



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“OBSTÁCULOS PARA LA RUPTURA TECNOLÓGICA DE LAS
CELDA DE COMBUSTIBLE EN MÉXICO”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

SISTEMAS - INNOVACIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE LA TECNOLOGÍA

P R E S E N T A :

I.Q. ARTURO DAVID MARTÍNEZ FRANCO

TUTOR:
DR. FRANCISCO JAVIER GARFIAS VÁSQUEZ



2012



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ulises Cano Castillo

Secretario: Dr. Pedro Roquero Tejeda

Vocal: M.I. Gerardo Ruiz Botello

1er. Suplente: M.I. Luis Roberto Vega González

2do. Suplente: Dr. Francisco Javier Garfias Vásquez

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Química, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. FRANCISCO JAVIER GARFIAS VÁSQUEZ

FIRMA

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
OBJETIVO	9
HIPÓTESIS	9
METODOLOGÍA	9
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 Cambio de paradigma: el modelo energético.....	13
1.2 El cambio tecnológico y la ventaja competitiva.....	15
1.3 El ciclo de vida de los productos, procesos o tecnologías.....	16
1.4 Prospectiva tecnológica.....	18
1.4.1 Sondeo y marco de referencia.....	19
1.4.2 Acercamientos estadísticos.....	20
1.4.3 Métodos creativos.....	22
1.4.4 Establecimiento de prioridades.....	22
1.5 Elección del método de prospectiva en este trabajo.....	23
CAPÍTULO 2 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA Y SUS ALTERNATIVAS	25
2.1 Energía.....	25
2.2 Petróleo.....	26
2.3 Cambio climático.....	29
2.4 Combustibles alternativos.....	30
2.4.1 Biomasa.....	30
2.4.2 Gas natural.....	31
2.4.3 Hidrógeno (H ₂).....	33
2.4.3.1 Seguridad del hidrógeno.....	35
2.4.3.2 Transporte y almacenamiento.....	38
2.4.4 Fuentes de energía renovable.....	39
2.4.5 Celdas de combustible.....	44
2.4.6 Tipos de celdas de combustible.....	48
2.6 Estudios mundiales de las patentes de celdas de combustible.....	51
CAPÍTULO 3 OBSTÁCULOS Y ELEMENTOS DE RUPTURA TECNOLÓGICA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	59
3.1 ¿Qué haría posible la comercialización de las Celdas de Combustible?.....	60
3.2 Elementos conductores para la ruptura tecnológica de las celdas de combustible.....	61
3.2.1 Eficiencia.....	62
3.2.2 Tiempo de respuesta, capacidad de reacción y calidad de la electricidad.....	64
3.2.3 Flexibilidad: instalación, modularidad, escalabilidad, ubicación.....	65
3.2.4 Confiabilidad y duración.....	67
3.2.5 Seguridad.....	68
3.2.5 Oportunidades comerciales y validación de la tecnología.....	69
3.2.6 Costos.....	71
3.3 Comparación de la tecnología de baterías con el H ₂ y las celdas de combustible.....	73
3.4 Escenarios de vehículos con celdas de combustible en E.U.....	76

CAPÍTULO 4 STEEP EN MÉXICO.....	79
4.1 Social.....	82
4.1.1 Instituciones	82
4.1.2 Educación e Investigación.....	85
4.1.3 Cultura del agua	87
4.1.4 Grupo de enfoque.....	89
4.2 Tecnológico.....	90
4.2.1 Patentes de celdas de combustible y uso del H ₂ en México	94
4.2.2 Visitas a centros de investigación	94
4.2.2.1 Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)	94
4.2.2.2 Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).....	96
4.2.3 Actividades específicas de otras instituciones	97
4.2.4 Grupo de enfoque	99
3.3 Económico.....	100
3.4 Ecológico.....	103
3.5 Político	106
3.5.1 Grupo de enfoque.....	108
CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	111
5.1 Discusión.....	111
5.1.1 Social.....	112
5.1.2 Tecnológico.....	113
5.1.3 Ecológico.....	113
5.1.4 Económico.....	114
5.1.5 Político	115
5.2 Conclusiones	119
APÉNDICE.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	128

RESUMEN

El ingenio humano se ha puesto a prueba ante todo tipo de adversidades. Una de las actuales y mayores adversidades tiene que ver con el daño que le está haciendo el hombre a su propia y única casa: el planeta Tierra. Generalmente se dice que la mejor solución es la más sencilla, pero esa idea ha salido muy cara, ya que se ha consumido todo tipo de recursos sin importar las consecuencias.

Así, el cambio climático, el agotamiento del petróleo y el uso irracional de todo tipo de recursos naturales, es una realidad que plantea muchas encrucijadas para el mundo. México es altamente dependiente de los recursos petroleros para su financiamiento, los requerimientos energéticos siguen en aumento y es claro que se deben concretar acciones para revertir el cambio climático.

En este trabajo se emplean herramientas de prospectiva para determinar los obstáculos y posibilidades que ofrece la tecnología de las celdas de combustible, no solo como una alternativa tecnológica viable para la producción de corriente eléctrica, sino también como una coyuntura que permita revertir los efectos negativos del cambio climático. Algunas de las barreras se vislumbran como infranqueables por la situación social, económica y política del país, pero que deben ser abordadas con ingenio para aprovechar la oportunidad de lograr un país mucho más competitivo.

ABSTRACT

Human ingenuity has been tested in the face of every kind of adversity. One of the current and major adversities has to do with the damage humans are doing to their one and only home: the planet Earth. It has been established that the easiest solution is the best. That idea has turned out to be very expensive since we have used all kinds of resources no matter what the consequences.

Thus, climate change, oil depletion and irrational use of all types of natural resources are a reality that poses many critical decisions for the world. Mexico is highly dependent on oil revenues for its own financial support. Energetic requirements are ever on the increase; due to this it is obvious that concrete actions must be taken to reverse climate change.

Therefore this study uses prospective tools to identify obstacles and opportunities for adopting the technology of fuel cells as a source of energy, not only as a viable technological alternative for producing electricity, but also as a conjuncture allowing us to reverse the negative effects of climate change. Some of these barriers that can be visualized are impassable because of the social, economical and political situations prevalent in Mexico. Therefore these barriers must be managed with creativity and imagination to take advantage of the opportunities for constructing a more competitive country.

OBJETIVO

Determinar los principales obstáculos que impiden la adopción de la tecnología de celdas de combustible en México.

HIPÓTESIS

Las celdas de combustible se perfilan como una buena alternativa para la producción de energía eléctrica limpia en México, en cuanto a costos, rendimiento, eficiencia, cuidado del ambiente y uso de recursos renovables.

METODOLOGÍA

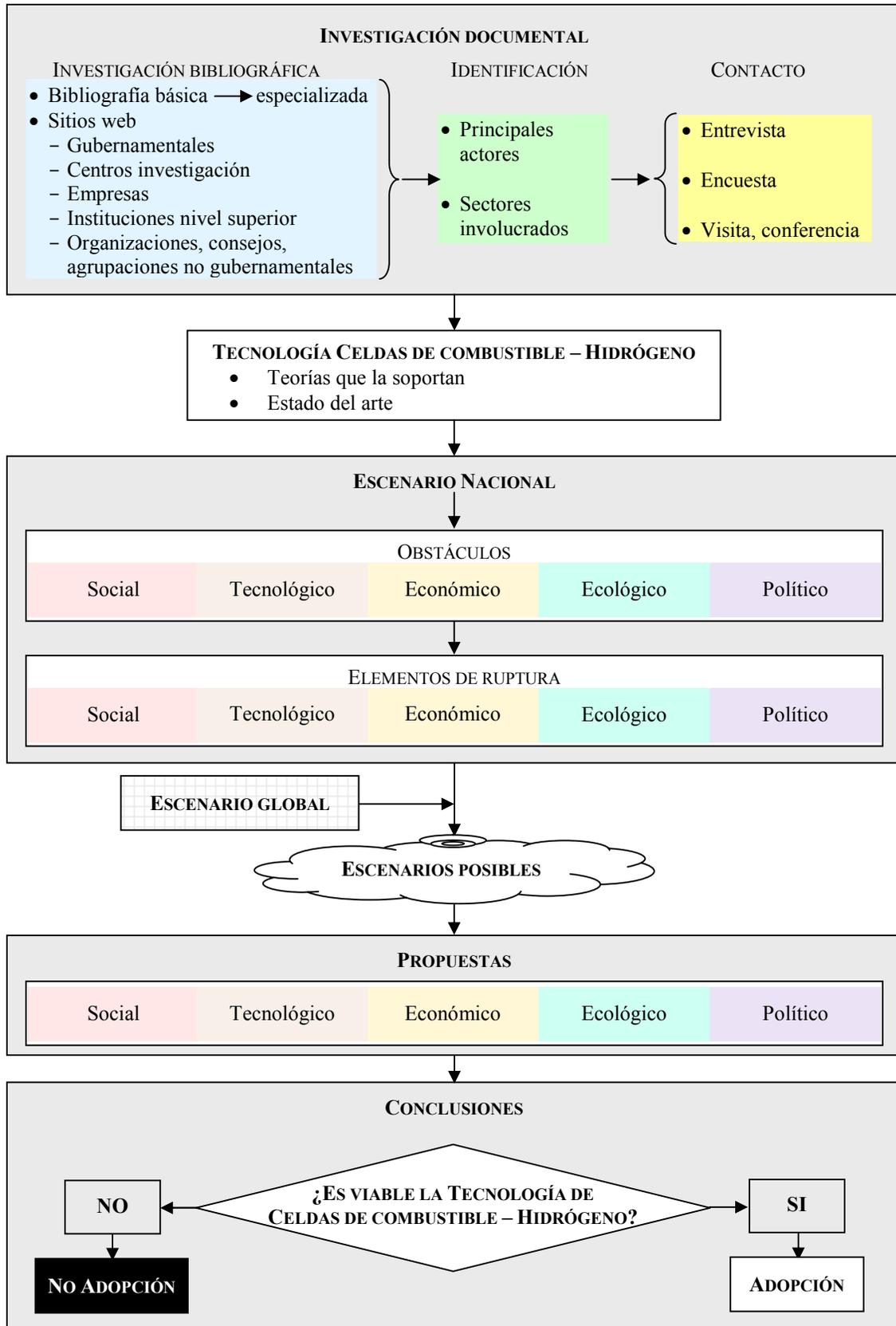
Con un enfoque de lo general a lo particular, se comenzará la investigación documental por las problemáticas que enfrenta la *economía del petróleo* y sus consecuencias. Se discutirá que través de innovaciones tecnológicas se pueden establecer alternativas de solución.

Dado que existen muchos métodos para producir corriente eléctrica y, los más comúnmente utilizados en el mundo funcionan mediante la combustión de derivados del petróleo, se analizarán algunos combustibles alternativos, así como tecnologías alternativas para la conversión de energía.

Debido a que las *celdas de combustible* se emplean para producir corriente eléctrica mediante combustibles renovables y no-renovables, se determinará el estado del arte de la mencionada tecnología y se identificarán los obstáculos que ésta presenta para su adopción. Se espera que al aplicar métodos de prospectiva tecnológica, se pueda proponer un futuro probable para la tecnología de las celdas de combustible en México.

Por último, al determinar los obstáculos que enfrenta la tecnología de celdas de combustible, se propondrán acciones que permitan la adopción de dicha tecnología en México. En el diagrama 1 se esquematiza la metodología antes descrita.

DIAGRAMA 1. METODOLOGÍA EMPLEADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, 2011



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Sin energía, no se puede realizar acción alguna. El aumento en la demanda de energía junto con la explotación excesiva de los combustibles fósiles y las graves consecuencias ambientales que ocasionan (cambio climático), han motivado la búsqueda de fuentes alternativas de energía.

