ya ve a la energía renovable no solo como una alternativa creíble a los combustibles fósiles, sino también como una necesidad para cubrir las crecientes necesidades energéticas sin sacrificar calidad de vida, salud humana, el ambiente natural y la seguridad nacional.

La inversión también va para arriba. En 2003, la inversión global en energía renovable llegó a los 20.3 mil millones de dólares, representando casi un sexto de la inversión global total en equipo de generación de potencia. De hecho, las fuentes de energía de más rápido crecimiento en el mundo son la potencia eólica y solar, y la capacidad de generación global de energía eólica ha crecido a un promedio de casi 30% anual por los últimos 10 años<sup>6</sup>.

Aún cuando una transición a energía renovable requerirá de una considerable inversión, numerosos estudios concluyen que sería mucho más barata que los combustibles fósiles en el largo plazo, aportando simultáneamente tremendas

ventajas sociales, económicas, ambientales y en seguridad. En los EUA, California, lidera el cambio, y Japón y Alemania han hecho grandes progresos en la generación solar y eólica respectivamente.

En todos los casos se reconoce que la acción del gobierno es clave, ya que el avance de las renovables ha sido alentado por políticas gubernamentales fuertes diseñadas para nutrir industrias nacientes de energía y crear demanda para estas tecnologías, en mercados frecuentemente dominados por energías maduras y altamente subsidiadas provenientes de los combustibles fósiles y el sistema nuclear. Las sociedades deben demandar energía limpia para evitar que sus impuestos sigan subsidiando industrias con una infraestructura anticuada y poco eficiente.

## **VISIÓN DE SHELL AL 2050**

El hidrógeno es el vector con el mayor potencial para un cambio radical en el sistema energético. Su despliegue hacia el año 2050 dependerá tanto de los desarrollos tecnológicos (celdas de combustible y métodos de bajo costo para almacenarlo), como del desarrollo de una infraestructura nacional. En el pasado, las infraestructuras de distribución de gran escala han sido construidas por monopolios o entidades públicas. No está claro como se construiría una infraestructura para el hidrógeno en cualquiera de los escenarios examinados<sup>7</sup>.

Shell tiene una competencia largamente probada en el planteamiento de escenarios energéticos. Su conjunto de escenarios del 2001 propuso uno de dos futuros posibles relativo al surgimiento del hidrógeno, llamándolo "El espíritu de la era por venir", el cual plantea el potencial para un cambio radical hacia un sistema energético basado en hidrógeno con amplio desarrollo de celdas de combustible, secuestro de bióxido de carbono, etc. Los tres impulsores utilizados fueron Escasez de recursos, Cambio tecnológico y Prioridades personales y sociales.

Todo esto en un futuro contrastante de continua experimentación, muchas fallas y finalmente una revolución tecnológica basada en el hidrógeno.

Está basado en la idea de que la innovación proviene de nichos en pequeña escala- p.ej. el walkman de Sony llevando a una revolución en la portabilidad de la IT (Information Technology) y la tecnología de comunicaciones. Adicionalmente se plantea el desarrollo de un nuevo "combustible encapsulado" compacto que puede ser adquirido al menudeo y al consumidor no le preocupa lo que contiene.

- Las celdas de combustible son asimiladas en principio por los negocios que necesitan energía ininterrumpible (dispositivos portátiles con baterías para larga duración: laptops, etc.) haciendo que los costos caigan significativamente.
- El 25% de los vehículos de la OCDE utiliza celdas de combustible para el 2025, pero China da un salto cuántico previamente, presionada por el impacto creciente de sus importaciones de petróleo.
- La cadena energética exige una nueva infraestructura para el hidrógeno, el cual proviene de combustibles fósiles (con secuestro de C). El petróleo inicia su declinación antes de que aparezca la escasez.
- Se alinean las renovables y la energía nuclear para producir hidrógeno después del 2030, teniendo ya a las renovables como una tecnología central de gran escala.

Conclusión global: Eventualmente el hidrógeno se convierte en el vector dominante, pero la infraestructura llega mucho después de las primeras aplicaciones de "nicho". Esta visión tiene congruencia con la forma en la que se está desarrollando el hidrógeno en una multiplicidad de nichos a todos los niveles, y la cual será discutida más adelante.

Cada vez más son los expertos mundiales en geología que coinciden en alertarnos sobre la próxima ocurrencia de una verdadera crisis petrolera y cuando ésta llegue será permanente.

Si la producción mundial de petróleo tocara techo en algún momento de la próxima década, seguido poco tiempo después por el gas natural, ello provocaría una serie de efectos en cadena que podrían llegar a poner en jaque buena parte de nuestro estilo de vida industrial. En particular, hay dos cambios que probablemente destacarían dentro del nuevo equilibrio derivado de la crisis del petróleo.

En primer lugar, los expertos discrepan en cuanto al momento en que la producción global de petróleo tocará techo, pero todos están de acuerdo en que cuando esto ocurra prácticamente la totalidad de las reservas sin explotar se hallarán en los países musulmanes de Oriente Medio, lo cual generaría una perturbación violenta en el actual equilibrio de poder en el mundo.

En segundo lugar, si el descenso de la producción mundial de petróleo y gas natural sorprende al mundo, es muy probable que los países y las compañías energéticas busquen sustitutos entre los combustibles fósiles más sucios, como el carbón, los crudos pesados y las arenas asfálticas. Si en la actualidad se prevé un aumento de la temperatura en el planeta de entre 1.4 °C y 5.8 °C para el siglo XXII, la utilización de combustibles más sucios significaría un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> y habría que prever un incremento aún más importante de la temperatura, con efectos todavía más devastadores sobre la biosfera terrestre de los que se habían previsto hasta ahora.

La nuestra no es la primera gran civilización de la historia que se enfrenta a una crisis energética. La energía ha desempeñado un papel importante en el auge y caída de las civilizaciones. Muchos antropólogos e historiadores mantendrían que ha sido el factor crucial.

Si hay alguna lección que aprender –y ciertamente la hay– en la respuesta que dieron otras civilizaciones a sus propias crisis energéticas, ahora sería el momento de hacer inventario, de escuchar a los futurólogos. En *Human Origins: A manual of Prehistory* (1924), George Grant MacCurdy describe la experiencia humana como

un viaje evolutivo dirigido hacia el aprovechamiento de una cantidad cada vez mayor de la energía disponible. Según MacCurdy, "el grado de civilización de cada época, pueblo o grupo de pueblos se mide por su capacidad de utilizar la energía para promover el progreso o satisfacer las necesidades de la humanidad".

Lo cierto es que el flujo de la energía está gobernado por leyes férreas y si una civilización las transgrede, puede llegar a perecer.

En último término, son las leyes de la termodinámica las que nos dicen cuáles son los límites superiores en la aspiración del hombre a dominar su entorno.

Las sociedades que van más allá de las limitaciones que imponen sus propios regímenes energéticos corren el riesgo de experimentar un colapso.

En la actualidad, ocho mega-compañías- tanto de capital privado como público- controlan la circulación de energía en todo el mundo. Al centralizar el poder sobre los recursos energéticos de la Tierra, las compañías energéticas han creado unas condiciones favorables para las grandes economías de escala y para la centralización de la actividad económica en todas las demás industrias.

La globalización representa el estadio final de la era de los combustibles fósiles, un período en el que cada vez son menos las instituciones corporativas que gestionan tanto el flujo de energía como la actividad económica en las comunidades de todo el mundo.

Para cinco generaciones, hablar de geopolítica ha sido sinónimo, en gran medida, de hablar de políticas relacionadas con el petróleo. Aquellos países, empresas y pueblos que han podido controlar el flujo del petróleo han disfrutado de una riqueza sin igual, mientras que aquellos a quienes se ha negado un acceso privilegiado al potencial generador de riqueza de lo que los geólogos llaman el "oro negro", se han hundido todavía más en la pobreza y han estado sometidos a una creciente explotación y marginalización.

Según la Administración de Información Energética (Energy Information Administration, EIA) del departamento de Energía de los Estados Unidos, faltan casi 35 años para que la producción de crudo "barato" llegue a tocar techo, tiempo suficiente para realizar la transición hacia estrategias energéticas alternativas. crímenes contra la humanidad.

Sin embargo, en medio de esta aparente complacencia, los resultados de los nuevos estudios publicados por algunos de los principales expertos mundiales en geología ofrecen una imagen muy distinta. Sus cálculos sugieren que la producción global de petróleo crudo "barato"- la sangre que da vida a la economía global- podría tocar techo antes del 2010 y no más tarde de 2020<sup>22</sup>.

(Se considera que se ha <<tocado techo>> cuando aproximadamente la mitad de las reservas recuperables estimadas [Estimated Ultimate Recoverable, EUR] de petróleo del mundo han sido explotadas.)

Los geólogos están de acuerdo en que hasta el momento se han extraído de la Tierra más de 875,000 millones de barriles de petróleo, casi todos en los últimos 140 años de la era industrial<sup>23</sup>. El punto sobre el que no se ponen de acuerdo es en la cantidad de petróleo convencional que todavía queda por extraer, debido a las diversas formas de interpretar la palabra <<reservas>>. El término "Reservas" se refiere a la cantidad conocida de petróleo presente en yacimientos que pueden ser explotados con las actuales tecnologías, dentro de un futuro previsible y a un costo razonable desde el punto de vista comercial.

En la actualidad los geólogos pueden realizar estimaciones mucho más precisas sobre la cantidad de petróleo que todavía queda por descubrir gracias a sofisticadas tecnologías de análisis geoquímico.

Estados Unidos (48 estados contiguos, excepto Alaska y Hawaii), cuyas reservas se estiman aproximadamente en 195,000 millones de barriles, ha extraído ya

169,000 millones de barriles (MMB) de su riqueza petrolera, lo cual deja al país con unas reservas de sólo 20,000 MMB, más otros 6,000 millones aproximadamente que están todavía por descubrir<sup>23</sup>.

Arabia Saudita, en cambio, posee unas reservas totales de 300,000 MMB. Los sauditas han producido sólo 91,000 MMB, lo que deja sus reservas en 194,000 MMB y unas reservas adicionales de 14,000 MMB todavía por encontrar.

Las reservas totales de Rusia son aproximadamente de 200,000 MMB. Rusia ha extraído ya 121,000 millones de este total, lo cual deja al país con unas reservas de sólo 66,000 millones, más otros 13,000 millones de barriles todavía por encontrar.

Así mientras que Estados Unidos conserva sólo el 14% del petróleo que poseía originalmente y Rusia el 39%, Arabia Saudita todavía tiene el 70% de su petróleo bajo tierra.

Basándonos en la estimación de la Oficina de Estudios Geológicos de Estados Unidos [U.S. Geological Survey, USGS], de 3,003 billones de barriles de reservas totales, y suponiendo que se mantenga la tasa actual del 2% de crecimiento en la producción anual, la EIA estima que la producción global de petróleo tocará techo en 2037.

Pero si los nuevos modelos son correctos, el tiempo que falta para que la producción global de petróleo toque techo se quedará entre ocho y dieciocho años. (Incluso el análisis de la EIA, basado en las estimaciones actuales de la USGS sobre las reservas totales, reconoce que el pico en la producción global de petróleo se podría adelantar hasta 2016 si se aplican supuestos ligeramente distintos al modelo. Queda abierta la cuestión de hasta qué punto ha habido presiones políticas y comerciales sobre las cifras oficiales.

Algunos países de la OPEP han dado mayor amplitud en el alcance de sus definiciones de reservas, según los críticos, para aumentar sus cuotas de producción y conseguir préstamos internacionales de instituciones como el Banco



Mundial y el Fondo Monetario Internacional, o para atraer préstamos de bancos privados para el desarrollo de infraestructuras y nuevos proyectos comerciales.

Campbell y Laherrère estiman las reservas totales recuperables de petróleo en sólo 1.8 billones de barriles (BBB), en el extremo a la predicción de la USGS de 3 BBB. Según ellos, los países productores de petróleo han exagerado groseramente las cifras de sus reservas con fines políticos, sobre todo Rusia y los países de la OPEP. Los estudios publicados de geólogos de talla mundial basados en nuevos modelos informáticos sugieren que la producción global de petróleo tocará techo en algún momento entre 2010 y 2020. y algunos de los cuales estiman incluso que antes de 2010.

•En otras palabras, en este rango de tiempo se habrá extraído la mitad de las reservas totales. Una vez que la producción toque techo, los precios del petróleo no dejarán de aumentar como resultado de la competencia de los países, las empresas y los consumidores por la mitad restante. A diferencia de la primera crisis del petróleo de los años setenta y ochenta, que fue inducida políticamente, esta vez la crisis se basará en una escasez real.

El modelo metodológico en el que se basan todas estas predicciones se conoce como la "curva de Hubbert", y se debe a M. King Hubbert, geofísico que trabajó para la compañía Shell Oil. En 1956 publicó un artículo, ya famoso, en el que predecía el auge y caída de la producción de petróleo en Estados Unidos. Basándose en la cantidad y ritmo de la producción en el pasado, King estimó que la producción de petróleo en EUA tocaría techo entre 1965 y 1970, lo cual se cumplió en 1970 y a partir de ahí la producción inició un descenso continuo, perdiendo EUA su papel preponderante como principal productor mundial de petróleo, por lo que ese cambio ha dictado buena parte de la geopolítica mundial desde entonces.

La tesis de Hubbert es que la producción de petróleo sube desde cero hasta su punto máximo, cuando se han explotado la mitad de las reservas totales

recuperables, y luego cae siguiendo una curva clásica en forma de campana. El punto más alto de esta curva en forma de campana representa el punto medio en el que la mitad de las reservas recuperables han sido extraídas. A partir de este punto, la producción cae tan rápidamente como había subido antes, siguiendo la segunda mitad de la curva en forma de campana.

Los geólogos han combinado la curva de Hubbert con modelos matemáticos para predecir el momento en que la producción global va a tocar techo.

Campbell, geólogo de Oxford con experiencia en Texaco y AMOCO, y Laherrère, geólogo con experiencia en TOTAL, han estado asociados durante varios años a Petroconsultants, consultora radicada en Ginebra, Suiza, que gestiona bases de datos industriales, y su estudio se apoya en una base de datos de Petroconsultants que cubre 18,000 yacimientos petrolíferos de todo el mundo.

Ellos conceden que todavía se pueden descubrir 150,000 MMB más de petróleo, con lo que estiman un total de 1 BBB por extraer. Con esto estiman que la producción de petróleo de los países no pertenecientes a la OPEP tocará techo antes de 2010, mientras que los cinco principales países productores de la OPEP en Oriente Medio –Arabia Saudita, Kuwait, Irak, Irán y Abu Dhabi- alcanzarán su pico de producción alrededor de 2015.

Basándose en el conjunto de los datos y en los modelos informáticos, los dos geólogos predicen que la producción global de petróleo tocará techo alrededor del año 2010<sup>22</sup>.

James J. Mackenzie dice que incluso suponiendo unas reservas totales recuperables de 2.6 BBB, una cifra superior a la mayoría de las estimaciones, el pico de la producción de petróleo sólo se retrasaría hasta el año 2019.

La Agencia Internacional de Energía de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) estima que la demanda energética mundial podría llegar a crecer hasta un 57% antes de 2020 y que la producción global de petróleo

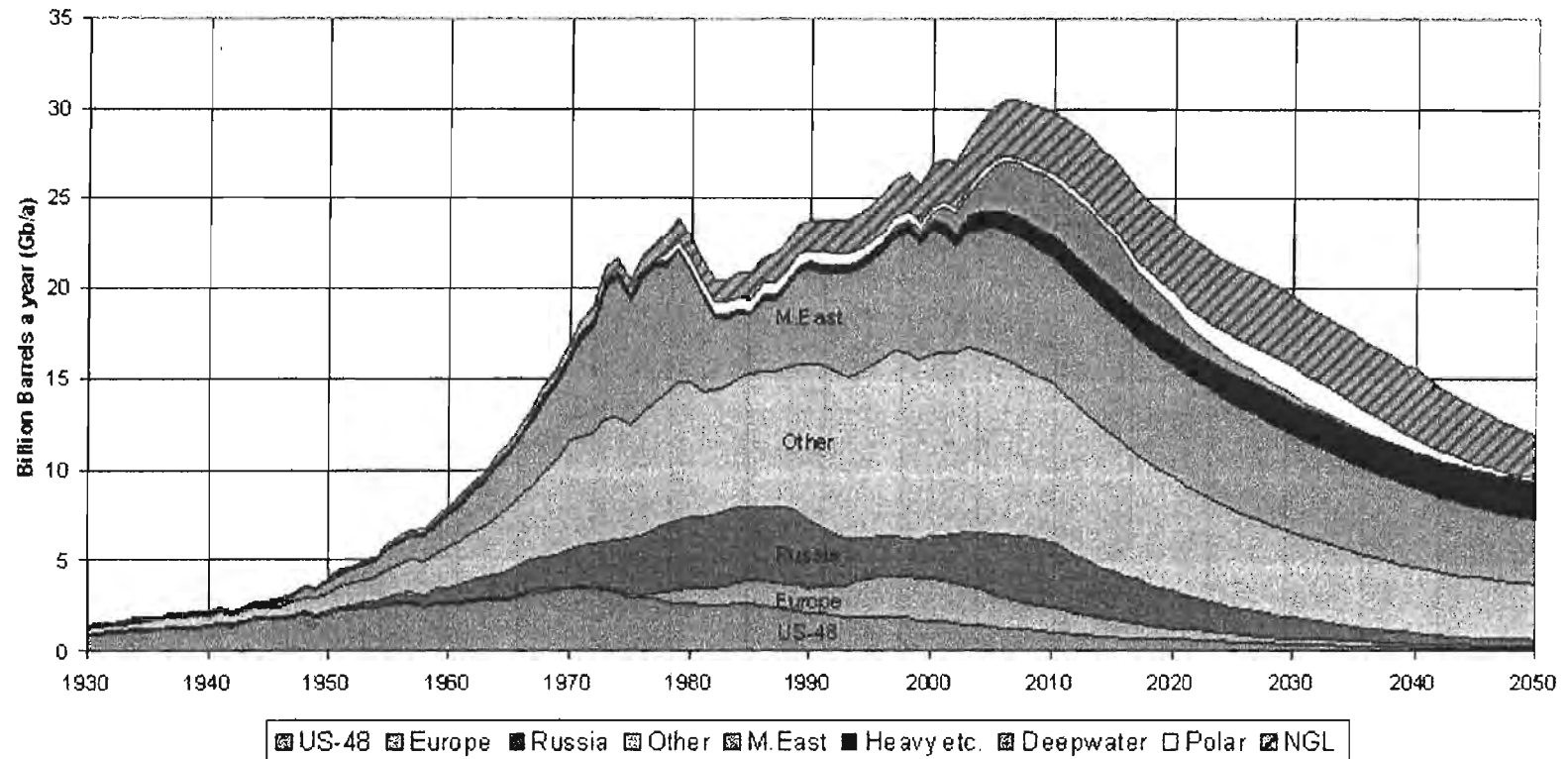
convencional tocará techo en algún momento de la segunda década del siglo XXI, entre 2010 y 2020.

Así pues, los expertos están divididos en dos grandes grupos: unos creen que todavía faltan entre 28 y 38 años para que la producción de petróleo convencional toque techo y otros piensan que serían entre 8 y 18 años, la cual es una brecha de 10 a 30 años, muy pequeña para fines históricos, pero sus diferencias en la perspectiva temporal del fin del crudo barato son cruciales a la hora de determinar las prioridades, tanto en términos de políticas energéticas como de iniciativas políticas y económicas que den paso a la planeación de la transición tecnológica del modelo energético.