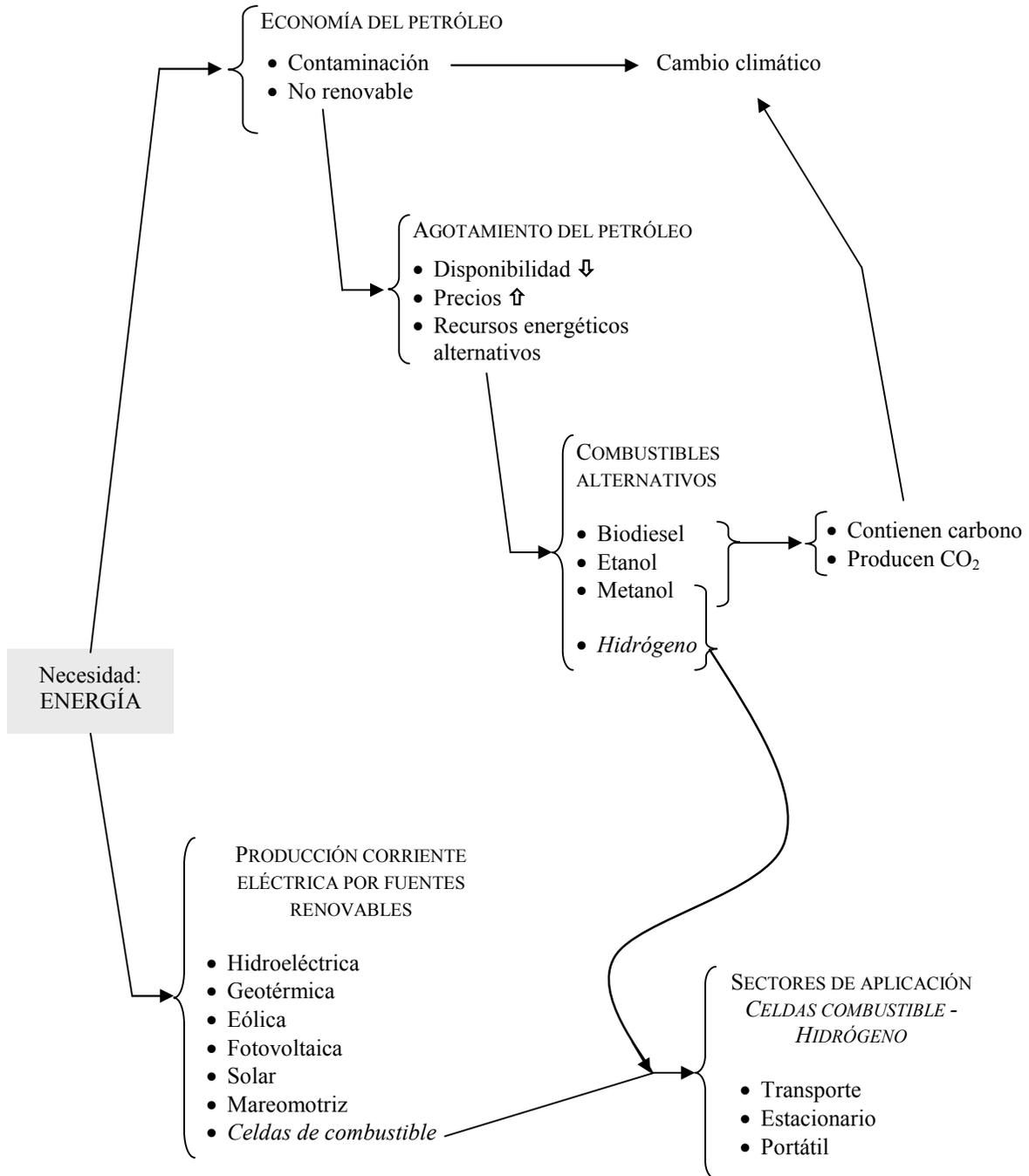
En nuestros días, el tema de los energéticos aunado al cuidado del ambiente se encuentra en los primeros lugares de la preocupación mundial y cada vez capta más la atención de la sociedad y de los gobiernos. Muchos países han expresado su compromiso, derivado de los acuerdos de las Conferencias de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CNUCC) [Agencia Internacional de Energía (AIE), 2010].

El petróleo es un recurso finito cada vez más escaso, más difícil de extraer y cuya extracción a nivel mundial está en decaimiento. En México se estima que si no se encuentran nuevas reservas, en los próximos años podríamos pasar de ser un país productor y exportador de petróleo a un país netamente importador [Calderón, 2007].

Para agravar la situación, en los últimos años ha crecido enormemente la demanda de nuevas fuentes de energía debido al crecimiento de la población, industria y comercio, y un aumento de sus requerimientos energéticos [AIE, 2010] (ver figura 1). Por lo anterior, es imperativo que el ingenio del hombre se enfoque en la resolución del problema: encontrar fuentes alternativas de energía que sean limpias y ‘verdes’, que puedan reemplazar a corto, mediano y largo plazo los cada vez más elevados requerimientos de energía, a precios accesibles.

En los últimos años, el modelo económico energético denominado “*economía del hidrógeno*” se ha posicionado como una posible alternativa a la “*economía del petróleo*”. El hidrógeno es un combustible que posiblemente sea capaz de sustituir al petróleo y sus derivados en diferentes aplicaciones, ya que no contamina, es renovable y es abundante, aunque no existe libremente en nuestro planeta. Una de las mejores formas de aprovechar el potencial que ofrece el hidrógeno es mediante celdas de combustible, aunque el desarrollo de las mismas presenta un reto importante. En el diagrama 2 se esquematiza el enmarcamiento del problema.

DIAGRAMA 2. ENMARCAMIENTO DEL PROBLEMA
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, 2011



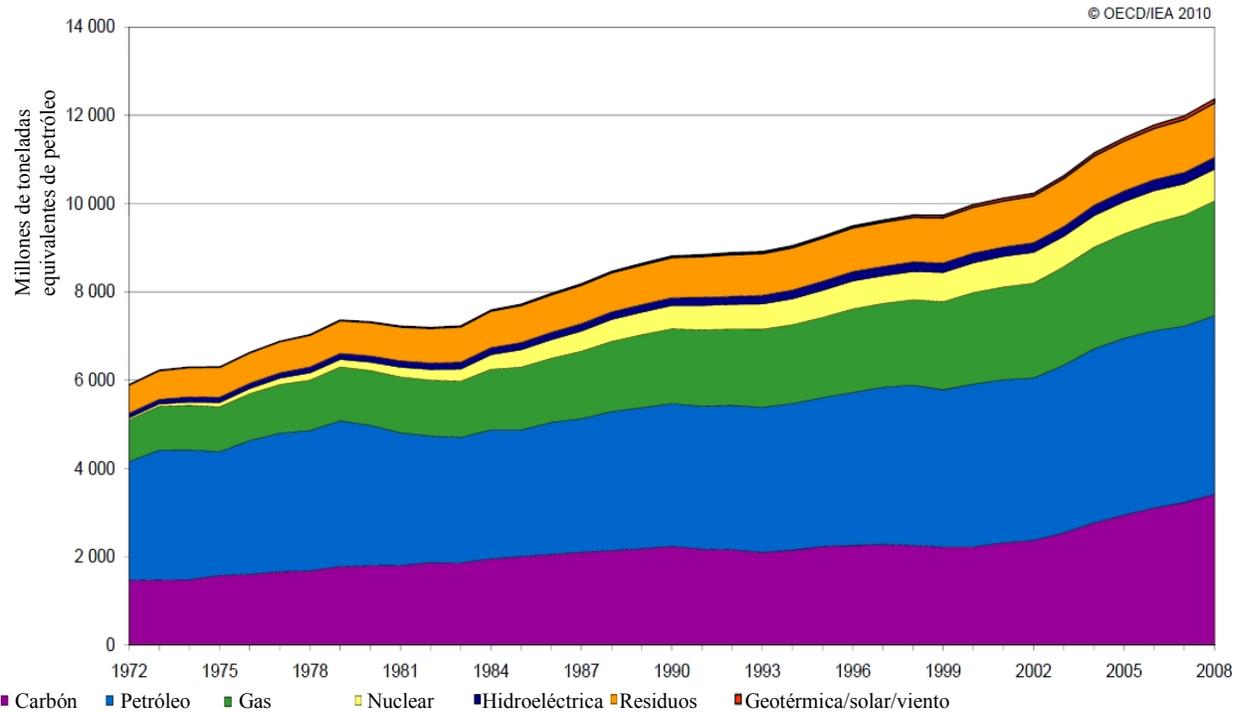


FIGURA 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE RECURSOS ENERGÉTICOS.
FUENTE: AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA (IEA POR SUS SIGLAS EN INGLÉS), 2010

1.1 Cambio de paradigma: el modelo energético

Un tema que plantea un gran cambio a nivel mundial a corto, mediano y largo plazo, es el de la energía alternativa renovable, limpia y verde, y que ha cobrado cada vez más fuerza para encontrar un modelo que reemplace al de la energía proveniente del petróleo, comúnmente conocida como *economía del petróleo*. Obviamente, sustituir el modelo energético mundial no es un asunto que se tome a la ligera, aunado a la resistencia al cambio. El reto requiere creatividad, inversión e innovación tecnológica, ya que se debe generar un nuevo paradigma en todos los órdenes de organización de la sociedad en donde se elimine el uso del petróleo como combustible, ya que su uso para este fin es generalizado y aceptado. La mayoría de la gente no imagina su vida sin el uso del petróleo y sus derivados como fuente de energía.

Al conjunto de obstáculos que impiden o retrasan el cambio de una tecnología a otra, se le conoce de manera genérica como “*brecha tecnológica*”. Por otra parte, al conjunto de acciones que se pueden realizar para reducir o eliminar la brecha, se le denomina comúnmente “*elementos de ruptura tecnológica*”, ya que “rompen” con una tecnología para emplear otra [Ayres, 1988].

Según Kuhn (1962), en la “ciencia normal” se predica suponiendo que la comunidad científica sabe cómo es el mundo y gran parte de su éxito se debe a que la comunidad se encuentra dispuesta a defender esa suposición, si es necesario a un alto costo. Por ejemplo, la ciencia normal suprime frecuentemente innovaciones fundamentales, debido a que resultan necesariamente subversivas para sus compromisos básicos. En esas y en otras formas, la ciencia normal se extravía repetidamente.

Kuhn distingue cronológicamente tres fases en el desarrollo de la ciencia (figura 2). La primera fase es la “precientífica” (se da una sola vez), donde no existe consenso sobre ninguna teoría en particular y se caracteriza por presentar numerosas teorías incompatibles e incompletas. Si los individuos de una comunidad precientífica logran un amplio consenso sobre los métodos, la terminología, y la clase de experimentos que pueden contribuir a mayores descubrimientos, da comienzo la segunda fase o “ciencia normal”. Después, toda ciencia puede atravesar varias fases de “ciencia revolucionaria”.

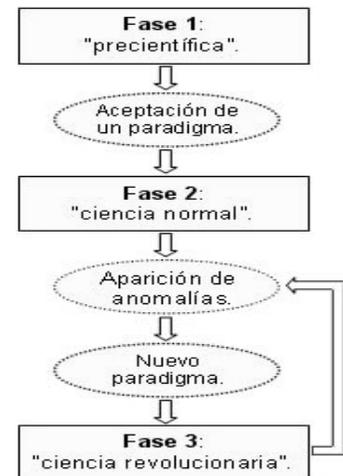


FIGURA 2. FASES DE LA CIENCIA SEGÚN KHUN

Los episodios extraordinarios en que tienen lugar cambios de paradigmas de una ciencia, son los que se denominan *revoluciones científicas* [Kuhn, 1962]. Estos son los complementos que rompen la tradición a la que está ligada la actividad de la ciencia normal. Las nuevas teorías implican cambiar las reglas que regía la práctica anterior de la ciencia normal. Por consiguiente, se refleja inevitablemente en gran parte del trabajo científico que ya se ha realizado con éxito, por lo que una nueva teoría raramente, o nunca, constituye sólo un incremento de lo que ya se conoce. Su asimilación requiere la reconstrucción de teoría anterior y la reevaluación de hechos anteriores; un proceso intrínsecamente revolucionario.