La posibilidad de que la producción mundial de petróleo alcance el pico máximo confronta a los EUA y al mundo con un problema de administración de riesgo sin precedentes. Al aproximarse el pico, los precios de los combustibles líquidos y la volatilidad de precios se incrementarán en forma dramática, y, si no se efectúa una mitigación preventiva, los costos económicos, políticos y sociales estarán fuera de todo precedente. Las opciones factibles de mitigación existen tanto del lado del suministro como de la demanda, pero para que tengan un impacto sustancial, deben iniciarse con más de una década de adelanto a la aparición del pico.

Para salvar nuestro futuro energético enfrentaremos condiciones nunca antes vistas en cuanto a tamaños de población, estructura energética y poderes transnacionales controlando el mercado, así que las soluciones deberán ser de una alta capacidad de innovación estratégica y con un amplio sentido del equilibrio de un sistema humano conectado globalmente, con márgenes de variación muy estrechos en las variables clave que determinan el equilibrio estratégico entre economía, energía y estabilidad política de las regiones involucradas.

## OIL AND GAS LIQUIDS 2004 Scenario



La producción global de petróleo se está aproximando rápidamente a su pico, aún si se incluyen los líquidos del gas natural y el petróleo extraído de yacimientos caros, riesgosos, en aguas profundas y regiones árticas.

## 2. MOVIMIENTO MUNDIAL DE ENERGÍA BASADA EN EL HIDRÓGENO

La introducción de la energía del hidrógeno en los mercados dominantes representa un proceso complejo y de largo plazo. Sin embargo, sus grandes ventajas potenciales implican que se estén invirtiendo cantidades considerables de tiempo, dinero y energía política en proyectos de alcance mundial, tratando de iniciar –y moldear- la introducción.

Uno de los estímulos intrigantes del hidrógeno es su potencial para producción en pequeña escala a partir de recursos disponibles localmente. Esto podría tener implicaciones de gran alcance para la forma de los futuros sistemas de energía, los cuales han evolucionado a partir del esquema “Mientras más grande, mejor”.

Por supuesto, las grandes multinacionales están seriamente comprometidas en los proyectos de hidrógeno: BP tiene proyectos de demostración en Reino Unido, España, Singapur y Australia. Shell está en Islandia, Holanda, Norteamérica y Japón. Compañías de servicio eléctrico desde BC Hydro en Vancouver hasta Osaka Gas en Japón están invirtiendo y produciendo excelentes proyectos de demostración. Pero al mismo tiempo organizaciones más pequeñas, tales como la comunidad en Nunavut, o en la isla mediterránea de El Hierro, e en Vanuatu en el Pacífico del Sur, están abiertos a desarrollar la energía del hidrógeno como una forma de administrar sus propios futuros energéticos<sup>12</sup>.

La energía del hidrógeno está siendo desarrollada en forma extensa para aplicaciones en transporte. Algunos de los primeros autobuses con celda de combustible (CC) alimentada por hidrógeno en el mundo se operaron en Vancouver, y están en vías de desarrollo proyectos canadienses para desarrollar infraestructura, estándares y entusiasmo para vehículos a hidrógeno.

El gobierno japonés, que inicialmente apoyó al hidrógeno desde la perspectiva de la I&D en forma indirecta, decidió que se requerían proyectos de demostración significativos. Financió seis estaciones de recarga de hidrógeno en el área de

Tokio, las cuales serán utilizadas por los vehículos de Toyota, Honda, Nissan, Daimler Chrysler, GM y otros fabricantes para las demostraciones masivas.

El gobierno de los EUA, que ha financiado la investigación en hidrógeno por varios años, anunció varios programas nuevos para ubicar al hidrógeno en un lugar preferencial en la agenda del Departamento de Energía.

La Unión Europea, aparte de estar patrocinando un proyecto de demostración en el cual 30 autobuses de CC a hidrógeno están siendo probados en varias ciudades alrededor de Europa, estableció un "Grupo de Alto Nivel" integrado por ejecutivos que coordinarán la visión europea en la energía del hidrógeno.

Al mismo tiempo, países tan diversos como Singapur, Australia, China y Argentina han comenzado a desarrollar planes ambiciosos para introducir al hidrógeno en sus muy diferentes economías energéticas.

Está claro para todos que solo con una fuerte voluntad política se pueden generar los reglamentos y políticas necesarias para apoyar un cambio tecnológico de esa envergadura.

Adicionalmente el hidrógeno no está disponible para ser extraído de ningún yacimiento natural, por lo que su fabricación a partir de otras materias primas utiliza energía, cuesta dinero y produce emisiones. Y esta situación agrega capas de complejidad adicionales al contexto político en el que tiene que ser introducido, como podemos ver respecto de dos situaciones contrastantes.

En Islandia, la energía renovable es abundante, barata y disponible. Los recursos geotérmicos y eólicos exceden ampliamente el consumo de la población. Por esto, en Islandia, la posibilidad de producir hidrógeno barato y limpio es muy real. Islandia estableció públicamente su voluntad e intención de convertirse en la primera economía del hidrógeno. Y la empresa Shell se encargará de acompañar el cambio y aprender en este entorno único las lecciones que deberá aplicar luego

en gran escala para mantener su negocio energético vigente ante la transición energética.

En contraste, en los EUA, los recursos renovables son menos comúnmente usados—aún cuando son extensos potencialmente hablando— y el principal apoyo político para el hidrógeno parece provenir de las industrias nuclear y del carbón. De hecho, el estado más avanzado en la aplicación de energías renovables es California, por lo que podría ser orientado como estado piloto para experimentar el desarrollo de la economía del hidrógeno.

Aún en Europa, los grupos ambientales iniciaron un escrutinio duro y prolongado respecto de las motivaciones y expectativas para las actitudes positivas hacia la energía del hidrógeno de un amplio rango de jugadores, y han cuestionado ambos. Han descrito al hidrógeno como una cortina de humo detrás de la cual las compañías petroleras intentan continuar la explotación de los recursos fósiles, y la industria nuclear, muy impopular ante el público europeo, podría continuar absorbiendo financiamiento gubernamental. Por supuesto, sería absurdo pensar que de un plumazo se desecharían grandes sistemas de producción energética para dar paso al hidrógeno sin un periodo de transición, adaptación e integración a las nuevas cadenas de producción de energía, desechando la tecnología obsoleta en el momento preciso.

### **3 TECNOLOGÍAS DE APLICACIÓN DE HIDRÓGENO EN TRANSPORTE**

#### **TECNOLOGÍA BÁSICA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE**

Cuando se utiliza hidrógeno en celdas de combustible de baja temperatura (p.ej. celdas de combustible de membrana, PEMFC) se pueden eliminar completamente las emisiones nocivas. En el proceso de generar energía a partir del hidrógeno y el oxígeno del aire, solo se obtiene agua como producto de reacción (agua sin minerales, como agua destilada).

El uso de hidrógeno en celdas de combustible operando a un alto nivel de temperatura genera emisiones cien veces menores que en las plantas eléctricas convencionales. El hidrógeno es un portador secundario de energía, permitiendo la posibilidad de introducir en una forma flexible diferentes fuentes de energía renovable en el mercado de combustibles. Para evaluar el impacto ambiental del hidrógeno como combustible, se debe considerar la cadena de combustible en su totalidad desde la fuente de energía primaria hasta la aplicación final.

Comenzando en los cuarenta, se efectuó una investigación bastante intensiva en las celdas de combustible de alta temperatura. Davtyan trabajó con óxidos sólidos (SOFC) en 1946; Broers y Katelaar trabajaron con carbonato fundido (MCFC) . General Electric desarrolló las primeras celdas de combustible de membrana en 1962, utilizando membranas de intercambio iónico, y estos resultados de investigación se utilizaron en el programa Gemini de celdas de combustible de la NASA.

Daimler-Benz emitieron un boletín de prensa en 1997, anunciando que introducirían vehículos al mercado en el 2004, los cuales serían impulsados por celdas de combustible tipo Membrana de Intercambio de Protones [Proton Exchange Membrane (PEM)]. Esta meta ha generado un enorme surgimiento de investigación y desarrollo mundial en celdas de combustible, principalmente en las de tipo PEMFC.

En la mayoría de los pronósticos, que describen las áreas clave de los desarrollos tecnológicos futuros, la energía proporcionada por celdas de combustible se ubica en un alto nivel. Paul Saffo, quien dirige el Institute for the Future en Menlo Park, California, predijo en 1999 que el advenimiento de la celda de combustible traería el mayor cambio a la comunidad humana, solo después del impacto logrado por la computadora.

Si se habla del hidrógeno como el combustible para el futuro, el tópico de la celda de combustible le sigue muy cerca. La celda de combustible está predestinada para la transformación de la energía química almacenada en el hidrógeno. Sin



embargo, varios tipos de compuestos hidrocarbonatos (gas natural, biogas, propano, etc.) también son apropiados para su uso en celdas de combustible. La única condicionante es una alta relación de hidrógeno en estos combustibles. Su habilidad para convertir energía almacenada químicamente directamente en energía eléctrica es un punto esencial, por lo cual las celdas de combustible son posicionadas destacadamente. Los generadores convencionales en su mayoría necesitan un proceso de transformación de tres etapas.

Este proceso más directo indica una mayor eficiencia. Además, la celda de combustible no tiene partes móviles y por lo tanto no hay pérdidas por fricción ni desgaste, sólo una baja frecuencia de ruido.

Como una celda individual genera solo un voltaje muy pequeño, las celdas individuales se ensamblan de acuerdo con el voltaje total requerido, llamándose entonces "pila de celdas de combustible".

La energía eléctrica se almacena en hidrógeno y se puede recuperar de nuevo por medio de las celdas de combustible (CC). La mayoría de las CC operan con oxígeno del aire, por lo que no se necesita almacenar oxígeno.

Existen varios tipos de CC que se distinguen por su construcción y modo de funcionamiento. El modo fundamental de operación se describe tomando la celda tipo PEM como ejemplo:

Si el hidrógeno está en el ánodo y el oxígeno en el cátodo ocurrirá lo siguiente: Una molécula de hidrógeno se descompone en dos átomos de hidrógeno y al mismo tiempo los electrones se liberan. Los iones hidrógeno resultantes se mueven a través del electrolito, el cual es permeable a ellos, y en el cátodo, se oxidan con el oxígeno y forman agua. Para generar el agua se requieren los electrones, los cuales han sido donados al ánodo al principio. Sin embargo, el electrolito es un aislante que no es permeable a los electrones. Cuando un conductor eléctrico conecta a los dos electrodos, los electrones se transportan del ánodo al cátodo generando una corriente eléctrica utilizable. Este proceso

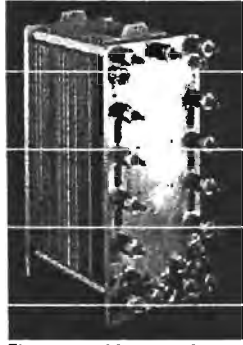
continúa desarrollándose en tanto haya suficiente hidrógeno y oxígeno en el ánodo y cátodo. De acuerdo al actual estado del arte, se distinguen seis tipos de CC, que se clasifican por sus electrolitos:

### **CC de membrana de electrolito polimérico (PEMFC)**

Este tipo de celda es simple en su manejo. Muestra una alta densidad de potencia con poco énfasis y requiere únicamente oxígeno del aire en lugar de oxígeno puro como gas reactivo. El hidrógeno se genera con ayuda de un reformador. Las CCPEM reaccionan sensiblemente al monóxido de carbono (CO). Este gas bloquea el catalizador anódico, lo que ocasiona una caída en eficiencia. Como electrolito se utiliza una membrana polimérica de sulfonamida.

La salida de energía de la CCPEM se puede regular con una dinámica muy alta, por lo que están excelentemente enfocadas para aplicaciones móviles y suministro de energía descentralizada. Actualmente la CCPEM se encuentra en el centro de la evolución total de la CC. Una de las bases para esto es el gran potencial que este tipo de celda tiene para la producción en masa. Los costos de un bloque de celdas están en el orden de 50 euros/Kw (2002).

La CCPEM es muy flexible en su campo de aplicaciones, desde teléfonos móviles pasando por plantas de enlace para servicio calorífico hasta impulsar vehículos. Los sistemas de potencia con CCPEM se están probando en varios tipos de prototipos de vehículos. Los autos, minibuses y autobuses ciudadanos serán el primer vehículo de motor, que esté equipado y vendido con impulsores CCPEM. Luego seguirán las VANs y otros vehículos comerciales ligeros.



Celda de Combustible tipo PEM

#### 4. TENDENCIAS GLOBALES EN TRANSPORTE

En EUA el transporte consume 2/3 de los 20 millones de barriles de petróleo consumido por día<sup>11</sup>.

Los EUA importan el 55% del petróleo que utilizan. En respuesta a las preocupaciones en seguridad energética generadas por la dependencia en fuentes externas de energía, así como preocupación por la contaminación regional del aire, el DOE dio inicio a varios programas para desarrollar tecnologías que ofrezcan un mejoramiento en la eficiencia energética y que produzcan y utilicen energía de fuentes domésticas y renovables.

El proyecto de *Flotilla controlada y Demostración y validación de infraestructura* está pensado como un importante primer paso al desarrollo de infraestructura en hidrógeno en paralelo con vehículos de CC para permitir una decisión de comercialización en el 2015, apoyándose en que los consorcios seleccionados desarrollarán una solución de sistema(s) completa que incluirá todos los elementos de infraestructura y desarrollo de vehículos.

Se espera que el equipo integrado en el consorcio incluya:

Un fabricante de autos y una compañía de energía

Un proveedor de hidrógeno  
Un proveedor de CCs  
Una compañía eléctrica y/o una de gas  
Un operador de flotilla vehicular (flotillas de origen privado, local, estatal o federal)  
Proveedores de sistemas y componentes  
Pequeños negocios  
Universidades, organizaciones educativas y de vanguardia  
Gobiernos estatales, locales y federales.

Hace dos años se celebró el primer centenario de la introducción del automóvil al mercado en forma masiva por Henry Ford en 1903. Este hecho confirmó a la industria norteamericana del automóvil como una industria hiper-madura, la cual ha salvado varias crisis existenciales a lo largo de su historia, las cuales podrían desembocar próximamente en la extinción de los gigantes automotrices de la forma como están estructurados<sup>8</sup>.

Hay algunos hechos muy relevantes que merecen consideración:

Chrysler se salvó de la bancarrota en los ochenta gracias al soporte federal. Sin embargo, tuvo que ser adquirida por la alemana Daimler para sobrevivir

Ford también se salvó de la bancarrota apoyada por restricciones federales a las importaciones japonesas

GM estuvo al borde del desastre en 1992 dependiente del no aumento de tasas de interés para su deuda

En los noventa, la modernización e imitación de las técnicas japonesas ayudaron a mantener el juego en Detroit

La salvación llegó con los SUVs (Sport Utility Vehicles), Minivans y pick-ups, los cuales han mantenido a flote las ventas de los tres grandes, a salvo por las restricciones a los competidores japoneses. Sin embargo, ya los están fabricando y comercializando en el sur de los EUA.

La industria automotriz de los EUA está en una trampa, con un quinto de más de la capacidad que necesita, sin poder reducirla por la imposibilidad de despedir trabajadores y cerrar fábricas ineficientes, adicional al pasivo en pensiones.

GM tiene un déficit en su fondo de pensiones de 19 mil MDD, del mismo tamaño que su capitalización de mercado. Si se le agrega el fondo médico y el peso del sindicato, todos estos fondos significan 1000 dólares más por cada auto que fabrica.

Desde 2001 el gobierno de EUA ha rescatado agricultores, acereras y aerolíneas con subsidios y barreras a la importación, por lo que en cualquier momento los automotrices apelarán al capítulo 11 de la ley de bancarrotas, sin que esto implique resolver sus problemas fundamentales.

Chrysler reportó pérdidas por 1200 MDD hace dos años solo en un trimestre.

Detroit ha perdido mercado del 73% al 63% desde 2001.

Los alemanes y japoneses (recordar 2ª guerra mundial) han comenzado a producir vehículos que compiten en los nichos más fuertes, lo cual puede llevar a los 3 grandes a la extinción del negocio tal como lo habían entendido hasta ahora, dando paso a un periodo de transición enlazado con los esfuerzos para desarrollar nuevos vehículos con base en el hidrógeno o híbridos, redefiniendo el esquema de negocio en línea con las transnacionales petroleras.

GM ha estimado que para construir 11,700 estaciones de recarga se requerirían entre 10 y 15 mil millones de USD, con lo que un conductor siempre estaría a 2 millas de una estación de hidrógeno en áreas urbanas y habría una cada 25 millas en carreteras. Esa concentración soportaría 1 millón de autos a hidrógeno. Un ejecutivo de Ballard (CCs) minimiza esta inversión al compararla con los 85 mil millones de USD que los operadores de cable gastan en la instalación de sistemas de cable. El Programa de Hidrógeno en Carreteras de California tiene una meta de 200 estaciones.

Byron McCormack, director ejecutivo de la división CCs de GM, compara<sup>21</sup> la inversión en la construcción de una infraestructura para hidrógeno en el siglo 21 con la inversión en ferrocarriles en el siglo 19 o la creación del sistema interestatal de carreteras en el siglo 20, y agrega: "Habrá un momento relativamente pronto en el cual estas situaciones relativas a decisiones de cómo-lo-voy-a-financiar serán más importantes que la tecnología".

## **ALIANZAS ESTRATÉGICAS**

GM y Exxon Mobil firmaron un acuerdo en 1998 para conducir la investigación en el "hardware" las opciones de combustible para los vehículos de la próxima generación". Esta colaboración ha generado varios desarrollos de frontera para acelerar el desarrollo de un procesador de gasolina que provea hidrógeno a un vehículo impulsado por una celda de combustible (CC). La siguiente generación en el sistema de CC alimentado por gasolina será de la mitad del tamaño y mitad del peso de la actual generación.

GM y BMW AG iniciaron un proyecto conjunto en abril de 2003 para desarrollar estaciones de recarga de hidrógeno que serán necesarias cuando los vehículos impulsados por hidrógeno reemplacen a los autos y camiones a diesel y gasolina. Las compañías anunciaron esta colaboración en una feria de comercio en Hanover, Alemania. Las dos compañías están trabajando para colocar vehículos a hidrógeno en circulación para el 2010. GM invierte en CCs que impulsen motores eléctricos en los vehículos y BMW investiga la posibilidad de quemar hidrógeno en motores de combustión interna como una alternativa más práctica.

GM y Japón: En marzo de 2003 GM recibió aprobación para operar un vehículo impulsado por hidrógeno líquido en rutas públicas japonesas. El HydroGen3, vehículo con CC de GM fue el primero en circular en calles de Japón con hidrógeno líquido. Su rango de autonomía de 400 kms. Era el más alto en ese momento en Japón. Larry Burns, VP de I&D de GM declaró que Japón es uno de

los países clave en la vanguardia del desarrollo de tecnología de CC y una economía del hidrógeno.

En enero de 2003 GM anunció que planeaba ofrecer tres diferentes sistemas de propulsión híbrida en 12 de sus modelos populares, incluyendo camiones, SUVs. y sedanes medianos<sup>9</sup>. Esta medida se enlazaba con la meta anual de Toyota para vender 300,000 vehículos híbridos en el 2005, partiendo de un nivel de 140,000 en 2003.

El Departamento de Energía de los EUA, en apoyo a la Iniciativa Presidencial del Hidrógeno como combustible, ha asignado 190 millones de dólares para cuatro proyectos de prueba que situarán vehículos con celda de combustible en las calles en condiciones reales de manejo. En este plan de costos compartidos, los cuatro líderes de proyecto, Daimler Chrysler, Ford, GM y Chevron Texaco, están financiando la otra mitad para complementar los 380 MDD para las pruebas por cinco años, y sus representantes firmaron el 30 de marzo pasado el acuerdo de reconocimiento para arrancar la siguiente fase de I&D en este proyecto.

ChevronTexaco está trabajando con Hyundai y UTC Fuel Cells como parte del programa para probar la producción de hidrógeno y los métodos de recarga. Daimler Chrysler ha aportado 70 MDD al programa, en el cual operará sus vehículos a hidrógeno F-Cell y Sprinter. En conjunto con BP America, probarán las CC de Ballard Corp. En climas cálidos como Sacramento y en climas fríos como Detroit. Ford Motor Co. y BP America van a probar las CC de Ballard en Detroit, Orlando y California, además de probar diferentes opciones de productos de hidrógeno.

General Motors está invirtiendo 44 MDD para desplegar flotillas de demostración de 40 vehículos en Washington D.C., Nueva York, California y Michigan. Shell Hydrogen está trabajando con GM instalando cinco estaciones de recarga de hidrógeno en Washington, D.C. ciudad de Nueva York, en California y entre Washington,D.C. y Nueva York. Como parte del acuerdo de "aprendizaje

demostrado” firmado con el gobierno de EUA, los cuatro equipos captarán y compartirán datos con el departamento de energía.

Estas alianzas entre transnacionales petroleras y automotrices demuestran su compromiso para enfrentar juntos el proceso de transición energética, compartiendo el riesgo tecnológico y financiero de establecer las bases para desarrollar los vehículos comerciales a hidrógeno en el mínimo plazo posible sobre la base de que ninguna corporación o país por más poder y recursos que tenga a su alcance va a poder enfrentar el proceso de transición en forma aislada.

## **5. ESTRATEGIAS NACIONALES, CONTINENTALES Y CORPORATIVAS**

Cuando se hace referencia a la economía del hidrógeno, la proposición de valor realmente está enfocada en el combustible. Implicará un cambio en infraestructura pero no tan drástico como podemos pensar, declaró Matthew Fairlie, VP de Stuart Energy Systems, el mayor fabricante de tecnología energética para hidrógeno electrolítico. Añade que la utilización de la infraestructura existente ayudará a una introducción económicamente viable de esta nueva tecnología. “No es como cuando se creó la infraestructura original para gasolina en la industria petrolera a partir de desechos. La separación del hidrógeno del agua por electrólisis requiere grandes cantidades de energía eléctrica. En febrero de 2003 arrancaron la primera estación de recarga vehicular de hidrógeno con base electrolítica, con generación adicional de potencia de respaldo. La compañía ha estado involucrada en más del 60% de las estaciones instaladas o planeadas en Norteamérica y es el mayor proveedor de estaciones electrolíticas en Europa.

Otra compañía líder es Air Products, con base en Pennsylvania, ya que es un proveedor global de hidrógeno y tiene más de 20 estaciones de carga instaladas en los EUA. Entre estas está la primera estación mundial de carga de hidrógeno utilizando gas natural como alimentación, la cual se ubicó en Las Vegas en 2002. El hidrógeno se produce por reformación de gas para recarga de vehículos. El



hidrógeno en exceso alimenta una CC estacionaria que suministra electricidad a la red pública.

Aún cuando en EUA se está pensando en el gas natural como un camino crítico para el futuro del hidrógeno, dependerá de otras circunstancias tales como la localización geográfica y las fluctuaciones constantes en los precios de combustibles su viabilidad como eslabón fundamental.

El metanol es un vector prometedor, especialmente en sitios geográficos donde no exista la distribución del gas natural. El metanol se puede transportar fácilmente por medio de la infraestructura existente para el transporte de gasolina y reformarse localmente o utilizado inmediatamente por dispositivos que funcionen con CCs alimentadas directamente con metanol.

Dominique Kluyskens, director de mercados de CC para Methanex Corp. (Vancouver), indica que la red de gas natural solo está disponible para el 50% de los mercados norteamericano, europeo y japonés, siendo una opción donde no hay gas natural o donde es muy caro.

La inversión en hidrógeno es antecedente al manejo de carros a hidrógeno. Desde 2003 ya se podían encontrar compañías relacionadas con el hidrógeno en sectores tales como energía, materiales industriales y servicios así como en áreas de servicios de negocios, herramental y aún bienes de consumo. Según Morningstar, una firma de investigación en inversión global de Chicago, si se consideran las 12 categorías sectoriales del índice bursátil S&P 500 las acciones relacionadas al hidrógeno ya se pueden encontrar en 6 de las 12 categorías o en más del 50% del índice total. Existen 218 compañías que insertan total o parcialmente estas tendencias energéticas en sus estrategias de negocios.

Las condiciones económicas actuales, y el bajo valor presente de compañías basadas en el hidrógeno, cuyo potencial se verá realizado en cuatro a siete años

son asombrosamente similares a las condiciones que existían cuando los actuales gigantes tecnológicos como Microsoft, Dell, IBM y otros hicieron sus inicios<sup>13</sup>.

En la actualidad, las nuevas renovables-incluyendo viento, solar, geotérmica y bioenergía moderna- aportan suficiente electricidad para más de 300 millones de casas mundialmente. En 2003, se invirtieron aproximadamente 20,300 MDD en nuevas renovables (casi un sexto de la inversión global total en equipo de generación de potencia). En la próxima década, se espera que esta cifra se aproxime a los 85 mil MDD anualmente. Las tasas de crecimiento de algunas renovables están más cercanas a las del mercado de computadoras que las tasas de crecimiento de un dígito de las economías energéticas actuales. "Algunas personas descartan esta tasa de rápido crecimiento en una industria que consideran pequeña, pero este pensamiento es miope y reproduce la actitud de IBM hacia Microsoft al inicio de los ochenta<sup>6</sup>."

El impresionante potencial de crecimiento de las renovables está atrayendo a los inversionistas corporativos de grandes ligas. La japonesa Sharp Corp. produce el 27% de las celdas solares mundiales, mientras que General Electric es ahora un líder mundial en el negocio eólico global, dos años después de adquirir una compañía eólica dinámica joven.

Los constantes aumentos en los precios de la gasolina les han recordado a los automovilistas de otro tipo de inseguridad inherente a nuestra dependencia de los combustibles fósiles. Estos combustibles, que se continúan beneficiando de un bloque de subsidios gubernamentales, también conllevan un conjunto de costos ocultos en forma de daño a la salud humana y a los sistemas naturales.

Alrededor del mundo, un número creciente de naciones han reconocido los beneficios económicos y ambientales de la energía renovable y están activando reducciones de impuestos y otras medidas de política para balancear parcialmente las ventajas de que gozan los combustibles fósiles. Entre las naciones con

cambios de política más permisivos hacia el desarrollo de nuevos mercados energéticos para las renovables en los próximos 5 años están Brasil, China e India, las cuales además forman parte de la nueva alianza estratégica geopolítica llamada BRIC, de la cual también forma parte Rusia.

En China, donde han ocurrido apagones en ciudades importantes por la falta de capacidad eléctrica ante la demanda explosiva, las renovables tienen el potencial de proveer energía limpia a partir de fuentes domésticas y diversificar la economía China. El reconocimiento de estas ventajas ha llevado al gobierno chino a considerar una nueva y ambiciosa política en renovables.

En otro signo del cambio que viene, casi 90 naciones se comprometieron a elevar su participación de energía derivada de fuentes renovables uniéndose a la **Coalición de Energía Renovable de Johannesburgo**, que surgió del debate energético en la Cumbre Mundial del 2002.

Como parte de este esfuerzo el gobierno alemán fue anfitrión de **Renovables 2004** en junio del año pasado-oficialmente llamada la Conferencia Internacional en Energías Renovables- en Bonn. Constituyó un evento histórico al que asistieron miles de científicos, ingenieros, ejecutivos de negocios, líderes no gubernamentales y funcionarios gubernamentales, para acelerar el momentum tecnológico y económico que están alcanzando las fuentes energéticas, eólicas, solares y bio-potencia en el centro de los sistemas de energía mundiales.

**El mayor crecimiento en renovables** ha ocurrido en un puñado de países- Alemania, Japón, Dinamarca y España- y en varios estados de EUA incluyendo a California, Texas, Minnesota y Pennsylvania.

La principal recomendación para el desarrollo de estas tecnologías es que las políticas deben ser apoyadas y consistentes para evitar los ciclos de ascenso y

caída que alteran la confianza del inversionista e inhiben el desarrollo de industrias domésticas fuertes<sup>6</sup>.

Tal vez la mejor forma de ejemplificar la vastedad del esfuerzo requerido para establecer un sistema energético basado en hidrógeno sea un breve análisis de los mapas de ruta desarrollados para grandes bloques de consumo energético en el mundo desarrollado. Se analizarán los casos norteamericano, canadiense, europeo, japonés y una breve revisión a la situación de México.

## **ESTRATEGIA EUA**

Está planteada en el National Hydrogen Energy Roadmap, editado inicialmente en noviembre de 2002 y en constante evolución y revisión.

El plan de acción está firmado por los representantes de Ford Motor Co., Air Products & Chemicals, Inc., Chevron Texaco Technology Ventures, Princeton University, Quantum technologies, Avista Labs y la National Hydrogen Association. Aclara que "no es un plan gubernamental de I&D ni un plan de comercialización industrial. Más bien, explora el amplio rango de actividades requeridas para desarrollar el potencial en hidrógeno para resolver las necesidades de los EUA en seguridad y diversidad energética y medio ambiente. Intenta inspirar a las organizaciones que invierten en sistemas energéticos de hidrógeno-públicos y privados, estatales y federales, negocios y grupos de interés- para involucrarse en un esfuerzo coordinado para reducir el riesgo, mejorar el desempeño, disminuir el costo e instrumentar un futuro energético seguro, limpio y confiable".

Enuncian que el uso extendido del hidrógeno afectará cada aspecto del sistema energético de los EUA, desde la producción hasta el uso final. Los segmentos individuales de un sistema energético con hidrógeno- producción, distribución, almacenamiento, conversión y aplicaciones de uso final- están muy interrelacionadas y son interdependientes. El diseño e instrumentación de una

economía del hidrógeno debe considerar cuidadosamente cada uno de estos segmentos así como el “sistema completo”.

Los comentarios sobre estas áreas fundamentales:

**Producción-** Se requiere la coordinación gobierno-industria en los sistemas de producción de hidrógeno para reducir los costos totales, mejorar la eficiencia, y reducir el costo del secuestro de carbono. Se requieren mejores técnicas tanto para estaciones centrales como para producción distribuida de hidrógeno. Los esfuerzos deben enfocarse en la mejora de procesos comerciales existentes tales como la reformación por vapor del metano, la gasificación multicomcombustible y la electrólisis. El desarrollo debe continuar en técnicas avanzadas de producción tales como los métodos biológicos y la disociación termoquímica del agua con energía solar o nuclear.

**Distribución-** Se requerirá una infraestructura de distribución altamente expandida para apoyar el desarrollo esperado en producción, almacenamiento, conversión y aplicaciones del hidrógeno. Los esfuerzos iniciales deben enfocarse en el desarrollo de mejores componentes para los sistemas de distribución existentes, tales como sensores de hidrógeno, materiales de tuberías, compresores y mangueras de alta presión. Via proyectos demostrativos se deben probar diversos componentes de la infraestructura del hidrógeno tanto para sistemas centrales como distribuidos en concordancia con las aplicaciones de uso final (estaciones de recarga y parques de potencia)

**Almacenamiento-** El almacenamiento de hidrógeno es una tecnología clave. Ninguna de las tecnologías actuales satisface todos los atributos del almacenamiento de hidrógeno buscados por los fabricantes y usuarios finales. Se requiere la coordinación gobierno-industria en I&D para reducir costos, mejorar desempeño y desarrollar materiales avanzados.

**Conversión-** La conversión de hidrógeno en formas útiles de energía eléctrica y térmica implica el uso de CCs, motores reciprocantes, turbinas y calentadores de proceso. Se requiere I&D para incrementar las capacidades de manufactura y reducir los costos de las CCs así como desarrollar motores reciprocantes y turbinas de mayor eficiencia y menor costo, y explorar las propiedades fundamentales de la combustión del hidrógeno.

**Aplicaciones-** En última instancia, los consumidores deben ser capaces de utilizar la energía del hidrógeno para transporte, generación de electricidad, y dispositivos electrónicos portátiles tales como celulares y laptops. Las demandas clave del consumidor incluyen seguridad, conveniencia, accesibilidad y bajo impacto ambiental.

Dos áreas adicionales de amplia interrelación deben convertirse en impulsores poderosos para apoyar el desarrollo de estos retos:

**Educación pública y Alcance informativo-** El desarrollo de la energía del hidrógeno es un tema complejo , y la gente no tiene certeza sobre los impactos en el ambiente, salud pública, seguridad y seguridad energética. Al final, las preferencias de los consumidores orientan las opciones seleccionadas en los mercados energéticos, el desarrollo tecnológico y la política pública. Informar al público a través de materiales educativos y de entrenamiento, curricula científico y programas públicos ayudará a ganar la aceptación del público para los productos y servicios relacionados al hidrógeno.

**Códigos y estándares-** La disponibilidad de códigos y estándares uniformes para el diseño, manufactura y operación de sistemas de energía a hidrógeno, productos y servicios puede acelerar dramáticamente el proceso de desarrollo desde el laboratorio al mercado. La coordinación gobierno-industria puede acelerar los procesos de códigos y estándares, los cuales deben trascender las fronteras y ser aceptados por organismos internacionales para alcanzar aceptación global.

Cada paso requerirá el desarrollo de planes detallados de I&D para cada una de las áreas tecnológicas mencionadas, en cadena con una excelente coordinación de recursos y un compromiso significativo.

### **Frases significativas para promover el hidrógeno en EUA:**

Hidrógeno es "El combustible de la libertad"

El hidrógeno aporta independencia y una opción ambiental!

El hidrógeno resuelve la dependencia del petróleo extranjero y mejora el ambiente

El hidrógeno está en todos lados- "está justo en nuestro patio trasero"

Una economía del hidrógeno incluye otros combustibles

El hidrógeno-está trabajando (es un negocio vigente en la actualidad)

El hidrógeno es seguro

El hidrógeno es una solución energética de largo plazo

**El hidrógeno es el equivalente del "hombre en la luna" para esta generación**

Los participantes en este esfuerzo incluyen 138 organizaciones, desde el gobierno federal hasta los más sofisticados laboratorios.

### **ESTRATEGIA CANADIENSE**

Los canadienses publicaron en el 2003 el plan estratégico "Canadian Fuel cell-Commercialization Roadmap", en forma conjunta entre el Gobierno de Canada, el consorcio Fuel Cells Canada y la consultora Pricewaterhouse Coopers. Su objetivo es acelerar la comercialización en gran escala de las tecnologías de CC por las compañías canadienses de CC. Como podemos observar, el caso canadiense tiene una filosofía fundamentalmente comercial y de negocios, al ser un país sin grandes problemas en cuanto al suministro energético, con una población relativamente pequeña y una gran abundancia de recursos hidroeléctricos.

Proyectan la demanda global de CCs en 46 mil millones de dólares para el 2011, y el potencial para el 2021 sería de 2.6 trillones de dólares<sup>20</sup>.

El esfuerzo de colaboración que proponen requiere:

- Desarrollar una estrategia nacional en CCs durante 2004, la cual refleje el compromiso de colaboración de todos los accionistas clave
- Identificar a los accionistas campeones clave que promoverán continuamente la industria canadiense de CCs
- Educar al gobierno y a otros usuarios iniciales respecto a los beneficios de largo plazo de las CCs y porqué deben ellos demostrar/ comprar productos con CC
- Apoyar la I&D, el desarrollo de productos y los primeros productos en el mercado

La industria tiene el compromiso de colaborar con el gobierno y la comunidad de investigación para desarrollar una estrategia nacional en CCs, así como compartir los costos de instrumentar las acciones identificadas.

## **ESTRATEGIA EUROPEA**

Janez Potocnik, Comisionado Europeo de Ciencia e Investigación, declaró en el evento anual de la HFP (Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform) en Bruselas, Bélgica, el 17 de marzo 2005, que “debemos confrontar la realidad del reto energético- la producción de petróleo alcanzará su pico máximo relativamente pronto; la demanda de energía está creciendo- la ecuación no puede continuar balanceada. Ya se tienen indicadores de que las cosas no están bien en el frente energético. Necesitamos desarrollar urgentemente fuentes alternativas de energía limpia y convertidores para mitigar los efectos de las GHGs así como la dependencia de Europa de los combustibles importados. Cuando se aplican “inteligentemente” el hidrógeno y las celdas de combustible tienen un relevante potencial ambiental y económico”.



La HFP reunió el 17 y 18 de marzo pasado en su segundo evento a más de 500 expertos y ejecutivos de alto nivel y generó la **Strategic Research Agenda and Deployment Strategy** la cual fue presentada y debatida, recibiendo un fuerte apoyo de los accionistas. En el evento se discutió el desarrollo y despliegue del hidrógeno y las celdas de combustible para portar y convertir la energía en forma limpia. El comisionado Potocnik declaró en el evento inaugural que " Es crucial que utilicemos esta **oportunidad única para trabajar juntos** y hacer de esta Plataforma Tecnológica" un suceso, para construir la base de la Sociedad Pública y Privada, y en el momento adecuado trabajar para el desarrollo de una Iniciativa Conjunta de Tecnología. Este es el momento para que la industria tome el compromiso. La comunidad de investigación necesita crear conocimiento. La unión necesita promover un ambiente político favorable y cuando el comercio vea todos estos elementos en su lugar, **el dinero real fluirá**. Yo comprometo mi apoyo y cuento con todos ustedes para ayudar a que se realice".

Los dos documentos de la fundación proponen un **programa de despliegue altamente enfocado de investigación y desarrollo a diez años**, como el requisito para desarrollar tecnología de clase mundial para:

- Reducir los costos del sistema de CC por un factor de 10 (hasta 100 para aplicaciones en transporte)
- Incrementar el desempeño y durabilidad de los sistemas de CC actuales por un factor de 2 o más para diversas aplicaciones
- Reducir los costos del hidrógeno entregado (comparado a los portadores actuales basados en combustible fósil) por un factor de 3 o más, y
- Alcanzar densidades competitivas de almacenaje de hidrógeno consistentes con el rango de operación de los vehículos y los requerimientos de diseño.

Jeremy Bentham, director del Consejo Asesor de HFP, solicitó a todos los involucrados que el gasto conjunto en investigación iguale a los niveles de EUA y Japón, de al menos €250 millones de euros, y declaró: Una sola cosa es segura:

nada permanece estático en el mundo de avance rápido del hidrógeno y la tecnología de CC.

### **PROYECTO WE-NET (Japón)**

El gobierno japonés está preocupado respecto a la disponibilidad y costo en el largo plazo de los combustibles fósiles, así como en las consecuencias ambientales de su uso. Como resultado, por los últimos 26 años ha jugado un papel activo en el desarrollo de nuevas fuentes de energía. Para el Japón, el hidrógeno podría convertirse en una fuente energética significativa en el futuro.

En 1992 la Agencia de Ciencia y tecnología Industrial del Ministerio de Industria y Comercio Internacional (MITI) diseñó propuestas para el proyecto de la Red Internacional de Energía Limpia usando Conversión de Hidrógeno (WE-NET: World Energy Network) como parte del "New Sunshine Project".

El proyecto WE-NET aspira a la utilización eficiente de energía a partir de fuentes renovables. Estos recursos no están distribuidos armónicamente en el mundo. El proyecto busca establecer las tecnologías necesarias para la construcción de una red mundial de energía de hidrógeno. El sistema incluirá el uso de renovables para producir hidrógeno a partir del agua, la conversión del hidrógeno en una forma adecuada para su transporte, y la distribución del hidrógeno para su uso como combustible en ciudades, industrias y generación eléctrica. La difusión mundial de tecnologías relacionadas al hidrógeno contribuirá a la reducción de emisiones de bióxido de carbono, cubrir la demanda internacional de energía, crear oportunidades para la producción adicional de energía, y apoyar a los países que tienen amplios recursos de energía renovable de un medio para exportarlos.