Dodgson (2000), define a la “innovación” como el uso productivo del conocimiento manifestado en el desarrollo exitoso e introducción de nuevos productos, procesos y/o servicios. La innovación se reconoce como fundamental para la riqueza económica y el bienestar social, pero frecuentemente tipificada por su complejidad, ambigüedad y riesgo, con una preocupación por la velocidad y la necesidad de las economías por contener el costo y las altas tasas de fracaso.

1.2 El cambio tecnológico y la ventaja competitiva

Según Porter (1987), el cambio tecnológico desempeña un papel de primer orden en el cambio estructural, y en la creación de nuevas industrias. También es un gran igualador, puesto que deteriora la ventaja competitiva, incluso de firmas bien consolidadas y empuja a otras hacia la vanguardia. La tecnología forma parte de la cadena de valor de las organizaciones. Quizás, el efecto más conocido de la tecnología en la estructura de la industria es el que tiene en la sustitución de productos, servicios y metodologías. El cambio tecnológico crea productos o usos enteramente nuevos de ellos que sustituye a otros.

El cambio tecnológico tiene el potencial para alterar la estructura de una industria, lo cual plantea un dilema a la empresa que proyecte una innovación. La innovación que aumente su ventaja competitiva puede acabar minando la estructura de la industria, aún cuando sea imitada por los rivales.

Porter (1987) define la “*estrategia tecnológica*” como la forma en que una compañía emplea la tecnología y lleva a cabo su desarrollo. La estrategia tecnológica es un elemento esencial de la visión competitiva global de una empresa y debe incluir tres aspectos generales: determinar qué tecnologías desarrollar, decidir si se busca liderazgo en esas tecnologías, y determinar la función de las licencias tecnológicas. Las decisiones de los tres aspectos deberán basarse en como la estrategia tecnológica mejora la ventaja competitiva sustentable.

Una estrategia genérica es la *diferenciación*. A continuación se explica el término con un ejemplo: una compañía intenta distinguir el propósito de su sector industrial, en algunos aspectos ampliamente apreciados por los compradores. Siendo así, la empresa escoge uno o más atributos que concibe como importantes y adopta un posicionamiento especial para atender esas necesidades. El premio a su singularidad es un precio y/o apreciación más alto. La empresa que logra obtener y sustentar su diferenciación tendrá un desempeño por arriba del promedio en su industria, si su mayor precio supera los costos adicionales en que incurren por su singularidad.

El liderazgo cuesta más que el seguimiento. Los líderes exitosos tratan agresivamente de disminuir la difusión al patentar ampliamente y lo protegen persiguiendo siempre a los infractores. Si la tecnología es una fuente de ventaja competitiva, la concesión de licencias constituye un paso riesgoso que se toma sólo en condiciones especiales. Con las licencias se acrecientan fácilmente las utilidades, pero puede erosionarlas a largo plazo a medida que se esfuma la ventaja competitiva.

El cambio tecnológico cumple una función decisiva en la competencia, por ello es extremadamente importante pronosticarlo para que la empresa pueda anticiparlo y mejorar así su posición. Con una buena idea del probable patrón de la evolución tecnológica es posible anticipar los cambios y tomar medidas tempranas para aprovechar la ventaja competitiva.

Siempre existirá duda de cambiar o modificar la tecnología. Es decir, la evolución de la tecnología es la causa principal de que una organización desee emplear varios escenarios (prospectiva) para considerar su elección de estrategias.

1.3 El ciclo de vida de los productos, procesos o tecnologías

El ciclo de vida de los productos, procesos o tecnologías es similar al ciclo de vida biológico. Todo el conocimiento que está involucrado en una tecnología tiene su punto de partida en las ciencias básicas (química, física, matemáticas, biología).

La primera etapa del ciclo de vida de un producto se denomina *introducción* y para las tecnologías consiste de *investigación básica* e *investigación aplicada*. La segunda etapa es la de *crecimiento* y para las tecnologías ya involucra *investigación y desarrollo tecnológico* (I+D). La tercera etapa es la de *madurez* y se alcanza la *diseminación* y *comercialización* (la tecnología se generaliza y es empleada por el público). La cuarta etapa es la de *declinación*, la tecnología es desplazada y cae en la *obsolescencia*. Como se puede apreciar en la figura 3, presenta una forma de “S” [Levitt, 1965].

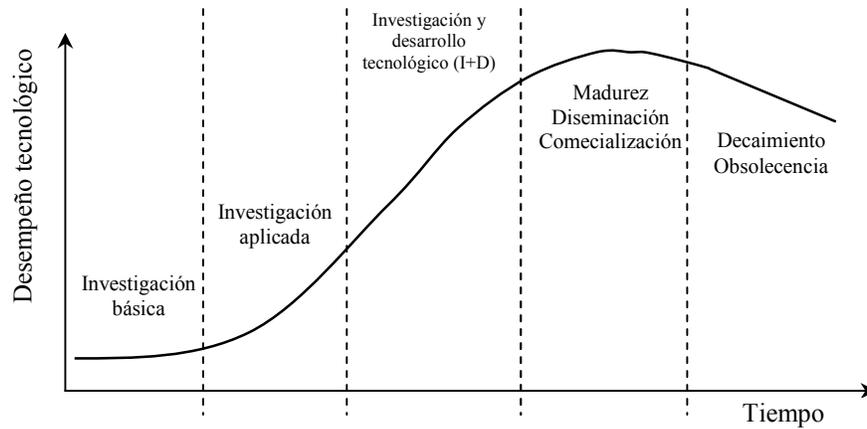


FIGURA 3. CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO/TECNOLOGÍA.
FUENTE: ADAPTADO DE LEVITT, 1965.

En las primeras dos etapas se invierten grandes cantidades de dinero, esfuerzo y otros recursos en una nueva tecnología, pero se observan pequeños avances en desempeño y poco rendimiento. Cuando se acumula el conocimiento y la experiencia (tercera fase), se obtienen progresos más rápidamente: tan pronto como se sortean obstáculos técnicos importantes y la innovación alcanza cierto nivel de adopción, se tiene un crecimiento exponencial. En esta fase, incrementos relativamente pequeños en los esfuerzos y recursos terminan en grandes resultados.

Finalmente, conforme se aproxima al límite físico de la tecnología, incrementar el desempeño se vuelve más difícil y costoso. Cuando una tecnología empieza a madurar, generalmente existen mejoras incrementales, lo que alarga la curva y desplaza sus límites. En muchos casos, nuevas y diferentes tecnologías comienzan a interactuar con las ya existentes, lo que genera nuevas oportunidades y se llega a dar un salto de una tecnología a otra, y es entonces cuando tienen lugar la mejora continua e innovaciones constantes (figura 4).

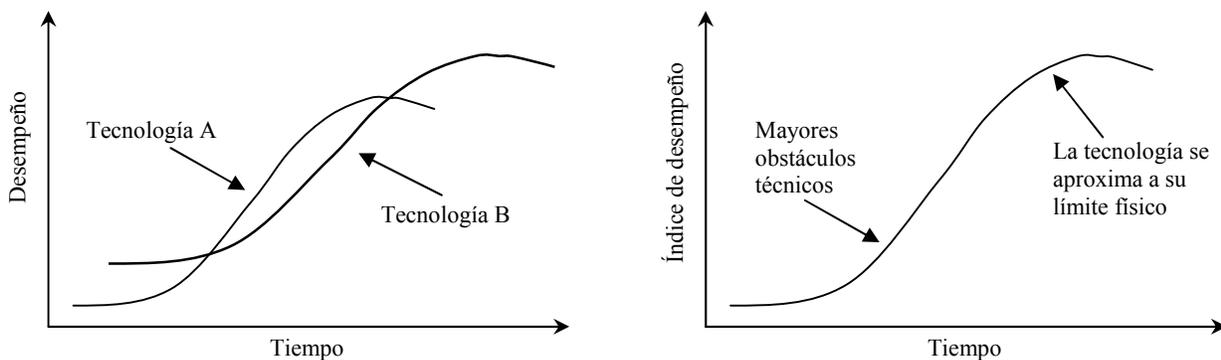


FIGURA 4. CICLO DE VIDA DE LA TECNOLOGÍA. LA BRECHA TECNOLÓGICA SEPARA LAS TECNOLOGÍAS A Y B.
FUENTE: EJEMPLO SIMPLIFICADO DE ELABORACIÓN PROPIA. ADAPTADO DE POLLI ET AL, 1969.

1.4 Prospectiva tecnológica

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), define la prospectiva como *“un conjunto de **intentos** sistemáticos para mirar a largo plazo el futuro de la ciencia, la tecnología, la economía y la sociedad, con el fin de identificar aquellas tecnologías genéricas emergentes que **probablemente** generarán los mayores beneficios económicos y sociales”*.

Según Martin (2002), la prospectiva es “el proceso involucrado en el intento sistemático por visualizar el futuro a largo plazo de la ciencia, tecnología, economía, ambiente y sociedad con el objetivo de identificar las áreas de investigación estratégica y de tecnologías genéricas emergentes para mejorar la economía y los beneficios sociales”. La prospectiva tecnológica es una herramienta con la que se cuenta para poder determinar las acciones a seguir para llegar a un fin deseado, o tratar de evitar un futuro indeseable.

Los fondos públicos para invertir en la ciencia y la tecnología (CyT) son limitados, por lo que los gobiernos no pueden darse el lujo de costear todas las áreas de la CyT de la forma que le gustaría a los investigadores, por lo anterior, la elección de gasto de los gobiernos necesitan unir ciencia y tecnología con la investigación de las necesidades sociales. La prospectiva ofrece una herramienta para ayudar a elegir tales opciones.

Los ejercicios de prospectiva tienen una metodología establecida en la que se determina y analiza el problema a atacar, para conocer el problema lo más posible al observar las causas, consecuencias, los diversos aspectos y actores involucrados, y así establecer las estrategias que más probablemente nos lleven al futuro deseado [Miles, 2002]. El problema es complejo, ya que se trabaja generalmente con situaciones que involucran a la sociedad y de índole no lineal, por lo que es muy difícil (por no decir imposible) determinar a ciencia cierta el comportamiento del sistema completo.

Entre los criterios que se emplean para seleccionar los métodos, se encuentran:

- Recursos, especialmente tiempo y dinero
- La amplitud y la profundidad de la participación de expertos y principales actores (stakeholders)

- La conveniencia de combinar el método con otros, como alimentadores y complemento a los resultados de otros métodos (triangulación)
- Los resultados deseados de la prospectiva
- Los requerimientos de datos cualitativos/cuantitativos de varios métodos

Miles (2002) clasifica los métodos de prospectiva tecnológica de la siguiente forma: sondeo y marco de referencia; acercamientos estadísticos; métodos creativos y; establecimiento de prioridades.

1.4.1 Sondeo y marco de referencia

Es común para los estudios de prospectiva empezar con una actividad de sondeo y crear un marco de referencia, que juntos identifican e informan los problemas en que la prospectiva se enfocará:

- Sondeo ambiental. Examen del ambiente y puede ser de forma pasiva, activa y/o directa
- Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA). Es una herramienta analítica utilizada para categorizar factores internos y externos que influyen a una organización o las estrategias del territorio –o, en el caso de prospectiva, sus posibles futuros. Frecuentemente se establece como una matriz 2x2 que presenta una apreciación global de los mayores problemas a ser tomados en cuenta en el desarrollo de los planes estratégicos para una organización. La idea es que semejante apreciación permitirá establecer las estrategias que desarrollarán las fuerzas con las oportunidades, mientras eliminan las amenazas y superan las debilidades. FODA no es una herramienta analítica estática, sino una parte dinámica de dirección, desarrollo comercial y aprendizaje organizacional. Requiere el suficiente conocimiento para apoyar la definición y priorización de factores. Es necesario suficiente conocimiento experto.
- Enfoque Sociocultural, Tecnológico, Económico, Ecológico-ambiental y Político-legal (STEOP). Es una valoración crítica del contexto del problema. Evalúa: la posibilidad para cumplir con los objetivos; eventos o tendencias que tienen o pueden tener un impacto en el problema; desarrollo de los factores externos, qué significan para el problema y como afectan la posición del mercado, programas, productos y servicios y, las capacidades institucionales.

El proceso de análisis cuenta con dos pasos: una lluvia de ideas para obtener información de las tendencias del macro ambiente externo (STEEP) y; obtener información de eventos o desarrollos potenciales.

Durante el proceso de ejecución, se debe cuestionar a los participantes para escanear las tendencias e identificar eventos. Explorando el futuro posible y/o plausible, los participantes deben identificar y/o relacionar oportunidades potenciales y nuevas tendencias. En el seguimiento, habiendo obtenido la lista de tendencias STEEP, los resultados deben ser analizados por discusión [Metin, 2003].

- Estudios de problemas. Se usan para consultar un amplio rango de opinión especialista que podrían acomodarse sin esfuerzo en reuniones cara–a–cara, para encontrar lo que consideran que serán los desarrollos importantes en sus áreas. Los estudios pueden ser bastante abiertos, en que a los expertos les permiten elaborar los problemas con su propio estilo, mientras proporcionan frecuentemente la documentación pertinente y el cómo. Sin embargo, tal material puede ser difícil de procesar, y muchos de los cuestionados son muy reacios a embarcarse en semejante ejercicio abierto.

1.4.2 Acercamientos estadísticos.

Son acercamientos estadísticos basados en las suposiciones bien definidas.

- Extrapolación de tendencias. Es uno de los más usados de todas las técnicas de la prospectiva. Para asumir que una tendencia continuará, se debe tener una buena razón para creer que persistirá en lugar de cambiar su curso. Ajustando una curva a una serie de puntos es una buena manera de visualizar el desarrollo de una tendencia, pero se pueden cometer errores de diversos tipos al hacerlo.
- Modelado por simulación en computadora. Es una herramienta popular; puede usarse para proyectar la forma en que el sistema operará con el tiempo, o como resultado de intervenciones específicas. La aproximación puede obligar a que se piense sistemáticamente sobre las suposiciones de la dinámica de un sistema, y hace buscar datos pertinentes con que probar, explicar o elaborar las suposiciones.

También permite explorar condiciones alternativas de arranque, eventos e intervenciones, e incluso experimentar con las suposiciones variables y comparar el comportamiento de los

modelos del sistema, basado en diferentes entendimientos de cómo opera, así como tratar simultáneamente con un gran número de variables y procesar el material de manera sistemática y meticulosa, aunque existe la posibilidad de obtener resultados inesperados o impredecibles por los diseñadores de la simulación.

Finalmente, las computadoras permiten presentar los resultados en la forma gráfica detallada, lo que permite comparar los resultados para diferentes tiempos o condiciones. Por otro lado, aunque se han producido modelos de cambio social, político y cultural durante décadas, la comprensión de cómo trabajan estos sistemas es incompleta y muy debatida, con visiones del mundo muy diferentes. La calidad de un modelo es tan buena como las suposiciones en que se basa y de los datos con que se alimenta.

- **Prospectiva genio.** Se usa para describir la generación de una visión del futuro a través de las visiones de un individuo dotado y respetado. Se requiere cautela, debido a que la naturaleza de tales visiones es que están montadas en posiciones particulares, y suelen ser bastante unilaterales.
- **Método Delphi.** Involucra un estudio de opinión, diseñado para alimentar de información de regreso a sus encuestados, no sólo para proveer el material procesado por el análisis de datos. El estudio se circula, al mismo juego de encuestados por lo menos dos veces. En las encuestas subsiguientes y con el mismo juego de preguntas, los encuestados reciben la retroalimentación en la estructura de respuestas de las rondas anteriores. El propósito es ofrecer la oportunidad del cuestionado de modificar sus juicios y promover el intercambio de visiones e información.

Fue diseñado para animar un verdadero debate, independiente de personalidades. Para eliminar la fuerza oratoria y pedagógica. La idea es que todos los encuestados tengan acceso a información especial que sólo unos poseen, pero que puede informar los juicios que divergen del promedio.

Requiere planificación cuidadosa y laboriosa con la elección de participantes, la preparación de preguntas, y la provisión de retroalimentación. Es un método consumidor de tiempo y de trabajo intensivo.

1.4.3 Métodos creativos

La previsión es un proceso social y creativo que va más allá de la definición del problema y extrapolación. Procesos interactivos nutren nuevas e interesantes combinaciones de conocimiento son la clave de la prospectiva.

- Lluvia de ideas. Se usan extensivamente en trabajar futuros porque apunta a reducir las inhibiciones sobre generar ideas “salvajes”, y para estimular la creatividad y la nobleza de los puntos de vista. Sólo son un punto de arranque.
- Paneles de expertos. No sólo abren el proceso de prospectiva a cientos de individuos potenciales, también son los foros ideales para las discusiones en profundidad y debate. Los expertos se encuentran cara a cara, normalmente en sesiones privadas, a intervalos regulares en un periodo de tiempo fijo.
- Análisis de impacto cruzado. Es un método basado en expertos que produce resultados cuantitativos, aunque hay un proceso estadístico complicado de los datos requeridos para alcanzar los resultados. Una aplicación es la preparación de escenarios. Se trata de pedir a los expertos que establezcan la probabilidad de que varios eventos ocurran y de que los eventos ocurran si otros no lo hacen. En la práctica, relativamente pocas personas usan el método regularmente.
- Escenarios. Consisten en visiones de estados futuros y cursos de desarrollo, organizados de manera sistemática; sus mayores contribuciones involucran el intercambio de visiones y ahondar en la unión de redes de trabajo. Su creación se compara al proceso de escribir una película dónde la idea principal se formula y los personajes se desarrollan alrededor de él. Se pregunta: ¿Cuáles son las fuerzas directrices? ¿Qué es incierto? ¿Qué es inevitable?

1.4.4 Establecimiento de prioridades

Las prioridades se infieren generalmente de algunos de los métodos descritos anteriormente.

- Tecnologías críticas (o clave). Son un acercamiento particularmente útil por evaluar varias tecnologías (o líneas de investigación) cuando la selección de prioridades es la mayor tarea de un ejercicio de prospectiva. Las preguntas que típicamente caracterizan el ejercicio de tecnologías críticas incluyen: ¿Qué áreas son clave en I+D? ¿Cuáles son las tecnologías

críticas que deben apoyarse preferencialmente por los recursos? ¿Qué criterio debe aplicarse para elegir las tecnologías críticas? ¿Cuáles son las medidas más importantes que deben discutirse a nivel político para habilitar la aplicación de los resultados? El método consiste de cuatro pasos genéricos: localizar y seleccionar un panel de expertos para la consulta; generar una lista inicial de tecnologías; agrupar y priorizar la lista de tecnologías; armar la lista final de tecnologías críticas.

- *Roadmapping*. Se usa ampliamente en la industria para apoyar la estrategia de tecnología y planeación. Los *roadmaps* comprenden multicapas gráficas basadas en el tiempo que permiten alinear los desarrollos de tecnología con las tendencias del mercado y directrices.

1.5 Elección del método de prospectiva en este trabajo

Retomando los criterios más importantes para seleccionar el o los métodos de prospectiva (sección 1.4), y analizando los recursos disponibles para la realización de este trabajo:

- Los recursos son muy limitados, especialmente tiempo y dinero.
- La información sobre las celdas de combustible es muy limitada, sesgada o no disponible en México. En fuentes internacionales, especialmente de Europa, Estados Unidos, Canadá y Japón, la información y los estudios disponibles son muy variados y amplios, lo que permite combinar diversos métodos, aunque puede ser especialmente complejo aplicarlos en México.
- La participación de expertos y principales actores es muy limitada, ya que es voluntaria. Los expertos no incurren en ningún compromiso con éste trabajo, les absorberá tiempo y otros recursos, y existe discreción sobre qué mostrar y compartir.

Como un primer paso, se buscará identificar a los principales expertos y sectores involucrados en la tecnología de celdas de combustible. De acuerdo a la disposición de cada experto, se efectuará una encuesta o cuestionario para conocer su visión, metas, recursos y principales aspectos que tiene sobre de la tecnología de celdas de combustible en México, así como sus líneas de investigación y de la institución a la que pertenece. Para obtener un panorama lo más claro y completo posible de la situación y prospectiva de nuestro país en cuanto a las celdas de combustible, se tomará como marco de referencia el enfoque STEEP (sección 1.4.1), para analizar, enmarcar y extrapolar la tecnología dentro de la situación Mexicana.

CAPÍTULO 2 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA Y SUS ALTERNATIVAS

2.1 Energía

Las diferencias de bienestar social entre naciones y en el interior de cada una de ellas, dependen en gran medida del acceso a las diferentes formas de energía. Las repercusiones macroeconómicas de las variaciones en los precios de los energéticos se ven reflejadas en indicadores como el Producto Interno Bruto (PIB). La evidencia empírica sugiere que los incrementos en los precios del petróleo y su volatilidad, producen inflación, desempleo y el abatimiento de las finanzas y otros activos. En términos absolutos, incluso un alza de 10% en los precios del petróleo produce pérdidas en el PIB que, pudiendo ser evitadas, contrarrestarían significativamente el costo de desarrollar las energías renovables [Jiménez-Rodríguez et al, 2004 y Huntington, 2005].

Actualmente, diversos países industrializados y en vías de desarrollo enfrentan dificultades para realizar nuevas inversiones para empatar la oferta con una creciente demanda de energía eléctrica. Por ello, la reestructuración de los sistemas energéticos es un fenómeno mundial reciente [Secretaría de Energía (SENER), 2005]. Según las proyecciones de la ONU (2007), en el 2050 se tendrán unos 9,200 millones de habitantes en el mundo, y todos ellos tendrán derecho a satisfacer sus necesidades de comida, casa, abrigo y educación. Si se cumple esa tendencia en el crecimiento poblacional, será necesaria una cantidad inmensa de energía para satisfacer las necesidades de la población mundial (tabla 1).

TABLA 1. PROYECCIONES DE LA POBLACIÓN MUNDIAL, ONU.

Población mundial, desglosada por principales grupos de desarrollo y zonas (1950, 1975, 2007 y 2050) y por variante de proyección

Zonas principales	Población (en millones de habitantes)			Población en 2050 (en millones de habitantes)			
	1950	1975	2007	Baja	Media	Alta	Constante
Mundo	2 535	4 076	6 671	7 792	9 191	10 756	11 858
Regiones más desarrolladas	814	1 048	1 223	1 065	1 245	1 451	1 218
Regiones menos desarrolladas	1 722	3 028	5 448	6 727	7 946	9 306	10 639
Países menos adelantados	200	358	804	1 496	1 742	2 002	2 794
Otros países menos desarrollados	1 521	2 670	4 644	5 231	6 204	7 304	7 845
África	224	416	965	1 718	1 998	2 302	3 251
América del Norte	172	243	339	382	445	517	460
América Latina y el Caribe	168	325	572	641	769	914	939
Asia	1 411	2 394	4 030	4 444	5 266	6 189	6 525
Europa	548	676	731	566	664	777	626
Oceanía	13	21	34	42	49	56	57

Fuente: División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Secretaría de las Naciones Unidas (2007). *World Population Prospects: The 2006 Revision*. Nueva York: Naciones Unidas.

Los principales usuarios de la energía, presentan un grave desbalance: más del 60% del consumo de energía corresponde a las naciones industrializadas, que solo representan el 17% de la población mundial. Esto es especialmente grave si pensamos que las comunidades aisladas en zonas remotas, fuera del alcance de caminos y sin vías de acceso, no cuentan con un abastecimiento de energía eléctrica, lo que implica que no tengan acceso a toda una serie de servicios, como recibir agua potable entubada, ya que se requiere de bombas que funcionan con electricidad. Adicionalmente, no pueden acceder a servicios básicos como educación y salud, y menos aún de las telecomunicaciones [SENER, 2005].