El proyecto está dividido en tres fases y se extenderá por un periodo de 28 años, desde 1993 hasta el 2020.

## EL CASO DE MÉXICO

EN febrero de 2003, Jeremy Rifkin, autor de *La economía del hidrógeno*, impartió una conferencia en el marco de la exposición EXITEP (Encuentro Internacional de Tecnología Petrolera) en Coatzacoalcos, ante un público petrolero de nivel representativo. En la misma, expuso que a más tardar en el año **2011** las reservas nacionales tocarán techo (pico de Hubbert) y la producción empezará a descender a una tasa de 2.7% anual en los próximos 29 años. Comentó que existe un estudio de PEMEX en el que en 2030 México podría convertirse en importador neto de crudo. Culmina su propuesta recomendando a México buscar alianzas para desarrollar energías alternativas y enfrentar adecuadamente la transición a la economía del hidrógeno.

El último diagnóstico al respecto lo presentó el 16 de agosto pasado el director general de PEMEX Exploración Producción (PEP), Ing. Carlos Morales Gil, indicando que la declinación del campo Cantarell (aporta dos tercios de la producción nacional) iniciará a finales del 2006, a un ritmo de 2% anual al principio y 10% al final. Si la tasa de restitución de reservas es del 57% se especula cuando se terminará el petróleo y México se convertirá en importador. El Ing. Morales indica que con los proyectos actuales se podrá transitar sin problema hasta el año 2015. "La meta es restituir el 100% de reservas en 2010 y prolongar el tiempo en el que el país sea autosuficiente."

El problema fundamental es la escasa capacidad financiera para PEMEX y la incertidumbre respecto al tipo de reservas que serían incorporadas, ya que el petróleo más profundo y pesado será más costoso y menos redituable para su aprovechamiento integral. En fin, el pico de Hubbert para México está cercano y los representantes de PEMEX no parecen preocuparse, por lo que se requerirá una prospectiva de las posibilidades reales de restituir reservas y aportar opciones para el desarrollo de alternativas energéticas en el mediano plazo.

A finales de mayo pasado, en la UNAM se constituyó la sociedad civil Red Nacional de Hidrógeno (RNH2) para promover en México la incorporación del hidrógeno como un vector energético importante y lograr la transición hacia una economía basada en energía limpia y sustentable. Con ella se busca promover y realizar proyectos de desarrollo tecnológico y de demostración en hidrógeno empleando estudios científicos y técnicos, en colaboración con la industria nacional y la academia. También se pretende fomentar el desarrollo y la incorporación de nuevas concepciones, principios y tecnologías relacionadas con el hidrógeno para el desarrollo industrial en México. En la RNH2 participan 31 instituciones educativas e instancias del sector público y privado, como la Facultad de Ingeniería, el Programa Universitario de Energía, los centros de Investigaciones en Materiales Avanzados y de Investigación en Energía de la UNAM, la CFE, el CONACYT, Grupo CARSO, IPN, IMP, Instituto Mexicano del Transporte, LyFC, PEMEX, UAM, Total Energy H2, Sociedad Nuclear Mexicana, Academia de Ingeniería, Secretaría de Energía, etc.

## **6. TENDENCIAS EN EL USO DE HIDRÓGENO COMO PORTADOR DE ENERGÍA EN LOS NUEVOS ESCENARIOS GLOBALES**

El sector de transportación tiene una decepcionante historia ambiental: empobrece la calidad local del aire, ocasiona acidez en la lluvia y es un fuerte emisor de CO<sub>2</sub>. En 1990, el sector transporte fue responsable del 25% del uso mundial de energía y del 22% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub><sup>16</sup>.

En Suecia<sup>17</sup> se efectuó un estudio para analizar las opciones de combustible en el sector transporte bajo fuertes restricciones de emisión de CO<sub>2</sub>. La metodología consiste en desarrollar escenarios energéticos que cumplen las restricciones al CO<sub>2</sub>, en los que se hacen 3 preguntas específicas:

1. ¿Cuándo es una decisión efectiva en costo desarrollar la transición de la gasolina/diesel a otro combustible?
2. ¿A que combustible es efectivo en costo cambiar?
3. ¿En que sector se utiliza en forma más efectiva en costo la biomasa?

Se considera a los vehículos a CC como la mejor solución a los problemas de emisiones, pero debe evaluarse si se usan biocombustibles líquidos o hidrógeno (procedente de renovables o combustibles fósiles con secuestro de carbono).

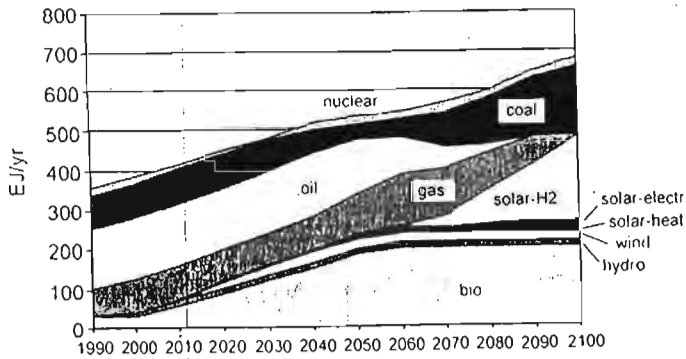
Se utiliza un modelo de energía global (GET 1.0) desarrollado específicamente para este proyecto. El modelo utiliza programación lineal que se va agregando globalmente y tiene tres sectores de uso final. Se ajusta para cumplir demandas energéticas fijadas exógenamente mientras se cumple un objetivo de concentración atmosférica específica al costo más bajo del sistema energético. Se seleccionó una concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico de 400 ppm.

Se analizan los potenciales de aportación de energía primaria y el desarrollo de tecnologías energéticas futuras (costos y eficiencias de conversión). Se analiza la infraestructura de distribución y recarga de combustibles para el sector transporte así como las suposiciones de las características de los vehículos.

La parte más interesante es la referente a la prospectiva de los precios de la energía por celda de combustible. Se tiene como referencia para el costo de las CCs la cantidad de 3000 USD/kW (1999) y esto podría trasladarse hasta un costo total de CC para un auto que consumiera 40 kW hasta más de 100,000 USD. Se espera que la I&D y la producción en masa reduzcan significativamente los costos. Chrysler ha estimado que el costo puede caer hasta 200 USD/kW aún con tecnologías de fabricación actuales. Un estudio detallado de Direct Technologies sugiere que los costos pueden alcanzar niveles tan bajos como 20 USD/kW (1998). Debe notarse que estas metas son muy ambiciosas: las gasoelectricas cuestan 600 USD/kW, o sea, 30 veces más. Si se pudieran alcanzar estas metas de costo se revolucionaría la industria eléctrica. Para este estudio se supuso que la reducción en el costo de las CCs sería hasta 60 USD/kW.

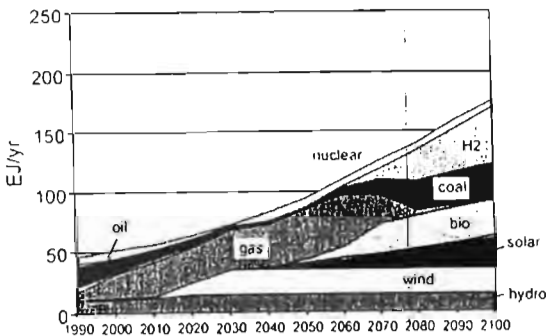
En seguida se presentan las gráficas más relevantes producto de este análisis.

### Escenario 400 ppm



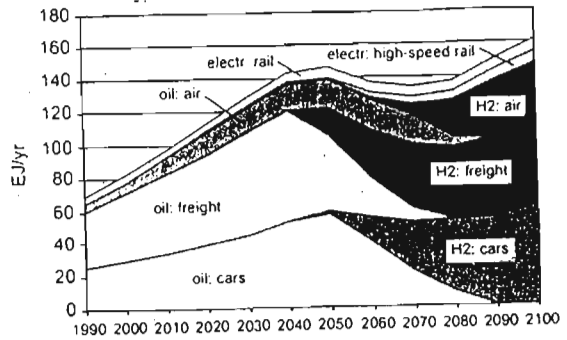
Suministro mundial de energía primaria

### Escenario 400 ppm

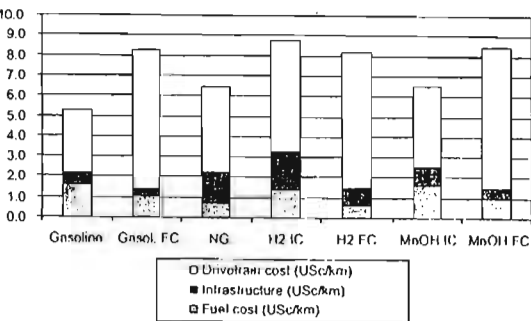


Suministro mundial de electricidad por tipo de combustible

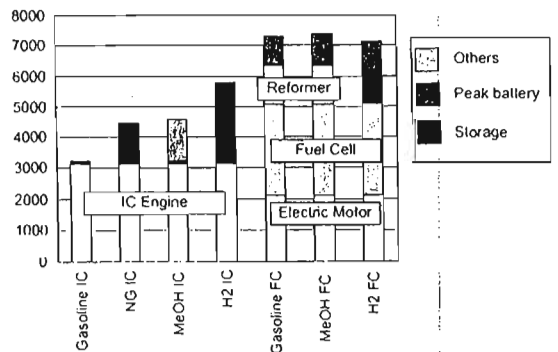
### Escenario 400 ppm



Utilización mundial de combustibles de transporte  
Hay una transición del combustible de petróleo en motores de combustión interna para autos (oil, cars) al hidrógeno utilizado en CCs (H2, cars). La misma transición ocurre en camiones, autobuses y barcos (freight).



Costo del ciclo de vida (UScents/ km) en el caso base. Aquí, el metanol y el hidrógeno se generan a partir de gas natural. No se incluyen impuestos al carbono en el precio de los combustibles. Es importante notar que los costos de infraestructura son bastante pequeños comparados a los otros costos involucrados en los motores del metanol o el hidrógeno, y que una evaluación más detallada de los costos de distribución y recarga no se espera que cambien significativamente las conclusiones globales.



Costos del tren-motor para autos (USD/ vehículo)

Las conclusiones más relevantes son:

Las energías eólica y solar arrancan de valores muy bajos y les toma varias décadas aportar una contribución significativa al suministro global de electricidad. El uso de gas natural crece fundamentalmente en el sector eléctrico. Hacia el 2050, se inicia la producción de hidrógeno a partir de gas natural para su uso en el sector transporte. Este crecimiento es menor que el de la biomasa. El petróleo se retira de la producción de electricidad y calor pero aumenta su uso en el transporte aunque a una tasa muy baja. El uso de carbón declina lentamente hasta el 2050 y crece rápidamente después debido al uso de tecnologías de secuestro de carbón en gran escala. La producción de hidrógeno a partir de energía solar alcanza 200 EJ/año al fin del siglo. En el sector transporte, el petróleo permanece como único combustible (excepto para uso eléctrico en trenes) hasta los años 2040-2050 cuando se inicia la transición a hidrógeno. El hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles ( gas natural y carbón, con tecnologías de decarbonización) y energía solar. El hidrógeno se utiliza en autos, camiones, autobuses, barcos y aviones.

Estos resultados representan las expectativas de un modelo conservador, ya que coinciden con fechas muy lejanas en este siglo para que las renovables crezcan significativamente y se considera una amplia disponibilidad de petróleo hasta el año 2040, por lo que deben servir como referencia de un caso base de prospectiva.

## **7. PROSPECTIVA TECNOLÓGICA DEL HIDRÓGENO COMO BASE DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRANSICIÓN**

Las celdas de combustible constituyen una familia de tecnologías . Cada una tiene características técnicas únicas y estrategias particulares para su comercialización. Una estrategia nacional razonable para los EUA debería considerar los requerimientos únicos de los mercados portátiles, estacionarios y de transporte,

así como tomar ventaja de los elementos comunes que se pueden identificar entre las diversas aplicaciones.

Esta aproximación requerirá de una consideración cuidadosa de los requerimientos de infraestructura compartida, el diseño de los esfuerzos de investigación, desarrollo y demostración que ofrecen beneficios genéricos; y estrategias que reflejan la secuencia de entrada al mercado para los diversos productos con celda de combustible. También requerirá inversión en precursores y combustibles portadores de hidrógeno avanzados, así como en el mejoramiento de tecnologías para producir, almacenar y transportar hidrógeno.

La educación, el entrenamiento y la aceptación del cliente son una parte importante del esfuerzo, comenzando en escuelas y extendiéndose a la educación vocacional y profesional y al público.

En cuanto a los esquemas de patentamiento<sup>19</sup> en la industria de Celdas de Combustible se tienen las siguientes cifras:

Nacionalidad de los propietarios de patentes: EUA, 49%; Japón, 28%; Alemania, 10%; Canada , 6%; Gran Bretaña, 2%; Suiza, 1% y Otros, 4%.

Nacionalidad de los propietarios de patentes en Canada: EUA, 53%; Japón, 15%; Canada, 7%; Francia, 4%; Alemania, 3%; Gran Bretaña, 3% y otros 15%

Líderes en patentamiento de tecnología de CC por número de patentes EUA: UTC Fuel Cells, LLC (139), Ballard Power Systems Inc. (77), NGK Insulators, Ltd. (55), Plug Power, Inc. (42), Siemens Westinghouse Power Generation (36), Fuji Electric Corporation R&D Co. Ltd. (35), Siemens Corporation (35) y otros más hasta llegar a niveles de 21 patentes como Honda y Toyota.



Como se puede observar a partir de estas cifras, el esfuerzo de patentamiento todavía no es muy alto y refleja la competencia por los mercados en EUA y Canada, para proteger eventuales desarrollos comercializables y demostrar presencia en el campo tecnológico. El siguiente nivel de análisis ya implicaría una revisión a fondo de los conocimientos protegidos para detectar las estrategias específicas de cada compañía en su esquema de protección en el mercado norteamericano.

A manera de ejercicio alternativo de costeo de desarrollo tecnológico de nivel macro se presenta la propuesta<sup>10</sup> para inversión federal en el desarrollo y comercialización de CCs para 10 años por un conjunto de organizaciones a través del Breakthrough Technologies Institute de Washington, D.C., originalmente liberada el 5 de septiembre de 2002.

La propuesta es invertir aproximadamente 5,500 MDD en 10 años, con recursos moviéndose desde investigación, desarrollo y demostración hacia adquisiciones y soporte de entrada al mercado, en tanto lo permita el desarrollo de la tecnología, reconociendo que las diversas tecnologías de CC están en diferentes etapas de desarrollo.

Esta inversión está dentro del rango tradicional de apoyo para desarrollo de tecnología de energía (¿será suficiente para las necesidades de una tecnología que podría ser la base de una revolución energética?). Un estudio del Servicio de Investigación del Congreso de EUA estimó que el apoyo federal para investigación para tecnologías de energía totalizó 84 mil MDD entre el año fiscal de 1973 y el de 1999, incluyendo 19.7 mil MDD (USD constantes) para tecnologías de energía renovable y eficiencia. En el mismo periodo se estimó la inversión federal en investigación en CCs en menos de Mil MDD.

Los beneficios sociales de la comercialización de CCs no son calculables con precisión pero los beneficios de seguridad energética y aire limpio fácilmente se encuentran en el rango de cientos de billones US de dólares.

Price Waterhouse-Coopers estimó en 2002 que el mercado para CCs podría ser tan grande como 1.7 trillones US para el 2020.

El Departamento de Energía de EUA estima que el desarrollo de CCs podría añadir 750,000 empleos a su economía para el 2030.

Programa	Inversión total en 10 años MDD
I&D	2,330
<b>Demostraciones/Adquisición</b>	
Demostraciones vehiculares	495
Adquisiciones para edificios federales	650
Otras adquisiciones	180
<b>Soporte de entrada al mercado</b>	
Incentivos a impuestos	500
Programa de "Buy-Down"	175
<b>Inversión en infraestructura</b>	950
<b>Remoción de barreras</b>	105
<b>Educación pública</b>	60
<b>Subtotal</b>	<b>5,445</b>
<b>Administración</b>	105
<b>Total del programa</b>	<b>5,550</b>

British Petroleum propone a las diversas trayectorias hacia una economía del hidrógeno como la base de una transición caótica.

#### Costos relativos de energía según BP

Combustible	Costo USD por GJ
Metanol	13
Electricidad	11
Hidrógeno (ex Gas)	8.50
"Petról" (fracciones)	8.25
Gas	4.50
Petróleo	4.25
Carbón	1.0

BP ha identificado más de 20 trayectorias, y ninguna ha sido identificada específicamente hacia una "economía del hidrógeno".

Existen muchas tecnologías en competencia y diferentes combinaciones posibles de tecnologías que forman trayectorias múltiples.

Es muy razonable que las trayectorias varíen significativamente en cada región. Para los EUA estiman que el gas natural formará el puente más propicio para las próximas 2 décadas.

**Virtualmente cada escenario propuesto implica una tecnología de transición.**

¿Cómo se puede planear para un cambio de infraestructura después de haber efectuado inversiones significativas durante una transición?

¿Cómo se puede evitar el ciclo de Crecimiento explosivo /Caída experimentado por tantas industrias históricamente quebradas, como los ferrocarriles, banda ancha, etc.?

¿Se podría revisar o adaptar la infraestructura una vez que una región ya invirtió en una trayectoria en particular?

¿Qué se va a hacer con la actual inversión de 1 trillón USD en infraestructura energética y como puede influenciar la selección de la ruta de producción?

¿Dónde está el mejor primer mercado/ región geográfica para el hidrógeno? En Islandia y Dinamarca porque hay una mayor abundancia de renovables y mínima disponibilidad de combustibles fósiles!

Este tipo de preguntas y muchas más que van emergiendo de los estudios de prospectiva tecnológica y estratégica deberán de irse respondiendo en dos niveles: local y global, para poder conciliar en el largo plazo la infraestructura que se vaya desarrollando en los ámbitos regional y local con el equilibrio global requerido para obtener el máximo aprovechamiento del combustible fósil en extinción en cadena con el vector hidrógeno en ascenso.

Como una forma de establecer un modelo de desarrollo tecnológico del hidrógeno en el nuevo horizonte que se percibe en este umbral de la transición energética se propone el esquema anexo, como una síntesis de las acciones que se están desarrollando y las estrategias observadas entre los actores más relevantes. Obviamente, en este esquema se tiene implícita la política de alianzas estratégicas que permite impulsar el desarrollo de los prototipos en toda la cadena de desarrollo tecnológico, así como las estrategias de protección de propiedad

industrial que habrán de negociarse entre los firmantes de alianzas para no perder el control de las innovaciones claves en el negocio del hidrógeno en el sector transporte y el sector de productos al consumidor.