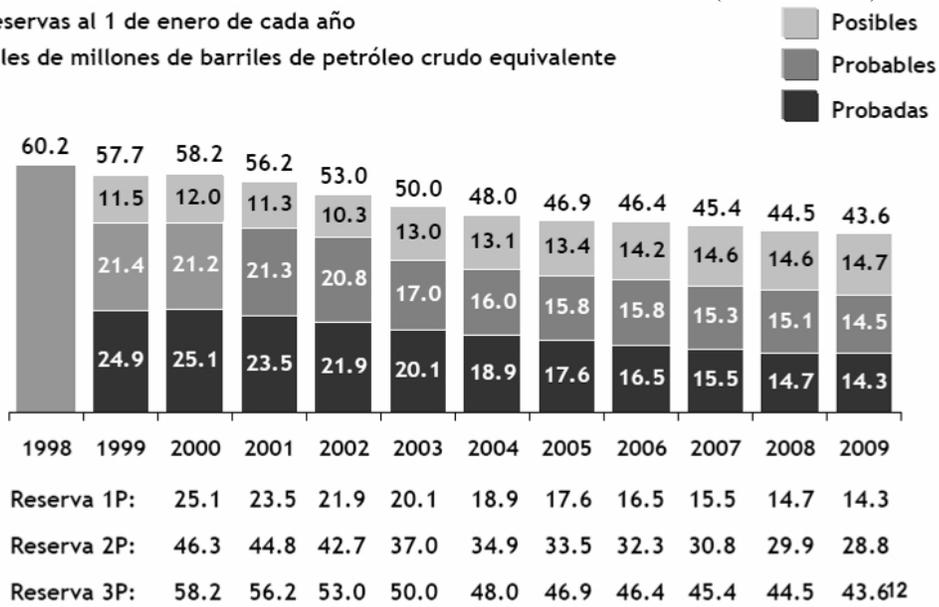
En los últimos 10 años, la tasa anual de crecimiento de la demanda por energía eléctrica en México (5.2%), ha sido mayor que la tasa de crecimiento del PIB (3.5%) y se espera que para la próxima década se mantenga esta tendencia, en virtud de que el país se encuentra en una fase de desarrollo económico e industrial caracterizado por un crecimiento poblacional importante, con preponderancia de sectores industriales con un uso intensivo de energía, aunado a un bajo nivel de ingreso y educación, que limita la eficiencia de los programas de ahorro de energía [SENER, 2005].

2.2 Petróleo

En el periodo de 1980 al 2004, la producción de crudo de Petróleos Mexicanos pasó de 1.9 a 3.4 millones de barriles diarios, alcanzando su máximo en ese último año. A partir de ese momento, ésta ha venido disminuyendo gradualmente, coincidiendo con el comportamiento del Complejo Cantarell. Para 2008 la producción de crudo se ubicó en 2.8 millones de barriles diarios, niveles de producción similares a los que se observaban en 1982. Esto significa que en tan sólo 4 años, se dejaron de producir alrededor de 600 mil barriles diarios de crudo. En adición a lo anterior, en el periodo de 2004 a 2007, la reposición de reservas probadas se ubicó en promedio en 35 por ciento, nivel que no permite asegurar el sostenimiento de la producción a futuro [SENER, 2011]. La tabla 2 muestra la evolución de las reservas de petróleo en México de 1998 a 2009.

Los precios de combustibles han aumentado y son muy volátiles por encarecimiento y los factores de tipo político que llevan a la reducción del suministro.

TABLA 2. EVOLUCIÓN DE LAS RESERVAS DE PETRÓLEO EN MÉXICO (PEMEX 2009).
Reservas al 1 de enero de cada año
Miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente



Nota: Las sumas pueden no coincidir por redondeo.

Las crisis energéticas globales que se han sucedido en las últimas décadas, entre ellas la crisis petrolera de 1973 y más recientemente la crisis del gas natural entre Rusia y Ucrania, han motivado un cambio en la forma de transformar y aprovechar la energía a nivel mundial para garantizar la seguridad energética y responder de manera activa ante los retos ambientales, a través del uso eficiente y racional de los recursos energéticos. Adicionalmente, se ha puesto especial énfasis en promover un cambio estructural en los patrones de consumo de los distintos sectores de la economía y la sociedad [SENER, 2011].

La Agencia Internacional de Energía (AIE), en el marco del Plan de Acción de Gleneagles del G8 (Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Japón, Reino Unido y Rusia), ha emitido una serie de recomendaciones para incrementar la eficiencia en el consumo de energía en los rubros con mayor potencial de ahorro: inmuebles, electrodomésticos, iluminación, transporte e industria. Aunado al ahorro en energía, se estima que si las recomendaciones se implementaran a nivel mundial de forma simultánea, se dejarían de emitir 8.2 miles de millones de toneladas CO₂ por año, lo que equivale al doble de las emisiones anuales totales de la Unión Europea [IEA, 2008].

Actualmente el petróleo satisface la mayor parte del consumo mundial de energía primaria. El crecimiento anual en el consumo mundial de petróleo se estima que será de 1% en los próximos años, al pasar de 85 millones de barriles diarios en 2008 a 105 millones en 2030. La tendencia creciente en la demanda es el resultado del incremento poblacional y el desarrollo económico. A fin de aumentar las reservas de petróleo, es necesario explorar más en zonas de acceso cada vez más difícil, aumentando los recursos necesarios para extraerlo, por lo que los costos de producción están en aumento [IEA, 2009].

Cada año se consume cuatro veces más petróleo del que se encuentra. Los grandes descubrimientos parecen haber sido hechos hace mucho tiempo y el suministro futuro depende del descubrimiento de pequeños nuevos yacimientos y de la mejor exploración de los antiguos y mayores. Ningún experto en este campo duda que se alcance el máximo de la producción global de petróleo dentro de poco... la pregunta es: ¿cuándo? Las proyecciones más optimistas afirman que esto no se producirá antes del 2037, pero algunos analistas calculan que se alcanzaría en el 2010 como se ilustra en la figura 5.

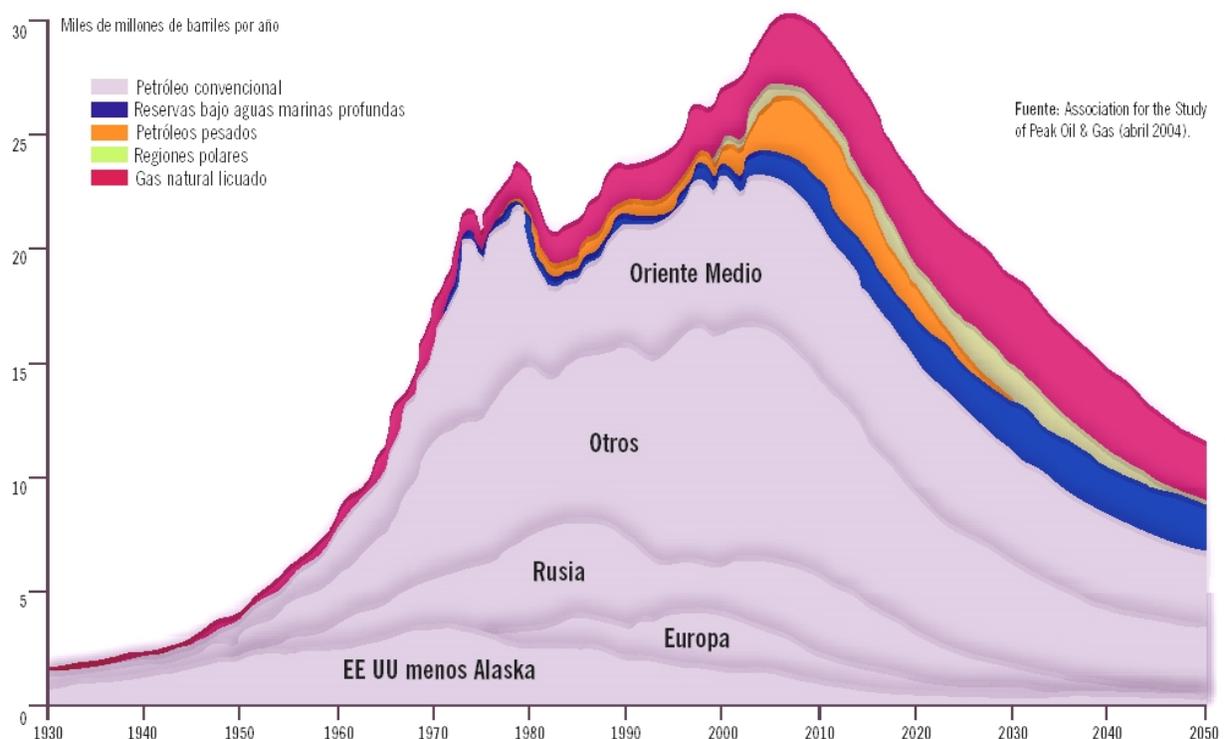


FIGURA 5. EL PICO DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL PETRÓLEO
FUENTE: ASSOCIATION FOR THE STUDY OF PEAK OIL & GAS, 2004

2.3 Cambio climático

En los últimos años se ha incrementado la temperatura promedio del planeta, debido a los “gases invernadero”, causando un clima extremoso, así como condiciones climáticas extremas (inundaciones, tormentas de viento, desprendimientos de terrenos, olas de frío y calor, etc.) de mayor fuerza, frecuencia y/o intensidad [Instituto Nacional de Ecología (INE), 2010].

Las naciones industrializadas causan la mayor parte de la contaminación atmosférica del mundo. Los Estados Unidos cuentan con solamente un 5% de la población mundial, pero generan el 22% de las emisiones de CO₂ producidas en el mundo y el 19% de todos los gases que provocan el efecto invernadero. Más de un 80% del SO₂, un 50% de los NO_x, y de un 30 a un 40% de las partículas en suspensión emitidos a la atmósfera en Estados Unidos proceden de las centrales eléctricas que queman combustibles fósiles, las calderas industriales y las calefacciones. Un 80% del CO y un 40% de los NO_x e hidrocarburos emitidos proceden de la combustión de la gasolina y el gasóleo en los motores de los vehículos automotores de combustión interna [INE, 2006].

La contribución actual de América Latina a la emisión de gases de efecto invernadero global es baja (aproximadamente 4%). Sin embargo, los impactos potenciales futuros del clima y de los cambios en el uso de la tierra podrían ser extensos y costosos para esta región. Además, la liberación de carbono a la atmósfera, como consecuencia de la deforestación masiva y continua, tendría la capacidad potencial de alterar el balance global del carbono. Debe esperarse que el cambio climático afecte aún más la disponibilidad de recursos hídricos y de biomasa (carbón de leña y producción de combustibles) ambos elementos importantes como fuentes de energía en muchos países de América Latina. El agua y la biomasa están ya bajo condiciones de tensión en muchas de esas áreas como resultado de la demanda creciente, que se verá incrementada debido a la tendencia de las migraciones urbanas.

Cada vez es más evidente el hecho de que ya nadie cree que se vuelva a una situación de energía barata y cobra más fuerza la toma de conciencia en materia ambiental. Estas dos condiciones son factores determinantes que están engendrando las rupturas tecnológicas que imponen la llegada de vehículos de “cero emisiones” de CO₂ como los eléctricos y los de celdas de combustible alimentados por hidrógeno.

Las principales compañías petroleras gastan miles de millones de dólares en procesos de extracción y refinación, lo que supera con creces la inversión en investigación y desarrollo de combustibles alternativos. Como han señalado varios expertos, podría migrarse a un entorno de hidrógeno en 10 años si el gobierno y la industria fuesen motivados para hacer que suceda [Johnston et al., 2005].

Los combustibles fósiles y los elementos radiactivos adecuados para su uso en reactores de fisión nuclear son finitos. Al mismo tiempo, las energías naturales renovables (luz solar, viento, agua corriente, olas y mareas) estarán disponibles por siempre y tienen el potencial de proveer toda la demanda de energía de la humanidad en el largo plazo [Mazza et al., 2004].

2.4 Combustibles alternativos

¿Cuáles son las fuerzas que nos mueven hacia la siguiente generación de combustibles? Tres grandes factores: seguridad energética, contaminación y cambio climático [Dunn, 2001].

El Departamento de Energía (DOE) de E.U. define que los combustibles alternativos son sustancialmente no derivados del petróleo y producen beneficios ecológicos y seguridad en el rendimiento de energía, como son: mezclas que contienen mínimo 85% en volumen de alcohol, incluyendo metanol y etanol desnaturalizado; gas natural (comprimido o licuado); propano; hidrógeno; combustibles líquidos derivados del carbón; combustibles derivados de materiales biológicos; electricidad; biodiesel puro. Así, se cuentan con diversos combustibles alternativos y que pueden llegar a ser de menor costo que los empleados tan ampliamente en la actualidad [DOE, 2004].