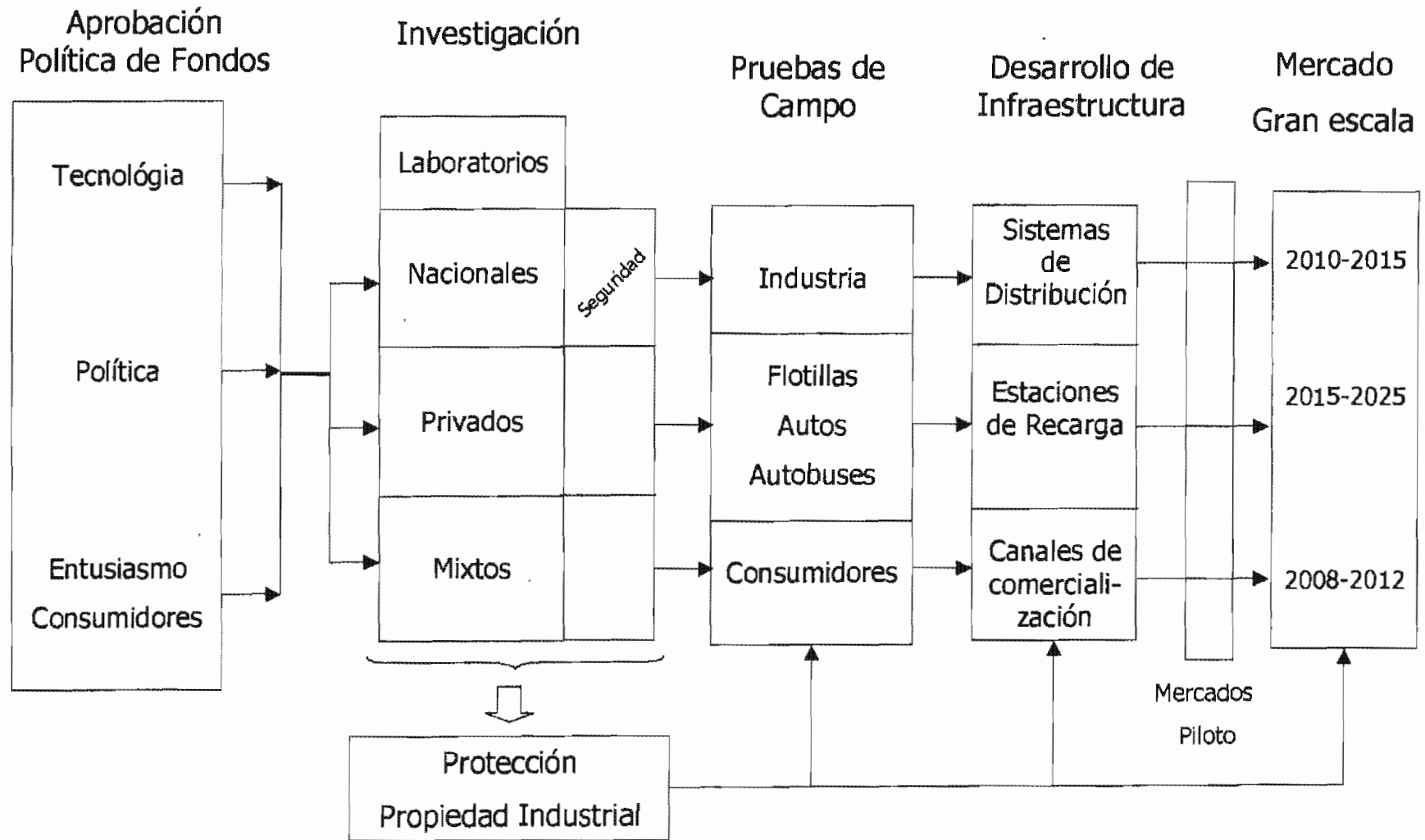
En la primera etapa la intervención de los gobiernos es fundamental para la aportación de fondos a la investigación, la instrumentación de políticas públicas de largo alcance que promuevan la entrada de nuevas tecnologías y la educación de la sociedad para asimilarlas más fácilmente y las regulaciones que permitirán proteger la seguridad de los consumidores al utilizar dispositivos con hidrógeno.

En la rama de investigación se tendrán todas las combinaciones posibles de esfuerzos de investigación en laboratorios nacionales, privados y mixtos, ya que los esfuerzos de desarrollo tecnológico se están segmentando para poder alcanzar más rápidamente las metas de acelerado desarrollo de tecnologías que demanda la carrera por el automóvil a hidrógeno más económico y eficiente. En seguida se observa el segmento de pruebas de campo para todas las flotillas de vehículos que requieren pruebas exhaustivas de su rendimiento, eficiencia y seguridad en el entorno urbano, así como la promoción de la imagen de los autos del siglo XXI ante los potenciales consumidores y la sociedad en general, de que una revolución tecnológica está en marcha.

La parte más compleja está al final de la cadena, ya que implica una gran organización y una fuerte inversión para ir instalando en forma progresiva las redes de suministro de hidrógeno para los vehículos de prueba, flotillas especializadas y los primeros consumidores. Incluso implica diseñar la forma en que el hidrógeno será transportado, en franca competencia con el gas natural, al cual eventualmente desplazará de la red de ductos existente.

En principio se tienen rangos de tiempo para la entrada en el mercado de gran escala de todas las innovaciones que estas tecnologías están anunciando para la industria, el transporte y los productos de consumo, y todos están a menos de 20 años de distancia.

# RUTA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL H<sub>2</sub>



## 8. POSICIONAMIENTO TECNOLÓGICO DEL HIDRÓGENO PARA LOS SISTEMAS DE CONSUMO ENERGÉTICO EN TRANSPORTE

En este momento el desarrollo tecnológico del hidrógeno como opción energética se encuentra en una etapa de incubación múltiple de alternativas en todos los campos que tienen que ver con la sustitución potencial de los combustibles tradicionales que aportan energía a las sociedades más desarrolladas.

Para establecer el grado de desarrollo alcanzado en esta etapa inicial se requeriría la elaboración de una matriz de amplio alcance, en la que se establecieran las regiones involucradas, el nicho de producto o sector en estudio, los indicadores básicos de eficiencia y competitividad establecidos y los grupos, consorcios o compañías que están trabajando en cada campo de conocimiento.

A manera de muestra del tipo de esquemas que se están generando para concentrar los proyectos más relevantes en desarrollo se presentan en el anexo no. 1 tres matrices reportadas en [www.fuelcells.org/charts.htm](http://www.fuelcells.org/charts.htm) (Fuel Cells 2000) dedicadas a Vehículos con CC (69), Reporte mundial de estaciones de recarga de hidrógeno (55) y Autobuses con CC (31), actualizadas a marzo de 2005.

Los parámetros descriptivos de los avances de cada proyecto se resumen como sigue:

**Vehículos:** Fabricante, Tipo, Año de lanzamiento, Tipo de motor, Celda de combustible (Tamaño/tipo), Fabricante de la CC, Rango (Millas/kms), Rendimiento (Millas/Galon), Velocidad máxima, Tipo de combustible, Introducción comercial (proyecto) y Fotografía

**Estaciones de recarga de H<sub>2</sub>:** Localización, Combustible (estado de despacho del H<sub>2</sub>), Proyecto (descripción básica), Fechas de avance, Técnica de producción de H<sub>2</sub>, Detalles/ Comentarios, Fotografía

**Autobuses:** Fabricante, Esquema de operación, Modelo, Año de lanzamiento, Tipo de motor, Celda de combustible (Tamaño/tipo), Fabricante de la CC, Rango (Millas/kms), Velocidad máxima, Tipo de combustible y Fotografía

En estas tablas podemos ubicar datos muy relevantes como base para desarrollar comparaciones tecnológicas entre fabricantes, estrategias tecnológicas de los consorcios competidores, y grado de desarrollo de cada alternativa. Sin embargo, para los objetivos de este ensayo bastaría decir que en estas tablas se encuentran reflejadas todas las líneas de desarrollo y opciones que se han presentado y discutido en los otros capítulos, y que las soluciones óptimas dependen del entorno en el que se está generando cada opción tecnológica, por lo que se seleccionará una opción líder para cada área para ejemplificar el grado de desarrollo vigente. En realidad el análisis fundamental se enfoca a las ventajas que aporta el hidrógeno para la sustitución de los energéticos tradicionales en las cadenas energéticas tradicionales.

En el área de vehículos los más representativos serían el Serie 7 de BMW, el Natrium de Daimler-Chrysler, el FCX de Honda, el FCHV de Toyota y el Sequel de GM. El AUTOnomy de GM está en etapa conceptual pero su meta de rendimiento es de 100 MPG y es un concepto revolucionario de vehículo diferente a los autos convencionales al ser diseñado para ser un vehículo eléctrico con un chasis único al que se le adaptan carrocerías diferentes lo cual genera amplias ventajas para la producción en serie de modelos diferentes.

En el área de estaciones de recarga estas se encuentran en etapa de experimentación, por lo que es prematuro evaluar su rendimiento como sistema de producción y despacho de hidrógeno en el mediano plazo, sobre todo, por la gran variedad de estados físicos y termodinámicos en los que se puede despachar el hidrógeno.

En el caso de los autobuses se presenta más o menos la misma situación. Sin embargo, en el factor clave que es el rango máximo de distancia con autonomía

se tienen 2 autobuses europeos: El Neoplan del estado de Baviera con 600 kms. y el NovaBus de Volvo con 563 kms.

Se anexa la tabla de proyectos de inversión y financiamiento de CCs.

En un simposio que analizó el futuro de la transportación personal en China en 2001 se presentaron varios análisis relevantes desde el punto de vista estratégico y tecnológico, destacando lo siguiente:

Las principales características sociales, económicas y ambientales relacionadas con los vehículos son la contaminación urbana y regional del aire, el consumo de energía por fuente, las emisiones de gases invernadero, el ruido y la seguridad.

Las opciones tecnológicas disponibles para atacar estos problemas en el futuro se dividen en dos ramas: Las tecnologías tradicionales mejoradas como mejores materiales convencionales, reducción de peso y menor resistencia aerodinámica, mayor potencia, mejora en eficiencia, gasolina y diesel más limpios, y las tecnologías alternativas disponibles como materiales más ligeros con menor resistencia aerodinámica en el área de estructura vehicular, híbridos (motor mas almacenamiento de energía) y celdas de combustible (alimentadas con hidrógeno combinación con reformadora) para el tren de potencia, y gas natural, alcohol e hidrógeno como combustibles alternos.

Heywood <sup>14</sup> (MIT) resalta que la eficiencia del motor de combustión interna ha sido mejorada casi en forma lineal con respecto al tiempo como un resultado de la innovación incremental. Toyota y Honda han sido los líderes en innovación de motores, mientras que los EUA han sido mejores en la innovación del proceso de manufactura.

En un estudio reciente del MIT, "On the Road in 2020: Life Cycle Analysis", se presentan y comparan las opciones tecnológicas para el año 2020. en la tabla se puede ver una muestra de los resultados.



## DESEMPEÑO POTENCIAL EN 2020

Combustible/ Sistema de propulsión (Vehículo avanzado)	Fecha	Rendimiento equiv. Con vehículo a gasolina Millas/gal	Consumo total de energía del sistema MJ/km	Emisión total de CO <sub>2</sub> del sistema Grn Carb/km	Aumento de precio Dólares
<b>Gasolina MCI</b>	<b>Presente</b>	<b>28</b>	<b>3.6</b>	<b>72</b>	<b>0</b>
MCI evolucionado	2020	43	2.3	47	800
Gas, MCI, VA	2020	49	2.1	42	2200
Diesel, MCI, VA	2020	56	1.8	37	3300
Gas, MCI híbrido, VA	2020	71	1.5	30	4400
GNC, MCI híbrido, VA	2020	73	1.5	24	4500
<b>H2, CC híbrido, Gas Natural</b>	<b>2020</b>	<b>94</b>	<b>1.7</b>	<b>34</b>	<b>5000</b>
Reformación gas, CC, híbrido	2020	42	2.4	49	6200

MCI: Motor de Combustión Interna, VA: Vehículo avanzado, GNC: Gas natural comprimido, CC: Celda de combustible

Las conclusiones se pueden resumir así:

Son factibles mejoras cuantificables en el desempeño y eficiencia del MCI, en el orden de 1% por año, en las próximas dos décadas

Si se consideran en forma conjunta el motor, transmisión y desempeño vehicular, la mejora en el consumo energético total en el largo plazo puede alcanzar un factor de dos (100%)

El efecto de combustibles alternativos en el desempeño del motor, consumo de energía y emisiones será modesto, excepto para el hidrógeno.

La energía total de la cadena energética ("del pozo a las llantas") y las emisiones para el mejor MCI y sistemas basados en CC son similares en magnitud.

Estas conclusiones únicamente refuerzan la percepción que se tiene del alto potencial del vehículo de CC a hidrógeno como una opción "revolucionaria" para enfrentar los problemas de límite de eficiencia a los que han llegado los vehículos comerciales convencionales. La tecnología del vehículo a hidrógeno ofrece una

alternativa más eficiente para aprovechar mejor los combustibles disponibles en cada región.

**Para el año 2015 se proyecta que en EUA habrá Mii millones de vehículos con un consumo de combustible de 10 mil millones de barriles de petróleo al año, con las emisiones relacionadas y los problemas de seguridad energética al importar un alto porcentaje de esta cantidad.**

Si los EUA no se convierten en el escaparate mundial de todas las opciones posibles para transformar su sistema de producción y consumo de energía en un sistema muy eficiente, competitivo y amigable con el medio ambiente, los efectos sociales, económicos, ambientales y políticos serán de una magnitud catastrófica.

Otro análisis muy relevante es el correspondiente a la situación estratégica de la potencia emergente en este siglo XXI que es China, ya que su plan de desarrollo de transporte afectará en un nivel global al mercado de energéticos, materiales, tecnología y comercio.

Para los chinos es importante el acopio de la experiencia mundial en la solución de problemas de congestión, contaminación, consumo de energía, selección de tecnología, planeación urbana y administración del tráfico, ya que para efectos prácticos son una economía "grass roots" (sin antecedentes) en la instalación de un sistema de transporte vehicular

Asimismo, requieren clarificar los costos y beneficios sociales y materiales del desarrollo de un nuevo vehículo que fuera accesible a un gran número de familias chinas de clase media (para enfatizar la perspectiva de involucrar tecnologías avanzadas, China ha desarrollado una iniciativa llamada el Vehículo Chino de Nueva Generación (CNGV por siglas en inglés)), por lo que están explorando las oportunidades para cooperación internacional en el desarrollo del VCNG. Finalmente, el gobierno chino requerirá asesoría para remover las barreras a un desarrollo razonable de un sistema de transporte de uso personal y la industria

automotriz paralela al mismo, así como alentar la cooperación entre el gobierno y la industria para la promoción de el VCNG y las tecnologías relacionadas.

China tiene el beneficio de ser capaz de adaptar el conocimiento, tecnología y estrategias de administración que muchos otros países han perfeccionado por los últimos 95 años.

En EUA existen 770 automóviles por cada 1000 personas. Eso significa que literalmente cada hombre, mujer y niño podrían estar en la carretera al mismo tiempo. La velocidad de incremento en los autos per cápita en los EUA actualmente es muy baja y finalmente se aproxima a la saturación, aún cuando el millaje de manejo per cápita todavía aumenta.

El automóvil ha influenciado la vida norteamericana en una forma muy profunda<sup>15</sup>, al mismo nivel que el teléfono, radio, televisión y otros desarrollos en telecomunicaciones. Los efectos de estas innovaciones son complementarios y aditivos, y el proceso de adaptación llevó 100 años. En China se espera que tome mucho menos. Las lecciones aprendidas para desarrollar un sistema de transporte más eficiente de acuerdo con Wachs son las siguientes:

**1. El automóvil como un elemento fundamental de la economía.** Uno de cada seis trabajadores encuentra en los autos y camiones la fuente de su empleo: construcción, reparación, manejo profesional, aseguramiento, licenciamiento, prueba, construcción, mantenimiento de carreteras, etc. Este hecho tiene un gran impacto político en los Estados Unidos, afectando la economía y la política externa.

**2. La importancia de los caminos, carreteras, estacionamientos e infraestructura de soporte al automóvil y camión.** Actualmente, en las ciudades de EUA, el 30% de la tierra está dedicado a calles y carreteras, y el área de estacionamiento comprende otro 10%. 95% de esta área constituye calles locales

y caminos rurales que llevan el 5% del tráfico y 5% de esta área está dedicado a carreteras y autopistas que transportan 95% del tráfico. El financiamiento de todos los caminos se realiza con impuestos de todos los niveles.

**3. Impactos ambientales del automóvil.** El automóvil tiene un efecto mixto en la salud. El acceso al cuidado médico facilitado por el auto es una de las variables más importantes que aumentan la expectativa de vida. Por el contrario, la contaminación del aire ocasionada por emisión de gases y la contaminación de aguas por escapes desde los caminos, así como el desecho de autos viejos, llantas, partes y aceite usado ocasiona un gran impacto ambiental. Se requiere la aportación constante de nuevas tecnologías para crear un sistema de transporte sustentable.

**4. Relaciones entre movilidad o viaje y estructura urbana. El auto ha afectado profundamente la forma de las ciudades.** Anteriormente la densidad de población de las ciudades era mayor por la dificultad de transportación. El sistema público de transporte y el auto, en conjunto con la creación de suburbios y la descentralización han disminuido las densidades y han hecho a las ciudades más vivibles, pero al seguir aumentando la concentración se incrementa la densidad y el impacto ambiental.

**5. El impacto del sistema de transportación en la distribución del bienestar en la sociedad.** Los patrones modernos de uso de la tierra están diseñados con el auto como parte del sistema, y aquellos que no tienen auto (adultos mayores, pobres, minorías y discapacitados) quedan fuera de ciertos beneficios. En EUA los autos son la causa de 41,000 muertes al año, incluyendo peatones y ciclistas, más que todas las muertes por guerra en su historia. Es la causa principal de muerte para los menores de 35 años de edad. Implica mejoras en la administración del tráfico.

Por lo tanto, se requiere que el diseño urbano y la planeación de comunidades estén al mismo nivel de sofisticación que el auto. Se deben privilegiar otros modos de transporte personal para evitar la inequidad y la invasión de la mancha carretera en el entorno urbano y suburbano.

Para consolidar la información tecnológica con la información estratégica y generar los mapas de ruta del desarrollo del hidrógeno en los diferentes sistemas políticos, económicos, culturales, tecnológicos, sociales y energéticos se deberán analizar todas las variables mencionadas en este apartado, estableciendo los medidores de desempeño continuo que permitan la evaluación del avance integral de las propuestas para ir integrando la nueva tecnología de transportación en el tejido social, urbano y rural con el menor impacto ambiental y el máximo aprovechamiento de las fuentes de abastecimiento energético.

## **9. PROSPECTIVAS DE LAS COMPAÑÍAS ENERGÉTICAS GLOBALES**

El presidente de la Royal Dutch Petroleum Co. (Shell), Jeroen van der Veer, declaró ante el 14º. Congreso Mundial del Hidrógeno en Montreal 2002: Shell cree en el hidrógeno y está poniendo dinero en la mesa. Somos ya un inversionista significativo y estamos listos para invertir más si surgen las oportunidades. Enfatizó que era difícil de predecir la importancia futura del hidrógeno ya que dependería de varios factores, resaltando tecnología, política y entusiasmo de los consumidores. "El futuro no está grabado en piedra- de hecho el futuro energético todavía está agarrado con pinzas".

La inversión del gobierno es esencial pero la mayoría del capital vendrá del sector privado. Las compañías están haciendo un muy buen trabajo en sacar las tecnologías de los laboratorios y ponerlas a trabajar en la industria. Reiteró como cruciales la apertura y transparencia en el desarrollo del hidrógeno y las CCs, sobre todo en seguridad.

La conclusión global del ejercicio prospectivo al 2050 de Shell indica que “Eventualmente el hidrógeno se convertirá en el vector dominante, pero la infraestructura llega mucho después de las primeras aplicaciones de “nicho”.

Esta visión tiene congruencia con la forma en la que se está desarrollando el hidrógeno en una multiplicidad de nichos a todos los niveles, estableciendo la viabilidad del hidrógeno en proyectos piloto que van desde la escala de una flotilla de autobuses en una ciudad pequeña hasta la adopción del hidrógeno como modelo energético nacional en el caso de “países desarrollados pequeños” como Islandia y Nueva Zelanda. La macro tendencia parece ser la construcción de abajo hacia arriba para ir sumando experiencias, enlazando redes, e infraestructuras localmente viables, pasando a niveles regionales, nacionales y eventualmente a la escala global en el largo plazo.