2.4.1 Biomasa

A la masa de materia orgánica no fósil de origen biológico se le conoce como biomasa. Una parte de este recurso puede ser explotada eventualmente con fines energéticos o de producción eléctrica. Aunque las distintas formas de energía de la biomasa se consideran siempre como renovables, debe señalarse que su índice de renovación es variable, ya que está condicionado por los ciclos estacionales y diarios de flujo solar, los azares climáticos y el ciclo de crecimiento de las plantas.

La biomasa primaria es el conjunto de vegetales de crecimiento más o menos rápido que pueden utilizarse directamente o tras un proceso de transformación, para transformar la energía. La biomasa secundaria es el conjunto de residuos de una primera utilización de la biomasa para la alimentación humana o animal o para alguna actividad doméstica o agroindustrial que han sido objeto de alguna transformación física. Estos residuos son principalmente estiércol, basura, lodos procedentes de la depuración de aguas residuales. Su utilización es consecuencia de la preocupación por la protección del medio ambiente y la consideración de su valor como fuente de energía.

Los siguientes datos muestran la importancia del uso de bioenergía en el mundo:

- 11 millones de hogares se iluminan con biogás
- 250 millones de estufas eficientes de leña
- 38,000 MWe de capacidad instalada para producción de electricidad
- 30 mil millones de litros/año de etanol
- 180 millones de personas viven en países con normas para mezclar etanol con gasolina

Los países desarrollados están incrementando el uso de la biomasa con el fin de reducir sus emisiones de CO₂ y respetar así los convenios adquiridos en el marco del protocolo de Kyoto recién firmado [Maser et al, 2005].

2.4.2 Gas natural

Durante las últimas décadas el mercado de gas natural ha experimentado un proceso de liberalización o desregulación a nivel estructural en su cadena de valor, tanto en países desarrollados como en países en desarrollo. Este proceso de desregulación está directamente relacionado con la globalización económica: antes de este proceso de apertura ocurrían intercambios de gas natural entre países y regiones fronterizas, hoy se siguen intensificando con el uso del gas natural licuado (GNL) alrededor del mundo.

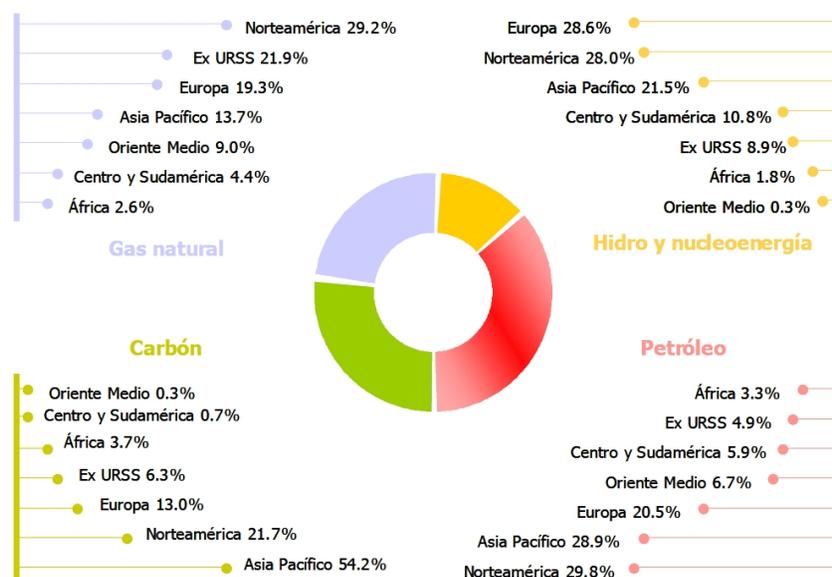
Durante el periodo 1994-2004, el gas natural pasó de ser un combustible marginal a un insumo esencial de la economía moderna (ver tabla 3 y figura 6), principalmente por la mayor limpieza de su combustión y su eficiencia energética. En los próximos años, el gas natural será la fuente de

energía primaria que aumentará más rápido en todo el mundo, manteniendo una tasa de crecimiento de 3.2% anual durante el periodo 1999-2010, más de dos veces superior a la tasa de crecimiento del carbón. Se proyecta que el consumo de gas natural seco pasará de 230.1 a 327 miles de millones de pies cúbicos diarios en 2010, principalmente para la generación de energía eléctrica [SENER, 2005].

TABLA 3. CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA PRIMARIA POR TIPO DE FUENTE 1994-2004
(MILLONES DE TONELADAS DE PETRÓLEO CRUDO EQUIVALENTE)

Año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	variación 2004/2003	tmca 1994/2004
Total mundial	8,310	8,543	8,792	8,548	8,548	8,884	9,080	9,179	9,488	9,801	10,224	4.3	2.1
Petróleo	3,204	3,251	3,329	3,406	3,426	3,494	3,539	3,552	3,581	3,642	3,767	3.4	1.6
Carbón	2,186	2,259	2,306	2,319	2,239	2,109	2,148	2,217	2,413	2,614	2,778	6.3	2.4
Gas natural	1,877	1,938	2,034	2,025	2,060	2,107	2,195	2,219	2,282	2,343	2,420	3.3	2.6
Nucleoenergía	504	526	545	541	551	571	585	601	611	598	624	4.4	2.2
Hidroenergía	540	569	578	586	594	603	614	590	601	604	634	5.0	1.6

Fuente: Sener con base en información de *BP Statistical Review of World Energy*, 2005.



Fuente: Sener con base en información de *BP Statistical Review of World Energy*, 2005.

Nota: México se incluye en Norteamérica.

FIGURA 6. CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA PRIMARIA POR REGIÓN 2004 (PARTICIPACIÓN PORCENTUAL)

La utilización del gas natural licuado (GNL) es una oportunidad para diversificar las fuentes de suministro de energía en los próximos años. El crecimiento en la demanda de GNL, su disponibilidad de oferta mundial, y los menores costos se han combinado para mejorar las condiciones del GNL, tanto que, por primera vez en 20 años, otros países pueden tener un mayor acceso en términos económicos para importarlo.

En el largo plazo, ante el crecimiento potencial de la demanda se requerirán soluciones de gran escala para contar con la oferta suficiente. Más que incrementar la actividad exploratoria en las regiones tradicionalmente productoras de gas, será necesario desarrollar nuevas y grandes reservas. Los países de Norteamérica continúan moviéndose hacia la integración de un mercado regional. La capacidad de gasoductos en las fronteras de Estados Unidos, Canadá y México, se está incrementando, la actividad de exportación/importación está creciendo y los precios en los tres países están convergiendo [DOE, 2004].

2.4.3 Hidrógeno (H₂)

Es el elemento químico más abundante en el universo. Es un gas que no presenta olor, es transparente, incoloro, sin sabor y no es venenoso. Produce poca o ninguna contaminación, es renovable y se encuentra en todo ser vivo. Cuando se realiza su combustión, solo se produce agua y energía calorífica. Pero en nuestro planeta, la mayoría de los átomos de H₂ están combinados con átomos de oxígeno (O₂) y/o carbono (C), y realizar un proceso para obtener H₂ requiere mucha energía [Thomas et al., 1999]. La manera más fácil y limpia de obtenerlo se llama electrólisis: se sumergen dos electrodos en agua, se aplica electricidad y se obtiene gas H₂ del electrodo negativo y O₂ del positivo. El H₂ puede ser utilizado como un combustible capaz de almacenar y transportar de energía. Se debe destacar que el H₂ no es una fuente primaria de energía, es un combustible secundario que debe ser producido [Johnston et al., 2005].

Se estima que más del 95% del H₂ se genera por la reformación convencional del carbón o hidrocarburos. Este proceso produce dióxido de carbono (CO₂). Otros procesos son promisorios a largo plazo para producir H₂ limpio a bajo costo, incluyendo la reforma de biomasa de cultivos como el etanol basado en maíz, que puede ser neutral en CO₂, porque solo libera tanto CO₂ como las plantas hayan consumido en primer lugar [DOE, 2004].

Los sistemas biológicos de conversión de energía utilizan materiales comunes y disponibles para la conversión y catálisis, y estos sistemas también se auto mantienen. Por estas razones, puede competir en costo con otros sistemas de producción de H₂. En el planeta, los procesos biológicos producen un mínimo de 250 Mton/año de H₂. La mayoría de este H₂ proviene de la fermentación

anaerobia de carbón previamente fijado por fotosíntesis. De 6 a 17 Mtons/año de H₂ se producen como un subproducto del secuestro biológico de nitrógeno en la tierra. Este H₂ biológico se utiliza en su totalidad como un medio de almacenamiento de energía que se utiliza para el crecimiento de los organismos y de mantener el proceso esencial de la vida. La biosfera utiliza una pequeña fracción de la energía solar disponible (<0.5% de la producción primaria por fotosíntesis) para producir H₂ en una escala y a un ritmo compatible con las necesidades energéticas humanas. La producción y el consumo de H₂ biológico emplea catalizadores altamente selectivos y eficientes, a partir de materiales ampliamente disponibles en el ambiente que operan en medio acuoso y a temperaturas compatibles con la vida. Entender dichos mecanismos de catálisis y los procesos de integración energética de estos sistemas biológicos, promete revolucionar el desarrollo de la economía energética. También se puede producir H₂ utilizando potencia fotovoltaica, celdas solares ó turbinas eólicas para electrolizar agua. Esto sería una verdadera forma de cero emisiones de generar H₂ [DOE, 2004].

La mayor parte del H₂ se produce en el mismo lugar donde se consumirá. El H₂ se utiliza como materia prima para producir gasolina en las refinerías, para fabricar amoniaco, diversos productos químicos, semiconductores, metal templado, procesamiento de alimentos, entre otros.

El H₂ tiene más potencia en términos de energía/peso que cualquier otro combustible, pero en volumen es uno de los más débiles. Ya que el H₂ no proporciona lubricidad y es altamente volátil, los sistemas de manejo de combustible deben endurecerse y sellarse herméticamente. Generar H₂ requiere mucha energía y comprimirlo o licuarlo requiere aún más, equivalente al 10 ó 30% del contenido de energía del H₂, por lo se requiere de grandes avances en diversas áreas para que pueda considerarse un combustible conveniente.

El término “Economía del Hidrógeno” fue empleado en 1970 por los ingenieros de General Motors (GM), quienes visualizaban al H₂ como “el combustible para todo tipo de transporte”. La Economía del Hidrógeno significa que el H₂ puede ser empleado para almacenar la energía de fuentes renovables (como solar o eólica) y para transportarla grandes distancias (para suministrar ciudades) en grandes cantidades [Bockris, 2002]. El futuro de la economía de hidrógeno es inevitable ya que las tecnologías del H₂ tienen el potencial para superar el consumo de hidrocarburos [Ramírez et al., 2004].

2.4.3.1 Seguridad del hidrógeno

El H₂ es altamente flamable y requiere poco O₂ en el aire para su combustión. Sin embargo, si es manejado adecuadamente es tanto ó más seguro que la mayoría de los combustibles. Los productores y usuarios de H₂ han generado registros de seguridad prácticamente impecables a lo largo de los últimos 50 años.

Existen muchos mitos acerca del H₂, que han sido desacreditados. Un estudio del incidente del Hindenburg encontró que no fue el H₂ lo que causó el accidente. El H₂ es muy flamable en una amplia gama de concentraciones, pero al liberarse se eleva cuatro veces más rápido que el gas natural, mientras que los vapores de gasolina y del gas propano pueden concentrarse sobre el suelo. Éstos son los motivos por los que sabemos que el H₂ del Hindenburg no estalló como se cree comúnmente. Parte de éste se quemó, pero la mayor cantidad se dispersó; además, el H₂ es prácticamente invisible al quemarse y no es tóxico [Thomas et al., 1999].