La **Agencia Internacional de Energía** propuso la siguiente comparación en costos futuros del hidrógeno (2002)<sup>18</sup>:

PRODUCTO	COSTO DE PRODUCCIÓN {USD/GJ}
Carbón/Gas/Petróleo	1-5*
Electricidad de carbón/gas-CO <sub>2</sub>	15-18
Electricidad de nuclear	10-12
Hidrógeno de gas natural- CO <sub>2</sub>	8-10
Hidrógeno de carbón- CO <sub>2</sub>	10-13
Hidrógeno de biomasa	12-18
Hidrógeno de viento costa afuera	20-30
Hidrógeno de nuclear	15-20
Hidrógeno de cogeneración HTGR	10-25

\*Requiere actualización a precios de petróleo de 70 Usd/barril.

Como se puede observar, en la medida que el costo de los combustibles fósiles siga creciendo y el del hidrógeno vaya bajando, llegará un punto de quiebre en el que el hidrógeno será la tecnología de selección para un desarrollo sostenible de largo plazo.

En cuanto a la British Petroleum (BP) tiene amplia experiencia en la producción de hidrógeno: 1200 toneladas cada día. De acuerdo con sus expertos, esta cantidad podría impulsar un millón de autos a hidrógeno actualmente. Aún cuando existen pocos autos en circulación, BP suministra este combustible para vehículos de investigación y prototipos de fabricantes de autos en Inglaterra, Alemania, EUA y Australia. Actualmente, lo produce a partir del gas natural.

Desde 2003, tres autobuses circulan en Londres con hidrógeno de BP. El hidrógeno se transporta a la estación de llenado por autotanques en forma líquida superenfriada y se almacena en este estado casi como un combustible convencional.

Desde 2003, BP, en conjunto con Air Products y la BMW realizaron un estudio en el que desarrollaron los escenarios futuros respecto de la forma como se podrá establecer el mercado de combustible para el hidrógeno. El objetivo de este proyecto fue el de explorar que estrategias son necesarias y con mayores ventajas para el lanzamiento de la energía limpia, para lo cual tomaron como modelo varias ciudades .

Según BP, después de todo, la energía limpia debe pagarse por si misma, incluyendo al hidrógeno. De acuerdo con el Dr. Michael Jones, experto líder en hidrógeno de BP, BP no cree que los automovilistas quieran pagar más por el hidrógeno de lo que pagan por el combustible actual. El es optimista respecto a que la energía del futuro se pueda producir a precios competitivos y afirma que sus cálculos muestran que es posible hacerlo.

En realidad, debemos observar todos estos esfuerzos y alianzas de diferentes compañías energéticas, automotrices, productoras de gases industriales, productores de equipo electrónico, etc. como un laboratorio de estrategias, en el cual todos están experimentando las formas en las que pueden establecer convenios para desarrollar su propia ruta de desarrollo tecnológico y comercial y así introducir el hidrógeno en los mercados que les interesan, midiendo las

capacidades de unos y otros y su nivel de sinergia para generar proyectos exitosos que los vayan posicionando en este nuevo campo mientras se lleva a cabo la transición energética.

## **10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La utilización del hidrógeno como el vector energético más probable en este siglo, no constituye un riesgo para la sociedad, ya que es susceptible de manejarse con seguridad y un mínimo de impacto ambiental.

Los combustibles fósiles están en el umbral de su eventual declinación y deberán ser sustituidos, a pesar de las protestas de una sociedad global adicta a ellos.

La tecnología de celdas de combustible consumiendo hidrógeno como "caballo de batalla" ya demostraron su viabilidad tecnológica para constituirse en el dispositivo a optimizar, y están en el camino de posicionarse como una tecnología rentable y atractiva en una gran variedad de segmentos de consumo.

En el caso de nuestro país, se deberán de desarrollar todos los esfuerzos posibles para alertar a la sociedad sobre los riesgos de mantener una política energética de agotamiento acelerado de reservas petroleras sin ninguna acción estratégica que nos permita prepararnos hacia la transición den la próxima década.

Es necesario establecer en México un grupo de seguimiento en el entorno más apropiado que le de seguimiento integral al modelo de desarrollo tecnológico del hidrógeno en varias dimensiones incluyendo la evolución de las alianzas estratégicas y los esquemas de patentamiento que se estén desarrollando para aprovechar las ventajas de nuestro país como potencia aliado en la región de Norteamérica para probar alternativas tecnológicas.

Existen autores<sup>24</sup> que promueven la inclusión de el número de automóviles en operación por ser humano como un indicador explícito del impacto global de esta



tecnología de origen energético, ya que “ningún otro artefacto combina la magnitud del impacto, satisfacción de deseos y necesidades humanas, y la perversidad del auto privado”. Adicionalmente opina que los vehículos privados constituyen el problema ambiental más significativo en países desarrollados y uno de los problemas fundamentales en países emergentes. Actualmente existen 600 millones de carros en el mundo, uno por cada 10 seres humanos (uno por cada dos personas en EUA, Canada, Europa occidental, Australia, etc.) y se avisa un incremento sustancial en los países emergentes como China, India, Rusia, Brasil, etc. Como ya se mencionó anteriormente.

Por esta razón la identificación del transporte privado como una amenaza ambiental potencial de grandes proporciones nos permitirá ampliar su visión como una oportunidad de desarrollar alternativas que mitiguen la problemática del transporte en varios frentes.

Aún cuando son lógicas las preocupaciones respecto a las diversas formas que pueden adquirir las tecnologías de transición hacia la estructura final del sistema con base en el hidrógeno, en realidad, a la larga se impondrá el criterio del líder. El primer fabricante que genere e introduzca al mercado en gran escala un desarrollo tecnológico de gran alcance, penetración y eficiencia se constituirá en el líder, y todos los seguidores deberán definir sus estrategias e innovaciones con base en el reto que les imponga ese líder.

#### **VENTAJAS ESTRATÉGICAS DE LA TRANSICIÓN AL HIDRÓGENO PARA CADA PAÍS / REGIÓN:**

**EUA:** Salvación para su vulnerable industria automotriz y la permanente amenaza a su seguridad energética

**JAPÓN:** Salvación para su proyecto WE-NET de establecimiento de una economía del hidrógeno que los vuelva independientes energéticamente

EUROPA: Opción de desarrollo limpio para subsanar su escasez histórica de recursos petroleros y así afrontar la declinación del petróleo del Mar del Norte, la explosividad creciente del Oriente Medio, haciendo vulnerables sus intereses energéticos y la exigencia de sus sociedades de un desarrollo libre de contaminación.

Todos los promotores del hidrógeno deben estar concientes de los riesgos de promover una visión sin advertencias, así como de la importancia de asegurarse que tanto la transición como el sistema energético final no están comprometidos debido a que otras soluciones no fueron consideradas.

Los proyectos de demostración en curso en el ámbito mundial son esenciales para entender el potencial pragmático para el hidrógeno, soportado por intervenciones políticas positivas, inversiones de comunidades locales y de compañías multinacionales. Estas acciones determinarán los pasos a seguir. Sin embargo, hay que darle su lugar a los críticos, y su aportación será muy importante para afinar los pasos siguientes, ya que estos serán cruciales para asegurar que la energía del hidrógeno está posicionada para cumplir la mayoría de sus promesas.

En última instancia, el mayor reto que encara la introducción del hidrógeno como una fuente energética será la penetración en mercados de consumo dominados por muchos años por sistemas energéticos maduros.

La nueva tecnología tendrá que competir en un campo en el que todos sus componentes, desde estándares y especificaciones, hasta seguridad de productos, responsabilidades legales y secuencias de aprobación están firmemente atrincherados. En el largo plazo, el reto será hacer los sistemas más baratos y más eficientes para que el costo pueda disminuir.

Por lo pronto, las demostraciones que muestran las nuevas plataformas hidrógeno- electricidad son consideradas vitales para educar a los consumidores y

políticos respecto de las eficiencias y beneficios ambientales de estos sistemas, para atraer inversión y apoyo público y privado.

La transición global a un nuevo sistema de energía requerirá inversiones vanguardistas significativas para desarrollar nuevas tecnologías y bajar los costos. Sin embargo, en el largo plazo generará beneficios tales como calidad global mejorada del aire y el agua, mayor seguridad en el abasto energético, nuevos empleos, y una menor amenaza al cambio climático, el cual ha sido identificado en un reporte del pentágono como una grave amenaza a la seguridad.

En un mercado tan amplio y con tantas posibles variantes en cuanto a las fuentes primarias con las que se generará el hidrógeno, habrá tres mercados que definirán las grandes líneas de consumo masivo de hidrógeno, como son EUA, Unión Europea y Japón, en su primera fase, caracterizada por una carrera para posicionar al primer vehículo a hidrógeno en sus mercados locales con infraestructura local, para aprender velozmente de la experiencia comercial en campo y, desarrollando paralelamente una planeación estratégica para mantener el liderazgo en el mercado norteamericano, generar el vehículo que aproveche específicamente la estructura de crecimiento regional de suministro de combustibles para colocar la opción más competitiva en cuanto a precio, autonomía y eficiencia.

Obviamente el mercado norteamericano es el más relevante en cuanto al cambio en el sistema de transporte, al ser el que conjunta mayor poder de compra, mayor participación de competidores extranjeros, mayor consumo de energéticos en diferentes modalidades, mayor capacidad tecnológica para asimilar diversas opciones de evolución de dispositivos a hidrógeno, y mayor potencial para representar el campo de experimentación competitiva que requiere una nueva tecnología para afinarse hasta sus últimas consecuencias.

Todo este esfuerzo dependerá de los consorcios de empresas, agencias e instituciones integradas para ofrecer alternativas unificadas que involucren a todos

los sectores relevantes en el desarrollo de una revolución en el sistema energético, que es realmente el reto planteado por la transición energética que se vislumbra en el corto plazo.

La transición evolucionará a la velocidad que determine la anticipación de crisis de costo-suministro por parte del binomio transnacional petrolero-automotriz.

Si se toma como razonable el plazo de 10 años propuesto por los especialistas para efectuar un cambio sustancial en sistemas dependientes de combustible fósil, y se armoniza con los 20 años que se requieren para cambiar todo el parque vehicular de un país, los plazos que se están estableciendo en los escenarios prospectivos que establecen horizontes de 20, 30 y 40 años para la entrada masiva de la tecnología del hidrógeno, realmente apenas estamos en este 2005 en el tiempo justo para consolidar todos los esfuerzos iniciales que se están llevando a cabo en el campo del hidrógeno, para establecer plazos de planeación, desarrollo, seguimiento y evaluación de 5 años, de acuerdo con los planes que las propias compañías automotrices están presentando en el mercado.





Este seguimiento implicará un monitoreo paralelo de la evolución de la crisis petrolera de exceso de demanda y reducción de oferta, que puede acelerar el plazo para el arranque formal de la transición energética y poner presión sobre los actores principales en el proceso por las implicaciones estratégicas de un encarecimiento desproporcionado de los combustibles fósiles.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Boletín de prensa de ChevronTexaco, Enero 16, 2002
2. Comunicación privada Chrysalix con el autor, Boletín de prensa final, Junio 25, 2003
3. W.Youngquist, Geo Destinies: The Inevitable Control of Earth Resources Over Nations and Individuals, Portland, Oregon, National Book Co., 1997,p. 203
4. Rifkin, Jeremy, La economía del hidrógeno, 2002, Ediciones Paidós
5. Hesse, Stephen, Renewable energy sources offer global chance to shed fossil fuels, The Japan Times, Julio 8, 2004
6. Sawin, Janet L., Mainstreaming renewable Energy in the 21<sup>st</sup> century, Worldwatch Institute, Mayo 12, 2004
7. Watson, Jim Dr., The future potential for hydrogen: Results from scenario exercises, SPRU, U.K., H2NET Annual Meeting, Ral, Julio 10, 2002
8. Extinction of the car giants, The Economist, Junio 14, 2003
9. Nakamura, Akemi, Toyota to launch Prius hybrid versión this year, The Japan Times, Abril 17, 2003
10. Breakthrough Technologies Institute, Inc., Fuel Cells and Hydrogen: The Path Forward, Septiembre 5, 2002
11. Energy Efficiency & Renewable Energy, DOE, Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Demonstration and Validation Project. Pre-solicitation Public Meeting Notice en Southfield, Mich., Marzo 19, 2003
12. Hart, David, Dr., Hydrogen energy, a worldwide movement, Suplemento especial para la Convención Anual Canadiense del Hidrógeno en Vancouver 2003, The Globe and Mail, Junio 9, 2003
13. van Lierop, Wal, presidente de Chrysalix Energy Management, Inc. , Financing the Future, Suplemento especial para la Convención Anual Canadiense del Hidrógeno en Vancouver 2003, The Globe and Mail, Junio 9, 2003
14. Heywood, John, New developments in engines, fuels, emisión controls and the role of electronics, en el simposio "The future transport in China", Enero 12, 2001. National Research Council, Washington, D.C.














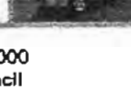

15. Wachs, Martin, Lessons learned on the road to more efficient transport systems, en el simposio "The future transport in China", Enero 12, 2001. National Research Council, Washington, D.C.
16. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996. Impacts, Adaptation and Mitigation Options, IPCC Working Group II, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK
17. Azar, Christian, Lindgren, Kristian y Andersson, Björn, A., Global energy scenarios meeting stringent CO<sub>2</sub> constraints-cost-effective fuel choices in the transportation sector, Energy Policy, (en prensa) 2002
18. Haug, Marianne, Hydrogen and Fuel Cells: The Global Perspective. IEA, en la Hydrogen Infrastructure Investment Roundtable, org. Por Montreux Energy en Chantilly, Virginia en Noviembre 13-15, 2002
19. Lee, Brian Y., Patents in the Hydrogen and Fuel Cell Industry, Convención Anual Canadiense del Hidrógeno en Vancouver 2003
20. Fuel Cells Canada y Pricewaterhouse Coopers, Fuel Cells- The opportunity for Canada, Junio 2002
21. Ashley, Steven, On the road to fuel cell cars, Scientific American, marzo 2005
22. C.J. Campbell y J.H. Laherrère, The end of cheap oil, Scientific American, marzo 1998, p.80, Ivanhoe, L.F. Get ready for another oil shock!, The Futurist, ene-feb 1997, p.23; H. Banks, Cheap Oil: Enjoy while it lasts, Forbes, junio 15, 1998, p.86
23. Comunicación personal de J. Rifkin con C.J. Campbell (Feb.27, 2002) (Oil Depletion Análisis Center of London, ODAC) y con J. Laherrère (Feb.22, 2002)
24. Herendeen, Robert A., Prospective/ retrospective on strategies, Energy, Vol. 31, p.3-9, 2006 (en prensa)


  
 www.fuelcells.org
   
**Fuel Cell Vehicles**
  
 (From Auto Manufacturers)

Automaker	Vehicle Type	Year Shown	Engine Type	Fuel Cell Size/type	Fuel Cell Mfr.	Range (mi/km)	MPG Equivalent*	Max. Speed	Fuel Type	Commercial Intro.	Picture
Audi	A2	2004	Fuel cell/battery hybrid	68kW/PEM	Ballard	220km	N/a	175km/h	Gaseous hydrogen		
BMW	Series 7 (746 h) (Sedan)	2000	ICE (fuel cell APU)	5kW/PEM	UTC	180mi/300km	N/a	140 mph	Gasoline/Liquid hydrogen	Limited intro in 2000 (Munich Airport Hydrogen Vehicle Project)	
Daihatsu	MOVE EV - FC (micro van)	1999	Fuel cell/battery hybrid	16kW/PEM	Toyota	N/a	N/a	N/a	Methanol		
	MOVE FCV - K II (mini vehicle)	2001	Fuel cell/battery hybrid	30 kW/PEM	Toyota	75mi/120km	N/a	65mph/105km/h	Compress. hydrogen @ 3600 psi	Japan road testing started in early 2003.	
Daimler-Chrysler	NECAR 1 (180 van)	1994	12 fuel cell stacks	50kW/PEM	Ballard	81mi/130km	N/a	55mph/90km/h	Compress. hydrogen @ 4300 psi		
	NECAR 2 (V-Class)	1996	Fuel cell	60kW/PEM	Ballard	156mi/250km	N/a	68mph/110km/h	Compress. hydrogen @ 3600 psi		
	NECAR 3 (A-Class)	1997	2 fuel cell stacks	50kW/PEM	Ballard Mark 700 Series	250mi/400km	N/a	75mph/120km/h	10.5 gal. of Liquid methanol	First methanol reforming FCV	
	NECAR 4 (A-Class)	1999	Fuel cell	70kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	280mi/450km	N/a	90mph/145km/h	Liquid hydrogen		
	Jeep Commander 2 (SUV)	2000	Fuel cell/ (90 kW) battery hybrid	50kW/PEM	Ballard Mark 700 Series	118mi/190km	24 mpg (gasoline equiv.)	N/a	Methanol	Jeep Commander 1 came out in 1999.	
	NECAR 4 - Advanced (California NECAR)	2000	Fuel cell	85kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	124mi/200km	53.46 mpg equiv. (CaFCP est.)	90mph/145 km/h	4 lbs. (1.8kg) of Compress. hydrogen @ 5,000 psi		
	NECAR 6 (A-class)	2000	Fuel cell	85kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	280mi/450km	N/a	95mph/150km/h	Methanol		
	NECAR 6.2 (A-class)	2001	Fuel cell/battery hybrid	85kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	300mi/482km	N/a	95mph/150km/h	Methanol	Awarded a road permit for Japanese roads. Completed CA - DC drive.	
	Sprinter (van)	2001	Fuel cell	85kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	93mi/150km	N/a	75mph/120km/h	Compress. Hydrogen @ 5,000 psi	Delivered to Hamburg parcel service, Hermes as part of the W.E.I.T. hydrogen project, also used by UPS	
	Narimaru (Town & Country Mini Van)	2001	Fuel cell/ (40 kW) battery hybrid	64kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	300mi/482km	30 mpg equiv.	80mph/129km/h	Catalyzed chemical hydride - Sodium Borohydride	Uses Millennium Cell's 'Hydrogen on Demand' system with a 53 gallon fuel tank	
	F-Cell (A-class)	2002	Fuel cell/battery hybrid	85kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	90mi/145km	58 mpg equiv.	87mph/140km/h	4 lbs. (1.8kg) of Compress. hydrogen @ 5,000 psi	60 feet vehicles in US, Japan, Singapore, and Europe started in 2003 - small fleet in Michigan operated by UPS.	