Estudios han demostrado que el H₂ presenta menos riesgos referentes a la seguridad en su uso que otros combustibles, incluyendo gasolina, propano y gas natural. En el “Reporte de Seguridad del H₂ en Vehículos” [Ford, 1997] se concluyó que, “la seguridad de un sistema de H₂ en Vehículos con Celda de Combustible (FCV por sus siglas en inglés) es potencialmente mejor que los registros de seguridad demostrados por gasolina ó propano e igual ó mejor que aquellos de gas natural”, además “Si tenemos en cuenta todo el sistema de combustible del H₂, desde la producción, transporte, almacenamiento y hasta la dispensación, la exposición total del público a los riesgos del combustible podrían ser inferiores a los de la infraestructura existente de la gasolina”. El estudio cita las ventajas en las propiedades físicas del H₂ (mucho menor densidad que el aire, mejor límite inferior de flamabilidad y de detonación que otros combustibles) como los principales contribuyentes al mayor potencial en seguridad del H₂.

Específicamente, el estudio compara la seguridad de varios sistemas de combustible durante colisiones en espacios abiertos, en túneles y a lo largo del ciclo de vida del combustible. El estudio encontró que en una colisión en espacios abiertos, los vehículos alimentados con H₂ eran más seguros que autos con motor de combustión interna (ICE por sus siglas en inglés) a gasolina, propano o gas natural debido a varios factores:

- Los tanques de fibra de carbón del H_2 tienen alta resistencia a la ruptura aún en alto impacto. En general, los tanques de H_2 y sistemas de operación están diseñados para resistir sin ruptura presiones 2.25 a 3.5 veces su presión de operación, colisiones a alta velocidad y disparos directos de rifles y pistolas de alta potencia.
- Un FCV podría requerir aproximadamente un 60% menos energía que un vehículo con ICE por que es más eficiente. El H_2 gaseoso se quemaría más rápido en caso de fuego ya que tiene una velocidad de ignición unas 7 veces mayor que la del gas natural o de la gasolina. El resultado podría ser una ráfaga delgada de fuego ó fuego que no causaría tanto daño como el fuego iniciado por gasolina (figura 7).

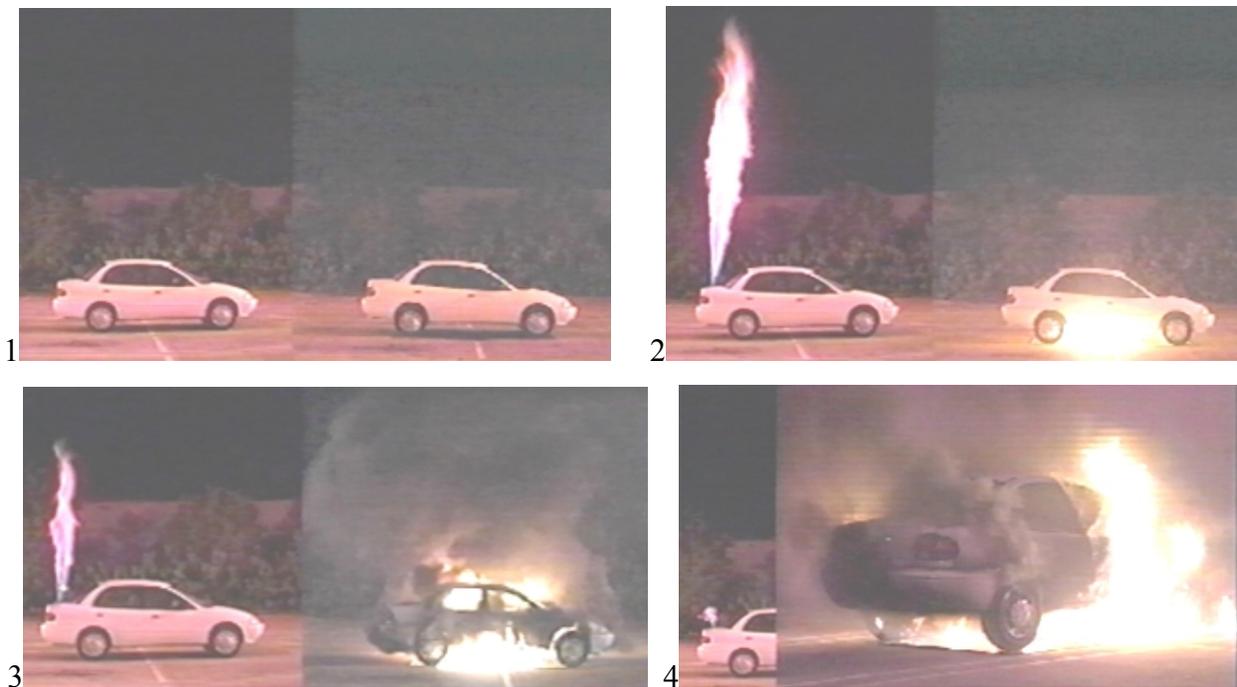


FIGURA 7. SIMULACIÓN DE FUGAS DE COMBUSTIBLE. (SWAIN, 2001).

FOTO 1, TIEMPO 0'00'' VEHÍCULO H_2 A LA IZQUIERDA, VEHÍCULO GASOLINA A LA DERECHA.

FOTO 2, TIEMPO 0'03'', OCURRE LA IGNICIÓN EN AMBOS VEHÍCULOS.

FOTO 3, TIEMPO 1'00'' EL FLUJO DEL H_2 DISMINUYE, INCENDIO EN EL VEHÍCULO A GASOLINA.

FOTO 4, TIEMPO 1'30'' EL H_2 CASI SE AGOTA, EL VEHÍCULO A GASOLINA SE CONSUME EN EL INCENDIO.

- Un FCV tendrá menos sensores de seguridad y dispositivos que un ICE, para detener el flujo del combustible a través del sistema si ocurriera una fuga o en caso de un impacto. Mediante el sellado del tanque, las medidas de seguridad disminuirán las posibilidades de que una ruptura en la línea causen una fuga continua que conduzca a una concentración suficiente para iniciar la ignición. El diseño del vehículo también cortará la energía eléctrica de las baterías eliminando así una fuente de ignición.

- El H₂ posee una densidad de solo el 7% respecto a la del aire, por lo que tiende a elevarse y dispersarse aún sin viento ni ventilación. Respecto a la densidad del aire, la del gas natural es 55% menor, la de los vapores de la gasolina es de 3.4 a 4 veces mayor y la del propano es 1.52 veces mayor. El H₂ también tiene un coeficiente de difusión 3.8 veces mayor que el del gas natural, 6.1 veces mayor que el vapor del propano y 12 veces mayor que el vapor de la gasolina. Consecuentemente, el gas H₂ se eleva y difunde lateralmente más rápido que el gas natural, propano ó la gasolina. En espacios abiertos, la velocidad de dispersión mayor del H₂ debe traducirse en menos incendios.
- En una colisión en un túnel, el H₂ es más seguro que otros combustibles por las mismas propiedades que lo hacen más seguro en espacios abiertos. El gas H₂ se dispersará más rápido que otros combustibles, creando sin embargo, un flujo más largo de gas que pueda potencialmente hacer contacto con más fuentes de ignición.
- Si es manejado adecuadamente, el ciclo de vida del H₂ es más seguro que los del gas natural, propano y gasolina. La producción y transporte del H₂ tiene menos riesgos públicos directos ya que líneas de tubería de H₂ y camiones cisterna presentan menos riesgos públicos que camiones cisterna con petróleo. Además, el H₂ no es tóxico y no contaminará al ambiente como lo haría un derrame de propano, gasolina ó aún el gas natural.

Los registros en seguridad del H₂ no muestran evidencia de riesgos inusuales. Los camiones de H₂ líquido han llevado a lo largo de los caminos de EU un promedio 70 millones de galones de H₂ líquido por año sin ningún incidente serio. Una mezcla gaseosa alta en H₂ llamada “gas de ciudad” utilizado para iluminar las calles y casas ha mostrado tener una misma tasa de seguridad que gas natural usado de manera similar. El H₂ ha sido manejado y enviado a través de cientos de millas de tubería en E.U. con relativa seguridad para las industrias del petróleo, química y del acero. Más aún, la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio de E.U. (NASA por sus siglas en inglés), ha utilizado H₂ líquido como su principal fuente de combustible durante los últimos 50 años sin accidentes serios.

Se espera que la operación de una estación de recarga de H₂ sea mucho más higiénica y automatizada de lo que hoy son las gasolineras. Se están desarrollando estándares para una conexión inteligente integrada con contacto a tierra (para evitar chispas de electricidad estática),

y un enlace de comunicación entre el tanque y la bomba para monitorear la presión y temperatura. También se han hecho pruebas utilizando robots. La meta es tener un tiempo de recarga entre cinco y diez minutos, pues llenar rápidamente tanques comprimidos hace que aumenten la temperatura y la presión, lo que dificulta llenar el tanque por completo.

La mayoría de la gente no se da cuenta de que el H₂ se utiliza ampliamente en la industria, ni saben que ha sido utilizado por más de 40 décadas, incluso como combustible de calefacción casera. El H₂ se utilizó rutinariamente en los sistemas de calefacción de los hogares en la forma de “gas de ciudad” o “gas de carbón” antes de la Segunda Guerra Mundial. Éste se producía por gasificación del carbón en cada ciudad, lo que resulta en una mezcla de 50% H₂ y el resto de gas natural, CO₂ y de 3 a 6% de monóxido de carbono (CO). El “gas de ciudad” también fue utilizado en Inglaterra para la iluminación en el siglo XIX, con 48 Km de tuberías de hierro fundido establecidas en Londres en 1815 [Williams, 1981]. Tuberías de madera fueron utilizadas para transportar de este gas rico en hidrógeno en los E.U. hasta 1870. El “gas de ciudad” se utiliza ampliamente en China.

El H₂ se ha utilizado en industrias clave por muchas décadas. En 2006, se produjeron al menos 7.2 millones de Kg de H₂ en E.U., principalmente de petróleo y gas natural [Suresh et al., 2007]. Esta cantidad de H₂ podría abastecer 36 millones FCV. En todo el mundo, hay más de 800 Km de tuberías para H₂, que incluye 225 Km en el valle del Ruhr de Alemania, que han operado con seguridad desde 1938, y 210 Km en las inmediaciones de LaPorte, Texas [Ford, 1997].

2.4.3.2 Transporte y almacenamiento

Para transportar y almacenar H₂, éste se comprime y se entrega por tuberías en áreas limitadas cercanas a las instalaciones de producción. Para su entrega por tren o carretera en un rango de 320 km se utilizan tanques de gas comprimido, pero para distancias mayores normalmente el H₂ se licúa y se transporta en tanques refrigerados a -250°C. Conforme emerge la economía del H₂, se podría desarrollar una red de tuberías como las del gas natural. Una vez generado y comprimido, el H₂ puede fluir por gasoductos de gran longitud con una pérdida de 0.77% por cada 100 km (Bossel, 2003), que es casi la misma pérdida experimentada por la corriente eléctrica de alto voltaje en la líneas de transmisión, estimadas en 0.6% cada 100 Km.

Los cilindros con capacidad para H₂ comprimido a 73,500 o 147,000 atm son los más adecuados técnicamente, pero la autonomía es un problema en vehículos pequeños y ligeros. Un Kg de H₂ tiene aproximadamente el mismo contenido energético que 3.78 L de gasolina, pero incluso a 147,000 atm, un Kg de H₂ gaseoso consume aproximadamente 30 cm³ de espacio; lo mismo que 28 L de gasolina. Un Kg de H₂ líquido ocupa unos 15 cm³, pero se debe mantener a -250°C en un tanque súper aislado. Incluso en el mejor tanque, el H₂ se evapora a una tasa de 3% diario.

Los tanques aislados de alta presión tienden a ser estorbosos y difíciles de acomodar, además de que deben tener forma cilíndrica. Algunos metales se conjuntan y liberan H₂ a baja presión y con densidad relativamente alta en tanques fáciles de usar, pero estos metales son pesados, requieren de mucho calor para liberar H₂ y son lentos para recargar y/o requieren de mucha energía de enfriamiento durante la recarga.