	Jeep Treo	2003	Fuel cell	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	Unveiled at Tokyo Motor Show - drive by wire technology	
ESORO	Hycar	2001	Fuel cell/battery hybrid	6.4kW/PEM	Nuvera	224mi/360km	N/a	75mph/120km/h	Compress. Hydrogen	Switzerland's first FCV	
Fiat	Seicento Elettra H2 Fuel Cell	2001	Fuel cell/battery hybrid	7.5kW/PEM	Nuvera	100mi/160km	N/a	60mph/100km/h	Compress. hydrogen		
	Seicento Elettra H2 Fuel Cell	2003	Fuel cell/battery hybrid	N/a	Nuvera	N/a	N/a	N/a	Compress. hydrogen	Being investigated for use in Milan, Italy, where gasoline and diesel fueled vehicles are banned on smoggy days.	
Ford Motor Company	P2000 HFC (sedan)	1999	Fuel cell	75kW/PEM	Ballard Mark 700 Series	100mi/160km	67.11 mpg equiv. (CaFCP est.)	N/a	Compress. hydrogen	First FCV by Ford	
	Focus FCV	2000	Fuel cell	65kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	100mi/160km	N/a	60mph/128km/h	Compress. hydrogen @ 3,600 psi		
	THINK FC6	2000	Fuel cell	65kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	N/a	N/a	80mph/128km/h	Methanol		
	Advanced Focus FCV	2002	Fuel cell/battery hybrid	65kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	180mi/290km	~50 mpg equiv.	N/a	8.8 lb. (4kg) Compress. H2 @ 5,000 psi	3 year demonstration in Vancouver beginning late 2004. 30 fleet vehicles in Sacramento, Orlando and Detroit	
GM	Sintra (mini-van)	1997	Fuel cell	50kW/PEM	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	Wants to be 1 <sup>st</sup> automaker to sell 1 million FCVs profitably	
**Hydrogenics works with GM on FC development	Zafira (mini-van)	1998	Fuel cell	50kW/PEM	Ballard	300mi/480km	60 mpg equiv.	75mph/120km/h	Methanol	GM has ceased efforts regarding methanol (2001)	
	Precept FCEV Concept only	2000	Fuel cell/battery hybrid	100kW/PEM	GM**	500mi/800km (est.)	108 mpg equiv. (est.)	120mph/193km/h	Hydrogen (stored in metal hydride)	These are concept projections	
	HydroGen 1 (Zafira van)	2000	Fuel cell/battery hybrid	80kW/PEM	GM**	250mi/400km	N/a	90mph/140km/h	16 gal. of Liquid hydrogen	GM plans to sell 75kW hydrogen stationary fuel cell generators in 2005	
	HydroGen 3 (Zafira van)	2001	Fuel cell	94kW/PEM	GM**	250mi/400km	N/a	100mph/160km/h	Liquid hydrogen	Being used by FedEx Corp. in Tokyo, Japan from 8/2003 - 8/2004	
	Chevy S-10 (pickup truck)	2001	Fuel cell/battery hybrid	25kW/PEM	GM**	240mi/386km	40 mpg	70 mph	Low sulfur, clean gasoline (CHF)	GM has partnership with Toyota on reforming	
	AUTONomy Concept only	2002	Fuel cell	N/a	N/a	N/a	Projected 100 mpg	N/a	N/a	GM's 2010 FCV concept Freedom of Design	
	Hy-Wire Proof of Concept	2002	Fuel cell	94kW/PEM	GM**	80mi/129km	~41 mpg (gas equiv.)	97mph/160km/h	4.4 lbs. (2kg) Compress. H2 @ 5,000 psi	Uses HydroGen3's powertrain, so range & mpg theoretically could = HydroGen3	
	Advanced HydroGen 3 (Zafira van)	2002	Fuel cell	94kW/PEM	GM**	170mi/270km	~56 mpg (gas equiv.)	~100mph/160km/h	6.8lbs. (3.1kg) Compress. H2 @ 10,000 psi	1 <sup>st</sup> FCV to incorporate 10,000 psi tanks (by Quantum). 6 placed in Washington DC.	
	Diesel Hybrid Electric Military truck	2003	Fuel cell APU	5kW/PEM	Hydrogenics	N/a	N/a	N/a	Low pressure metal hydrides	Turbo diesel ICE/battery hybrid with PEM FC APU. Under eval. for US Army's new fleet of 30,000 light tactical vehicles.	


























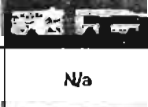




	Sequel	2005	Fuel cell/battery hybrid	73kW/PEM	GM	300mi	N/a	N/a	8kg Compress. H <sub>2</sub> @ 10,000 psi		
GM (Shanghai) PATAC	Phoenix (Mini van)	Oct. 2001	Fuel cell/battery hybrid	26kW/PEM	Shanghai GM**	125mi/200km	N/a	70mph/113km/h	Compress. hydrogen	Seventh FCV prototype out of China	
Honda	FCX-V1	1999	Fuel cell/battery hybrid	60kW/PEM	Ballard Mark 700 Series	110mi/177km	N/a	78mph/130km/h	Hydrogen (stored in metal hydride)		
	FCX-V2	1999	Fuel cell	60kW/PEM	Honda	N/a	N/a	78mph/130km/h	Methanol	Honda has strict focus on pure hydrogen FCVs (2001)	
	FCX-V3	2000	Fuel cell/Honda ultra capacitors	62kW/PEM	Ballard Mark 700 Series	108mi/173km	N/a	78mph/130km/h	28 gal. of Compress. hydrogen @ 3600 psi		
	FCX-V4	2001	Fuel cell/Honda ultra capacitors	65kW/PEM	Ballard Mark 900 series	185mi/300km	-50 mpg (gas equiv.)	84mph/140km/h	130 L (3.75kg) Compress. H <sub>2</sub> @ 6,000 psi	Completed Japanese road testing - 1 <sup>st</sup> FCV to receive CARB & EPA emission certs.	
	FCX	2002	Fuel cell/Honda ultra capacitors	65kW/PEM	Ballard Mark 900 series	220mi/365km	-50 mpg (gas equiv.)	83mph/150km/h	166.8 L Compress. hydrogen @ 6000 psi	Have 4 in Japan, 5 in L.A., 3 in San Francisco	
	Kiwan concept	2003	Fuel cell	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	Hydrogen	Unveiled at Tokyo Motor Show	
Hyundai	Santa Fe SUV	2000	Ambient-pressure Fuel cell	78kW/PEM	UTC Fuel Cells	100mi/160km	N/a	77mph/124km/h	Compress. hydrogen		
	Santa Fe SUV	2001	Ambient-pressure Fuel cell	78kW/PEM	UTC Fuel Cells	250mi/402km	N/a	N/a	Compress. hydrogen		
	Tucson	2004	Fuel cell	60kW/PEM	UTC Fuel Cells	300km	N/a	150km/h	Compress. hydrogen	Will demonstrate 32 Tucson FCVs under DOE's Hydrogen Fleet and Infrastructure Demonstration and Validation Project by 2009	
Kia	Sportage	2004	Fuel cell	60kW/PEM	UTC Fuel Cells	300km	N/a	150km/h	Compress. hydrogen		
Mazda	Demio (compact passenger car)	1997	Fuel cell/ultra capacitor hybrid	20kW/PEM	Mazda	108mi/170km	N/a	60mph/90km/h	Hydrogen (stored in metal hydride)		
	Premacy FC-EV	2001	Fuel cell	65kW/PEM	Ballard Mark 900 Series	N/a	N/a	77mph/124km/h	Methanol	Awarded road permit for Japanese roads in 2001 - undergoing public road testing	
Mitsubishi	Specialiner Concept only	2001	Fuel cell/battery hybrid	40kW/PEM	N/a	N/a	N/a	N/a	Methanol		
	Grandis FCV (mini-van)	2003	Fuel cell/battery hybrid	68kW/PEM	Daimler Chrysler/ Ballard	92mi/150km	N/a	67mph/100km/h	Compress. Hydrogen		
Nissan	Rivessa (SUV)	1999	Fuel cell/battery hybrid	10kW/PEM	Ballard Mark 700 Series	N/a	N/a	44mph/70km/h	Methanol	Partnership with Renault for gasoline fueled FCV until 2006	
**Made prototypes w/ each fuel cell stack	Xterra (SUV)	2000/2001	Fuel cell/battery hybrid	65kW/PEM	Ballard Mark 900 Series & UTC Fuel Cells**	100mi/161km	N/a	76mph/120km/h	Compress. hydrogen	Will begin driving trials in California and Arizona.	
	X-TRAIL (SUV)	2002	Fuel cell/battery hybrid	75kW/PEM	UTC Fuel Cells (Ambient-pressure)	N/a	N/a	78mph/125km/h	Compress. hydrogen @ 6,000 psi	Approved for Japanese Public road testing - 3 leased to Japanese gov.	

	Effis (commuter concept)	2003	Fuel cell/battery hybrid	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	Unveiled at Tokyo Motor Show	
PSA Peugeot Citron	Peugeot Hydro-Gen	2001	Fuel cell/battery hybrid	30kW/PEM	Nuvera	188mi/300km	N/a	60mph/95km/h	Compress. hydrogen		
	Peugeot Fuel Cell Cab "Taxi PAC"	2001	Fuel cell/battery hybrid	55kW/PEM	H Power	188mi/300km	N/a	60mph/95km/h	80 Liters Compress. hydrogen @ 4300 psi		
	H2O fire-fighting Concept only	2002	Battery/fuel cell APU	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	Catalyzed chemical hydride - Sodium Borohydride	Uses Millennium Cell's "Hydrogen on Demand" system	
Renault	EU FEVER Project (Laguna wagon)	1997	Fuel cell/battery hybrid	30kW/PEM	Nuvera	250mi/400km	N/a	75mph/120km/h	Liquid hydrogen	Partnership with Nissan on gasoline fueled FCV	
Suzuki	Covia Concept only	2001	Fuel cell	N/a	GM	N/a	N/a	N/a	N/a		
	Mobile Terrace	2003	Fuel cell	N/a	GM	N/a	N/a	N/a	Hydrogen	Unveiled at Tokyo Motor Show	
Toyota	RAV 4 FCEV (SUV)	1996	Fuel cell/battery hybrid	20kW/PEM	Toyota	155mi/250km	N/a	62mph/100km/h	Hydrogen (stored in metal hydride)		
	RAV 4 FCEV (SUV)	1997	Fuel cell/battery hybrid	29kW/PEM	Toyota	310mi/500km	N/a	78mph/125km/h	Methanol		
	FCHV-3 (0Super V/ Highlander SUV)	2001	Fuel cell/battery hybrid	90kW/PEM	Toyota	186mi/300km	N/a	93mph/150km/h	Hydrogen (stored in metal hydride)	Toyota is developing a Japanese residential 1kW stationary fuel cell system for 2005	
	FCHV-4 (0Super V/ Highlander SUV)	2001	Fuel cell/battery hybrid	90kW/PEM	Toyota	155mi/250km	N/a	95mph/152km/h	Compress. Hydrogen @ 3,600 psi	Completed Japanese road testing	
	FCHV-6 (0Super V/ Highlander SUV)	2001	Fuel cell/battery hybrid	90kW/PEM	Toyota	N/a	N/a	N/a	Low sulfur, clean gasoline (CHF)	Partnered with GM on gasoline CHP reforming technology	
	FCHV (0Super V/ Highlander SUV)	2002	Fuel cell/battery hybrid	90kW/PEM (122 hp)	Toyota	180mi/290km	N/a	98mph/156km/h	Compress. hydrogen @ 5,000 psi	Total of 18 leased in California and Japan	
	FINE-S Concept only	2003	Fuel cell	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	N/a	Toyota's freedom of design concept	
VW	EU Capri Project (VW Estate)	1999	Fuel cell/battery	16kW/PEM	Ballard Mark 600 Series	N/a	N/a	N/a	Methanol	Involved Johnson-Matthey, ECN, VW, and Volvo	
	HyMotion	2000	Fuel cell	75kW/PEM	N/a	220mi/350km	N/a	86mph/140km/h	13 gal. Of Liquid Hydrogen		
	HyPower	2002	Fuel cell/super-capacitors hybrid	40kW/PEM	Paul Scherrer Institute	94mi/150km	N/a	N/a	Compress. hydrogen		
















Note: mpg gas equivalent is based on conversion rate of 1 kg hydrogen = 1 gallon gasoline energy equivalent














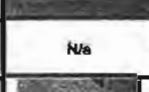




  
 www.fuelcells.org
   
**Fuel Cell Buses**















Bus Mfr.	Operation	Model	Year Shown	Engine Type	Fuel Cell Size/Type	Fuel Cell Mfr.	Range (mi/km)	Max. Speed	Fuel Type	Picture
Bus Manufacturing U.S.A., Inc.	Generation I of Georgetown University's program	30-foot Transit Bus	1994	Fuel cell/ battery hybrid	50kW/ Phosphoric Acid FC (PAFC)	Fuji Electric	250mi/ 402km	55mph/ 90km/h	Methanol	
Bus Manufacturing U.S.A., Inc.	Generation I of Georgetown University's program	30-foot Transit Bus	1995	Fuel cell/ battery hybrid	50kW/ PAFC	Fuji Electric	250mi/ 402km	55mph/ 90km/h	Methanol	
Bus Manufacturing U.S.A., Inc.	Generation I of Georgetown University's program	30-foot Transit Bus	1995	Fuel cell/ battery hybrid	50kW/ PAFC	Fuji Electric	250mi/ 402km	55mph/ 90km/h	Methanol	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Generation II of Georgetown University's program This bus will start a 1 yr. demonstration with Washington DC's Metro Area Transit Authority	40-foot heavy duty transit buses	1998	Fuel cell/ battery hybrid	100kW/ PAFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	350mi/ 563km	66mph/ 106km/h	Methanol	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Generation II of Georgetown University's program This bus is used for national demonstration purposes	40-foot heavy duty transit buses	2000	Fuel cell/ battery hybrid	100kW/ PEMFC	Ballard	350mi/ 563km	66mph/ 106km/h	Methanol	
Undetermined	Generation III of Georgetown University's program	40-foot low-floor bus platform	2003	Fuel cell	At least 240 kW/ PEMFC	Undeter.	N/a	N/a	Methanol	
New Flyer Industries Ltd.	Proof of Concept	P1: low fl. transit bus based on New-Flyer model 40	1993 world's first	Fuel cell/ battery hybrid	90kW/ PEMFC	Ballard	250mi/ 400km	60mph/ 95km/h	Compress. Hydrogen	
N/a	Proof of Concept	P2: full-sized, 40-foot	1995	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	250mi/ 400km	N/a	Compress. Hydrogen	
Enova Systems	U.S. Air Force, State of Hawaii's High Technology Development Corporation and Hydrogenics partnership	N/a	2004	Fuel cell/battery hybrid	20KW	Hydrogenics	N/a	N/a	Hydrogen	
EvoBus: a Daimler Chrysler company	Accumulated over 540 hrs driving exper. By 1997; two week road test in Oslo, Germany 1999	Nebus: 40.5 low-fl. urban regular-service bus	1997	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	155mi/ 250km	50mph/ 80km/h	Compress. Hydrogen	
EvoBus: a Daimler Chrysler company	Demonstrated at SunLine Transit, AC Transit, and CaFCP	Zabus (P4): 40 ft. (1 year demo with SunLine)	1999	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	
EvoBus: a Daimler Chrysler company	Sold as part of the CUTE, ECTOS, Perth, Australia programs. Cost ~US\$3 million unsubsidized each.	Citrus (P5): 33 for the CUTE, ECTOS, STEP)	2003	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	124mi/ 200km	50mph/ 80km/h	Compress. Hydrogen @ 5,000 psi	
Gillig Corporation	VTA, San Metro Transportation District, CaFCP & CARB - 3 FC Buses will be operated at VTA in San Jose, Ca	N/a	2004	Fuel cell/ battery hybrid	205 kW/ PEMFC	Ballard	N/a	N/a	Hydrogen	
Irisbus: a Renault V.I. and Iveco Co.	Demonstrated in Torino, Italy beginning in 2002	40 foot	2001	Fuel cell/ battery hybrid	60kW/ PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	

MAN "Bavaria 1"	Regular service in Erlangen and Nuremberg, Germany. 50% funded by Bavarian State	40 ft. low-floor city bus NL 253 "Bavaria 1"	2000	Fuel cell/battery hybrid	120kW/PEMFC	Siemens	155mi/250km	50mph/80km/h	1548 L Compress. Hydrogen	
MAN	Will be used for EU's THERMIE program: Berlin, Copenhagen, Lisbon	40 ft. MAN N L223 low floor	Not Compl	Fuel cell/Super capacitor hybrid	5 x 30kW/PEMFC	Nuvera	N/a	N/a	700 L Liquid Hydrogen @ -253° C	
MAN	Will deliver one fuel cell bus to be operated as part of the hydrogen project at Munich Airport	40 ft. MAN low floor	Not Compl	Fuel cell/battery hybrid	PEMFC	Ballard	N/a	N/a	H2 tanks on the roof at 5,000 psi	N/a
Neoplan	2 years fee-paying service in public traffic in the German spa resort Oberstdorf. Funded by Bavarian State	Midib bus N 8008 FC	1999	Fuel cell/battery hybrid	40kW/PEMFC	Nuvera	373mi/600km	30mph/50km/h	Compress. Hydrogen	
Neoplan	Available for Sales	N8012 - 33-seat bus	2000	Fuel cell/100kW flywheel hybrid	80kW/PEMFC	Proton Motor Fuel Cell GmbH	155mi/250km	50mph/80km/h	Compress. Hydrogen	
New Flyer Industries	Demo. service of 3 buses in Chicago (1997) and Vancouver (1998) for 2 years	P3: H40LF models	1998	Fuel cell/battery hybrid	205kW/PEMFC	Ballard	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	
New Flyer Industries	Natural Resources Canada (US\$1.9 million) and Hydrogenics for demo in Winnipeg, Manitoba, Canada *Will incorp. Vehicle-To-Grid technology	40 ft.	March 2005	Distributed array of 25kW modules w/ ultra-capacitors	180kW/PEMFC	Hydrogenics	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	N/a
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Demonstrated in NY, NV, and DC. Received FTA funding to continue program.	Standard 40-foot transit bus	1999	Zinc-Air fuel cells with batteries	Zinc-Air	Arotech	N/a	65mph/105km/h	Zinc	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Plans for RTC (Nevada Transit Agency) to use 2 - 5 buses	Standard 40-foot transit bus	2001	Zinc-Air fuel cells with ultra-capacitors	Zinc-Air	Arotech	N/a	N/a	Zinc	
Thor Industries (ThunderPower LLC)	Will be tested by SunLine Transit in 2002 for 6 months (started public service at Sunline Nov. 8, 2002)	30 ft. Low Floor B Dorado National E-Z Rider	2001	Fuel cell/battery hybrid	75kW/PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	200mi/323km	55mph/90km/h	Compress. Hydrogen	
Van Hool	3 will be used in regular service at AC Transit	40 foot	2005 goal	Fuel cell/battery hybrid	PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	250mi/400km	65mph/105km/h	6,000 psi Compress. Hydrogen	
Van Hool	No Demonstration (Project EUREKA)	18 meter City Bus	1995	Fuel cell/battery hybrid	78kW/PAFC	Elenco	186mi/300km	N/a	700 Liters Liquid Hydrogen	
NABI	1 will be used in regular service at SunLine Transit	45 foot	Not Compl	Fuel cell/battery hybrid	PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	N/a
Macchi-Ansaldo (EC project EQHPP)	Company Testing only, part of the EC project EQHPP	Full size regular floor city bus	1997	Fuel cell/battery hybrid	45kW/PEMFC	Nuvera	250mi/400km	N/a	600 Liters Liquid Hydrogen	
Hino Motors Ltd. (Toyota subsidiary)	Toyota in-house testing	Low-floor city bus: FCHV-BUS1	2001	Fuel cell/battery hybrid	180kW/PEMFC	Toyota	186mi/300km	50mph/80km/h	Compress. Hydrogen @ 5,000 psi	
Hino Motors Ltd. (Toyota subsidiary)	Tokyo metro. gov. began using this bus during summer 2003 on waterfront route - Japan's nat'l debut of public fuel cell buses	60 pass. Low fl., diesel model: FCHV-BUS2	2002	Fuel cell/battery hybrid	180kW/PEMFC [2 x 90kW]	Toyota	186mi/300km	50mph/80km/h	Compress. Hydrogen @ 5,000 psi	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	BVG - Berlin's public transportation body - to buy 2 prototypes	15.3 meter long Double-Decker	Not Compl	N/a	N/a	Proton Motor Fuel Cell GmbH	N/a	N/a	Hydrogen	

## Worldwide Hydrogen Fueling Stations

Location	Fuel	Project	Dates	H2 Production Technique	Specifics/Comments	Picture
Auburn, California	Compress. H2	California Fuel Cell Partnership Station located at Pacific Gas & Electric service facility	2004	Ztek Corporation High Performance Steam Methane Reformer (HPSR)	HPSR converts natural gas supplied by PG&E to hydrogen at a rate of 600 scfh.	
Davis, California	Compressed H2, CNG/H2	University of California, Davis Hydrogen Bus Technology Validation Program, Toyota FCVs	In operation June 2003	Air Products and Chemicals (APCI) delivered LH2	Converts liquid hydrogen to gaseous hydrogen.	
Diamond Bar, California	Compress. H2	South Coast Air Quality Management headquarters	2004	Stuart Energy Station (SES-1)	One of first stations opened to the public. AQMD will install an SES power module to evaluate and demonstrate power applications later on.	
Oakland, California	Compress. H2	Alameda-Contra Costa (AC) Transit, ChevronTexaco	Planned - August 2006	Small-scale onsite steam reforming of natural gas	Will fuel AC Transit's fleet of 3 fuel cell buses	
Riverside, California	Compress. H2	University of California, Riverside, College of Engineering - Center for Research and Technology with SCAQMD	1992 (1 <sup>st</sup> of its kind)	Electrolyser Corp. (now Stuart Energy) Uni-polar electrolyzer capable of using PV array or grid operation for 5,000 psi H2.	"Solar-Hydrogen Production and Vehicle Refueling Station"	
Chino, California	Compress. H2	Kia-Hyundai America Technocal Center - partners include UTC Fuel Cells, Hyundai and ChevronTexaco Technology Ventures	Opened February 2006	Natural gas reforming	Part of 5-year DOE cost-sharing program	
Thousand Palms, California	Compress. H2	SunLine Transit Agency and Bellard P4 Bus Demo.	Opened April 2000	Stuart Energy Hydrogen Energy Station for vehicle refueling	Electrolytic H2 generation and compression (to 34.5 MPa, 1,400 standard cubic feet per hour, Pdc Machines compressor	
Sacramento, California	Liquid to Compressed H2, MeOH	California Fuel Cell Partnership BP, Shell, and Texaco helped in the design	Opened November 2000	APCI and Praxair delivered LH2 Uses Linde LH2 cryogenic nozzle and controls technology.	LH2 Stored on site in 4500-gallon tank. Can deliver CH2 to vehicle at 3000 and 5000 psi under 4 minutes.	
Torrance, California	Compress. H2	American Honda Motors Co., Inc., Research and Development center	Opened July 2001	Solar-powered electrolysis, stored on-site	PV-electrolysis with grid electricity back-up, Pdc Machines compressor	
Torrance, California	Compress. H2	As part of Toyota's efforts to establish California fuel cell "communities" with the leasing of 6 FCVs to 2 UC campuses, it plans to open 5 more refueling stations in addition to this one.	Opened early 2003	Toyota is working with Stuart Energy and Air Products and Chemicals, Inc.	Toyota USA headquarters in Torrance uses a Stuart Energy hydrogen fueling station. It uses onsite electrolysis powered by renewable energy to generate 24kg hydrogen/day	
Orland, California	Liquid H2	BMW North America Engineering and Emission Test Center	Opened July 2001	APCI delivered LH2	Manual power assisted refueling station. Also has a Linde LH2 mobile refueling station.	
Chula Vista, California (mobile station)	Compress. H2	City of Chula Vista	2003	Stuart Energy hydrogen fueling station	A CFP-1350 generates 60 kg of H2/day, can fuel 3 buses a day, and dispenses at 3,800 and 5,000 psi. Pdc Machines compressor	
Thousand Palms, California	Compress. H2	Schetz Hydrogen Generation Center at SunLine Transit	Opened 1994; retro fit in 2001-2	Telodyne Energy electrolyzer system	3600 psi hydrogen generation via electrolysis powered by renewable PV; produces up to 42 standard cubic feet per hour of H2	
Richmond, California	Compress. H2	AC Transit facility	Opened October 2002	Stuart Energy Satellite Hydrogen Energy Station for vehicle fueling	PEM electrolyzer; first satellite hub for CaFCP vehicles. Has 47 kg H2 storage capability.	
Los Angeles, California	Compress. H2	Los Angeles International Airport, Praxair, BP, DOE, SCAQMD	October 2004	Praxair	First retail-city hydrogen fueling station - features a 600-square-foot building with high-pressure hydrogen storage tubes on the roof.	

Copenhagen	Mobile LH2	Station was opened under the framework of the Berlin, Copenhagen, Lisbon fuel cell bus Program	2003	Will use Linde supplied liquid hydrogen	The Linde mobile filling station is a part of the Total/FinElf station in Berlin.	
Lisbon	Mobile LH2	Station was opened under the framework of the Berlin, Copenhagen, Lisbon fuel cell bus Program	2003	Will use Arliquido (in Portugal) supplied liquid hydrogen	The Linde mobile filling station is a part of the Total/FinElf station in Berlin.	
Erlangen, Germany	Mobile Liquid H2	MAN, Linde (several Bavarian funded bus programs)	April 1996 - August 1998 (ICE) Oct. 2000 - April 2001 (fuel cell)	Linde AG produced and supplied the LH2 to their mobile station	Linde AG supplied LH2 from their large central H2 production & Uquification plant and transported it to the Linde mobile fueling station	
Stuttgart, Germany	Compress. H2	CUTE Bus Demo.	N/A	On-site Natural Gas steam reformation	BP affiliated	N/A
Malmö, Sweden	Compress. H2	Sydmet	Opened September 2003	Water electrolysis-based hydrogen generation	Stuart Energy's Hydrogen Energy Station for vehicle fueling	
Stockholm, Sweden	Compress. H2	Clean Urban Transport for Europe (CUTE) Bus Demo. PLANET from EUHYFIS in charge of H2 station	November 2003	Central Hydro Powered electrolysis. Then transported to fueling site.	Stuart Energy's Hydrogen Energy Station for vehicle fueling, uses Pdc Machines compressor	
London, United Kingdom	Compress. H2	CUTE Bus Demo. BP in charge of H2 station	Delayed	Centralized production via excess hydrogen from crude oil, then transported to fueling site. Uses BOC H2 refueling technology.	BP affiliated	N/A
Amsterdam, The Netherlands	Compress. H2	CUTE Bus Demo. GVB Amsterdam in charge of H2 station Shell Hydrogen	TBD	Hydrogen System's IMET® powered water electrolyzer and Hoekloos (a Linde Co.) delivered Compress. H2	On site Hydrogen production via electrolysis from green energy	
City of Luxembourg	Compress. H2	CUTE Bus Demo. AVL in charge of H2 station	Opened October 2003	Shell Hydrogen/Air Liquide delivered	Tube Trailer compressed H2	
Porto, Portugal	Compress. H2	CUTE Bus Demo. BP in charge of H2 station	Late 2003	Centralized production via excess hydrogen from crude oil.	Uses a Linde High Booster Compressor System for high pressure H2. BP affiliated	
Madrid, Spain	Compress. H2	CUTE Bus Demo. & CITYCELL ETA in charge of H2 station	Opened April 2003	Steam reforming of natural gas, uses Pdc Machines compressor	 Consortium gas Natural	
Barcelona, Spain	Compress. H2	CUTE Bus Demo. BP in charge of H2 station	Opened September 2003	BP & Vandenberg Hydrogen Systems: IMET® powered water electrolyzer	On-site production via renewable solar and grid electricity powered electrolysis. Uses a Linde High Booster Compressor System for high pressure H2.	
Reykjavik, Iceland	Compress. H2	ECTOS Bus Demo.	Opened April 2003	Shell Hydrogen/Isoland On site Geothermal and Hydro Powered Electrolyzer.	World's 1 <sup>st</sup> Commercial Hydrogen Station.	
Perth, Australia	Compress. H2	DaimlerChrysler, BP, UNEP	2004	Centrally produced H2 at BP's refinery in Kwinana	Centralized hydrogen production. Gaseous hydrogen from crude oil/natural gas refining.	N/A
Hong Kong	Compress. H2	Cheung Kong Infrastructure Holdings, Ltd.	Late 2004	Stuart Energy Station for vehicle fueling and power (SES-tp)	Will provide back-up power for building.	
Osaka, Japan	Compress. H2	PEMFC Vehicle Demo. by WE-NET	Fall 2001	Natural Gas Reforming		
Takamatsu, Japan	Compress. H2	PEMFC Vehicle Demo. by WE-NET	Fall 2001	PEM electrolyzer		
Tsurumi, Japan	Compress. H2	Tsurumi Soda Co. Ltd. Nivanti International Corporation	2003	Byproduct hydrogen (brine electrolysis) produced off-site	Next to this station is a showroom and garage for fuel cell vehicles, managed by the Japan Automobile Research Institute.	
Yokohama, Japan	Compress. H2	Steam-Reforming Hydrogen Supply Facilities Cosmo Oil Co., Ltd.	Opened 2002	Desulfurized-gasoline Reformation, uses Pdc Machines compressor	Part of Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project.	

Yokohama, Japan	Compress. H2	Nippon Oil JHFC	Opened FY2002	Naphtha Reformation, uses PdC Machines compressor	Part of Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project.	
Osaka, Japan	Compress. H2	Babcock-Hitschi KKK JHFC	2003	Natural-gas reforming	This station can move anywhere to supply hydrogen because its hydrogen production device and fueling device are vehicle-mounted.	
Tokai, Japan	Compress. H2	Toho Gas Co. owned. Will sell the hydrogen fuel at a price similar to gasoline	Opened October 2002	N/A	Located at Toho Gas Co.'s research laboratory in Aichi Prefecture	N/A
Nagano, Japan	Compress. H2	Ikemitsu Kosan Co. Ltd. JHFC	2003	Kerosene-reform-type hydrogen fueling facility	The world's first kerosene-reform-type hydrogen fueling facility, using originally-developed desulfurization technology.	
Ariake, Japan	Liquid H2 & Compress. H2	Iwateni International Corporation; Tokyo Metropolitan Government, Shows Shell Bekkyu KK JHFC	2002	LH2 from Iwateni and high pressure Compress. H2 from Linde Hydrogen Cryo-Compressor.	Tokyo's first hydrogen station Uses Linde LH2 refueling technology.	
Kawasaki City, Japan	Compress. H2	Air Liquida Japan JHFC	2002	Methanol Reformation	Kawasaki Hydrogen Station was the world's first to supply hydrogen by methanol reforming.	
Sunju, Japan	Compress. H2	Tokyo Gas & Nippon Sanso JHFC	2002	Steam reforming + PSA refinement, uses PdC Machines compressor	Reforming of LPG (mixed butane and propane)	
Mississauga, Ontario, Canada	Compress. H2	Stuart Energy	2003	Electrolysis using Vandenberg Inorganic Membrane Electrolysis Technology (Vandenberg IMET®)	First electrolytic Stuart Energy Station for both vehicle fueling and back-up power generation	
Toronto, Canada	Compress. H2	Hydrogenics, City of Toronto, and the Canadian Transportation Fuel Cell Alliance	2003	Steam Methane Reforming	70 kg/day of hydrogen; this hydrogen energy station includes a 50kW PEM fuel cell for peak-shaving.	
Toronto, Canada	Compress. H2	Hydrogenics, City of Toronto, and the Canadian Transportation Fuel Cell Alliance	2004	Hydrogenics PEM Electrolyzer Refueler	65 kg/day of hydrogen; electricity renewable resources	
Toronto, Canada	Compress. H2	Hydrogenics, John Deere, NACCO, FedEx, GM of Canada - Fuel Cell forklift demonstration	2004	Hydrogenics PEM Electrolyzer Refueler	20 kg/day of hydrogen	
Toronto, Canada	Compress. H2	Hydrogenics, Purolator, and the Canadian Transportation Fuel Cell Alliance - Fuel Cell Hybrid Delivery Truck Demonstration	Late 2004	Hydrogenics PEM Electrolyzer Refueler	20 kg/day of hydrogen	
Surrey, BC, Canada	Compress. H2 & H2/Natural Gas blend	British Columbia Hydro's PowerTech Labs	Opened in 2001	Stuart Energy hydrogen fueling station + electrolyzer	Used for Coast Mountain Transit's fuel cell bus demonstration from '98-00. It now supplies H2 as well as a blend of H2/Natural Gas to a variety of vehicles.	
Torino, northern Italy	Compress. H2	Iriabus PEMFC City Bus Demo.	TBD	Hydrogen from hydropower via electrolysis		N/A
Br-coccol (near Milano)	Compress. H2 & Liquid H2	Hydrogen and fuel cell demonstration project	Opened in 2002	AEM, SOL, and others	Hydrogen liquefier and vehicle refueling	N/A
Oostvleie, Belgium	Liquid H2	Belgian Bus Demo.	Opened in 1994	Messer Griesheim GmbH	LH2 storage system of 125 L, an electric LH2 evaporation system as well as all necessary connecting supply infrastructure and relevant control and safety components	N/A
Lisvan, Belgium	Compress. H2	NedBen Fueling - a division of Chem - has won a contract from Citarey	2003	NedBen Fueling	Europe's first combined (liquefied natural gas (LNG) and liquid compressed natural gas (LCNG) and hydrogen fueling station	
South Korea	Compress. H2	Hyundai Motor Company fuel cell vehicle research	Opened in 2001	Pressure Products Industries, Inc. & Doosan Corporation	The heart of the fueling station is a PPI two stage compressor, model 4V104068 designed for 8,000 psig	N/A
Singapore	Compress. H2	Singapore Economic Dev. Board (EDB), SYNERGY Programme (Singapore Initiative in Energy Technology), BP, DaimlerChrysler, APCI	May 2004	BP and APCI, uses PdC Machines compressor, hydrogen reformed from natural gas	Will supply 70kg of compress. H2 per day (~35 vehicles per day). This will support 8 DaimlerChrysler F-Cell FCVs	N/A
Taiyuan, Taiwan	Compress. H2	Maw Chong Energy Hydrogen refueling project	2004	Ztek Corporation High Performance Steam Methane Reformer (HPSR)	Ztek to deliver 2000 scfh unit in 2004	N/A
Howaldtstraße, Deutsche Wert, Germany		Class 212 submarine: driven by hydrogen fuel cells dependent on outer air.	Finished in 2002	APCI, uses PdC Machines compressor	World's 1 <sup>st</sup> installed complete hydrogen infrastructure in a non-nuclear hydrogen driven submarine.	

## Fuel Cell Financing/Equity Investment

Company	Amount Secured (in US dollars)	Date	Type of Financing	Investment Partner(s)	Application
Alternate Energy Corporation (AEC)	\$1.5 million	Spring 2005	Private Placement financing	Five accredited investors	Completion of the full design, assembly and testing of hydrogen production demonstration units
Alternate Energy Corporation (AEC)	\$530,000	Winter 2004	Private Placement financing	Institutional investors	Hydrogen production
Astris Energi	\$500,000	Summer 2004	Private Placement financing	Alternate Energy Corporation	Pre-commercial fuel cell development
Avista Labs (now ReliOn)	\$5 million	Fall 2003	Equity financing	Enterprise Partners Venture Capital	Telecommunications
Avista Labs (now ReliOn)	\$7.5 million	Summer 2003	Independent financing	Chrysalix Energy, Wall Street Technology Partners, Buerk Craig Victor	Premium power market
Ballard Power Systems	\$100 million	Winter 2002	Equity Financing	RBC Capital Markets, CIBC World Markets, BMO Nesbitt Burns, National Bank Financial, TD Securities, UBS Bunting Warburg	Planned operations beyond 2007
ECD Ovonics	\$87.8 million	Winter 2004/2005	Private Placement financing		Double the manufacturing capacity of United Solar Ovonics' products, general corporate purposes, including research and development investments
Electric Fuel Corporation	\$3.5 million	Winter 2003	Private Placement financing	Secured convertible debenture with	Zinc-air fuel cell technology




  
**FUEL CELLS** 2000
   
 www.fuelcells.org

				three institutional investors	
<b>Ener1</b>	\$14.2 million	Spring 2005	Private Placement financing	Satellite Strategic Finance Associates, LLC and Satellite Strategic Finance Partners, Ltd.	To fund corporate operations and commercialization of the company's key technologies.
<b>GenCell Corporation</b>	\$450,000	Summer 2003		Connecticut Clean Energy Fund	Capital equipment and staff
<b>H2Gen</b>	\$9.6 million	Fall 2004	Private capital funding	@Ventures, Southern California Gas Company and Itochu Corporation, Arete, Nth Power, Hydrogenica Partners, Chrysalix, Commons Capital, Calvert Funds and Air Products and Chemicals, Inc.	Production of pre-commercial machines
<b>Hydrogen Technologies Corporation</b>	\$3.6 million	Spring 2005	Private Placement		Business development and working capital for ongoing operations
<b>Jadoo Power Systems</b>	\$11 million	Spring 2005	New venture financing	MDV-Mohr Davidow Ventures, Venrock Associates and Sinclair Broadcast Group	Expand research and development and accelerate its product development roadmap
<b>LynnTech Industries, Inc.</b>	\$5.5 million	Summer 2004	Series A equity financing	Chrysalix Energy Limited Partnership, Braemar Energy Ventures, Altira	Expand the company's development capabilities and service/sales operations

**FUEL CELLS**  
2000  
www.fuelcells.org

<b>Millennium Cell</b>	\$10 million	Spring 2004	Private Placement financing	Through sale of debentures convertible into common stock	Consumer electronics, standby power, military portable power
<b>Neah Power Systems</b>	\$12 million	Summer 2004	Equity funding	Castile Ventures, WestAM, Frazier Technology Ventures, Alta Partners and Intel Capital	Support the company's development and commercialization programs
<b>Pacific Fuel Cell Corporation (PFCE)</b>	\$1 million	Summer 2004		Through assumption of redeemable convertible debentures from a private investment fund.	To establish a new laboratory at the University of California-Riverside's University Research Park, carbon nanotube fuel cell
<b>PolyFuel, Inc.</b>	\$18.4 million	Summer 2004		CDP Capital-Private Equity, Mayfield, Ventures West, Technology Partners, Intel Capital, Chrysalix Energy, Conduit Ventures, KTB Ventures, Hotung Venture Partners, Yasuda Enterprise Development and BiNEXT.	Direct methanol fuel cell technology – membranes
<b>PolyFuel, Inc.</b>	\$15.6 million	Summer 2002		Ventures West, Chrysalix Energy, Intel Capital, Mayfield and Technology Partners	Direct methanol fuel cell technology
<b>Plug Power</b>	\$58.5 million	Fall 2003	Common stock offering	Citigroup Global Markets and Stephens Inc. – placement	R&D, manufacturing



**FUEL CELLS**  
2000  
www.fuelcells.org

				agents	
<b>Protonex Technology Corporation</b>	\$9 million	Spring 2005	Institutional funding	Conduit Ventures Ltd., SAS Investors, Solstice Capital, Commons Capital, Parker Hannifin Corporation, Contango Capital Management and the Massachusetts Green Energy Fund	Further develop Protonex's patent-pending fuel cell technology, to commercialize and launch products, and to expand the company's operations
<b>Protonex Technology Corporation</b>	N/a	Spring 2004	Early stage financing	Conduit Ventures, Ltd., SAS Investors, Solstice Capital and Commons Capital	Portable fuel cells
<b>QuestAir Technologies</b>	\$7 million	Fall 2002	Equity Stake	Shell Hydrogen	Gas purification technology
<b>ReliOn (formerly Avista Labs)</b>	\$25 million	Fall 2004	Equity financing	Oak Investment Partners, Enterprise Partners Venture Capital, Wall Street Technology Partners, Chrysalix Energy, and Buerk Dale Victor, and Avista Corp.	Increase engineering, sales, and marketing resources
<b>Versa Power Systems</b>	\$2 million	Summer 2003	Equity investment	FuelCell Energy	Solid oxide fuel cell technology
<b>ZOXY Energy</b>	\$5.3 million	Winter 2003	Venture capital	BASF Venture Capital GmbH, SAM Sustainable Asset Management, BW-Venture Capital GmbH	Rechargeable Zinc-air fuel cells, electrocatalysts

## HIDRÓGENO PARA EL FUTURO



Photo: BMW AG

**Energía solar para la producción de hidrógeno ambientalmente amigable**



Photo: BP

**LA OLA QUE VIENE: EL BUQUE-TANQUE DE HIDRÓGENO**