La nanotecnología ofrece alternativas particularmente interesantes para el almacenamiento de H₂. Hacer que nanotubos de carbono absorban el H₂ es un concepto aún en planeación que podría resultar muy útil [DOE, 2004]. La industria abandonó ya la idea de cargar gasolina o metanol y equipar autos con refinerías (sistemas de reformación) a bordo para extraer H₂.

2.4.4 Fuentes de energía renovable

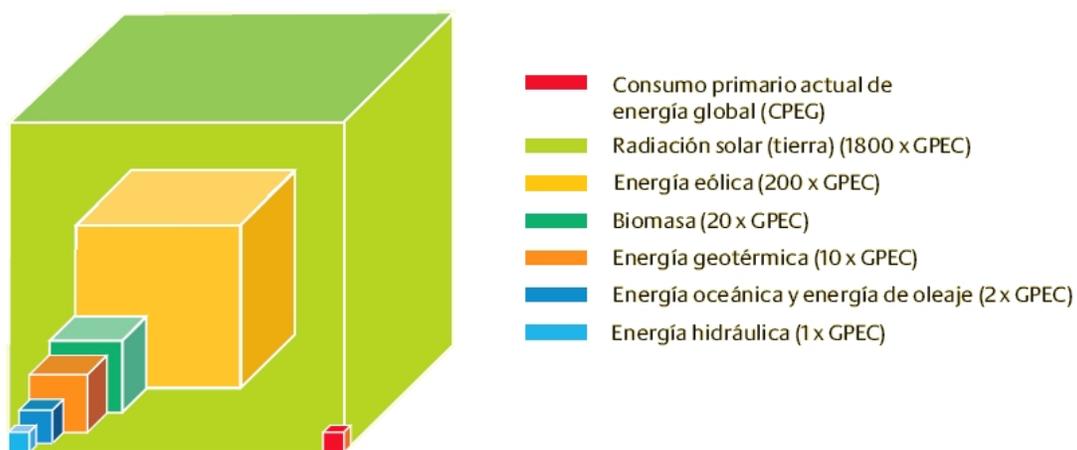
El comercio de energéticos primarios no sólo está aumentando la dependencia mutua entre las naciones, sino a la vez genera preocupaciones sobre la vulnerabilidad del abastecimiento energético en el futuro, dado que la producción seguirá estando concentrada en un número pequeño de naciones. En este sentido, los esfuerzos por cambiar a energéticos no fósiles pueden tener un impacto significativo sobre la dependencia de las importaciones [SENER, 2004].

Los proyectos que tratan de aprovechar la energía natural del planeta han disfrutado de apoyo, como los de celdas de combustible y los de energía solar, geotérmica, eólica, hidráulica, mareomotriz, entre otras. Las celdas de combustible son muy versátiles en sus aplicaciones actuales y futuras, para aplicaciones estacionarias, portátiles y de transporte. Sus condiciones de operación y características hacen que se puedan adaptar a las necesidades del usuario.

En general, dada la dispersión y la baja densidad energética de las fuentes renovables de energía, se requiere de grandes extensiones de tierra para lograr un nivel de aprovechamiento similar al de los sistemas que operan con combustibles fósiles. Igualmente, los sistemas de aprovechamiento de energías renovables tienen que ubicarse en el lugar donde se dispone del recurso, lo que muchas veces ocurre lejos de donde existe la necesidad. Por si fuera poco, la energía también se genera fuera de sintonía con la demanda, por lo que se deben encontrar formas de almacenamiento. Así, el H₂ tiene potencial como medio de transporte y almacenamiento de energía [Mazza et al, 2004].

El potencial de la energía renovable garantiza por mucho el suministro energético mundial, ya que puede cubrir el aumento de la demanda energética incluso si se trata de un aumento sustancial, por ejemplo, la energía potencial de la radiación solar excede más de mil de veces las necesidades energéticas de la humanidad, como se ilustra en la figura 8. Las energías renovables son ilimitadas, están disponibles universalmente y pueden cubrir la necesidad de soluciones energéticas concretas para áreas rurales. De este modo, hasta las regiones más remotas pueden tener un suministro de energía y acceder por esta vía al desarrollo.

Se trata de aprovechar la energía que se encuentra disponible en forma natural en el planeta y que no se está aprovechando. La ventaja de aprovechar estas formas de energía, es que incurren en el menor impacto posible para el ambiente (si es que incurren en alguno), debido a que no generan contaminantes ni alteran el ambiente de manera apreciable.



Fuente: Nitsch, F. (2007): Technologische und energiewirtschaftliche Perspektiven erneuerbarer Energien. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

FIGURA 8. EL POTENCIAL FÍSICO DE ENERGÍAS RENOVABLES

La Secretaría de Energía, a través de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, antes llamada Comisión Nacional para el Ahorro de Energía [CONAE]), reconoce las siguientes fuentes como alternas para la generación de energía eléctrica (2004):

- Central heliotérmica: instalación proyectada para transferir la energía solar a un fluido conductor de calor y transformar la energía térmica así recuperada en energía eléctrica. Por ejemplo, una central solar de tipo torre es una central heliotérmica que consiste en una torre en cuya parte superior está ubicado un absorbente que recoge y transforma la radiación solar reflejada sobre él por los helióstatos.
- Celda fotovoltaica: celda solar que utiliza el efecto fotovoltaico mediante un dispositivo que permite la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica. La eficiencia de conversión de estos sistemas es de alrededor de 15%, por lo que un metro cuadrado puede proveer 150 Watts. Las celdas fotovoltaicas, para poder proveer de energía eléctrica en las noches, requieren de baterías donde se acumula la energía eléctrica generada durante el día, lo cual encarece su aplicación.

En la actualidad se están desarrollando sistemas fotovoltaicos conectados directamente a la red eléctrica, evitando así el uso de baterías, por lo que la energía que generan se usa de inmediato por el propio usuario que la genera, con la posibilidad de vender los excedentes de electricidad a las compañías generadoras.

- Energía eólica: energía ligada a la actividad solar que origina sobre el planeta diferencias de presión atmosférica y de temperatura. La dirección del viento está también influida en cierta medida por la rotación de la tierra. Aproximadamente el 2% del calor del Sol que llega a la Tierra se convierte en viento, pero sólo una fracción muy pequeña puede ser aprovechada, ya que buena parte de estos vientos ocurre a grandes alturas o sobre los océanos, además de que se requieren condiciones de intensidad y regularidad en el régimen de vientos para poder aprovecharlos.

El viento contiene energía cinética que puede convertirse en energía mecánica y eléctrica por medio de aeroturbinas. De manera muy general, con un aerogenerador cuyas aspas tienen una longitud de 40m y sujeto a vientos con velocidad promedio de 8m/s, se pueden tener 600kW de capacidad.

- Energía mareomotriz: energía mecánica producto del movimiento de las mareas y las olas del mar. El movimiento de mareas es generado por la interacción gravitatoria entre la Tierra y la Luna. Este tipo de energía puede recuperarse en forma útil, explotando la energía debida al desplazamiento vertical de masa de agua a partir de su nivel medio o la energía debida a las corrientes de marea, flujo y contraflujo. La gran dificultad para la obtención de este tipo de energía es su costo y el establecimiento de un lugar apto geográficamente para confinar grandes masas de agua en recintos naturales.
- Energía geotérmica: es energía calorífica renovable producida en las profundidades del planeta. El calor ahí generado es llevado casi a la superficie por conducción térmica y por intrusión de la capa de magma originado a gran profundidad, lo que ocurre en ciertas zonas volcánicas. Los recursos hidrotérmicos son utilizados debido a la existencia de tecnología de perforación de pozos y conversión de energía para generar corriente eléctrica o para producir agua caliente para uso directo.

El fluido geotérmico extraído es inyectado nuevamente a partes de la periferia de la reserva para mantener presión en la misma. Si la reserva se va a utilizar para la aplicación de calor directo, el agua geotérmica es alimentada normalmente a un intercambiador de calor antes de ser inyectada de regreso a la Tierra. El agua caliente es utilizada para la calefacción de casas, invernaderos, para secado de vegetales, en lavanderías y en una gran variedad de usos alternos.

La energía geotérmica es un recurso doméstico, de bajo costo, confiabilidad y ventajas ambientales que superan a las formas de producción de energía convencionales. Contribuye tanto a la generación de energía, produciendo electricidad como con usos directamente de calor, tanto como para reducir la demanda de energía, como con ahorros en electricidad y gas natural a través del uso de bombas geotérmicas para calentar y enfriar edificios. El uso de la energía hidrotérmica es económico y hay en varios sitios de alto grado.

Muchos más recursos hidrotermales podrían ser utilizados si hubiera más tecnología disponible y si su desarrollo fuera promovido activamente por los gobiernos y la iniciativa privada.

- Energía hidráulica: el agua acumulada en corrientes y por gravedad, busca el mar formando ríos que se pueden manifestar en grandes caídas o en muchas corrientes, es la fuente de la energía hidroeléctrica. En muchos casos, esta energía se deposita en forma potencial en

embalses y se transforma en energía aprovechable al desplazarse hacia niveles inferiores. El agua en movimiento empuja dispositivos giratorios que la convierten en energía mecánica, o para mover generadores de electricidad.

Por ejemplo, para lograr una capacidad de 3,000 KW, se requiere tener una caída de agua de 100 m con un gasto de 3 m³/s. Esto se logra ampliamente en cualquier zona montañosa del planeta con un régimen regular de lluvias.

- Pilas solares: Las pilas solares producen electricidad por un proceso de conversión fotoeléctrica. La fuente de electricidad es una sustancia semiconductor fotosensible, como un cristal de silicio al que se le han añadido impurezas. Cuando la luz incide contra el cristal, los electrones se liberan de la superficie de éste y se dirigen a la superficie opuesta. Allí se recogen como corriente eléctrica. Las pilas solares tienen una vida muy larga y se utilizan sobre todo en los aviones, como fuente de electricidad para el equipo de a bordo.
- Pilas: las pilas y baterías son dispositivos que generan energía eléctrica a partir de una reacción electroquímica. Todas las pilas consisten en un electrolito (que puede ser líquido, sólido o en pasta), un electrodo positivo y un electrodo negativo. El electrolito es un conductor iónico; uno de los electrodos produce electrones y el otro electrodo los recibe. Al conectar los electrodos al circuito que hay que alimentar, se produce una corriente eléctrica. Aunque los materiales que conforman una pila pueden provenir de procesos renovables, al descargarse la misma, la disposición de los residuos resultantes supone un gran problema, por considerarse tóxicos y peligrosos.

Existen diferentes tipos de pilas:

Pilas primarias o voltaicas: son en las que el producto químico no puede volver a su forma original una vez que la energía química se ha transformado en energía eléctrica (es decir, cuando las pilas se han descargado). La primera pila eléctrica fue dada a conocer por Volta en 1800. La pila primaria más común es la pila Leclanché o pila seca, inventada por el químico francés Georges Leclanché entre 1860 y 1870. La pila seca que se utiliza hoy es muy similar al invento original. El electrolito es una pasta consistente en una mezcla de cloruro de amonio y cloruro de zinc. El electrodo negativo es de zinc, igual que el recipiente de la pila, y el electrodo positivo es una varilla de carbono rodeada por una mezcla de carbono y dióxido de manganeso. Esta pila produce una fuerza electromotriz de unos 1.5 V.

Pilas secundarias o acumuladores: son pilas reversibles que pueden recargarse invirtiendo la reacción química o pasando una corriente eléctrica a través de ellas en sentido opuesto a la operación normal de la pila. Fueron inventadas en 1859 por el físico francés Gastón Planté. La pila de Planté era una batería de plomo y ácido, y es la que más se utiliza en la actualidad. Su ventaja principal es que puede producir una corriente eléctrica suficiente para arrancar un motor; sin embargo, se agota rápidamente.

2.4.5 Celdas de combustible

La celda de combustible es otro tipo de pila primaria. Se diferencia de las demás en que los productos químicos no están dentro de la pila, sino que le son suministradas. Los materiales empleados para su construcción y funcionamiento representan poco o ningún impacto ecológico.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica, al igual que las pilas y las baterías en general. Sin embargo, una diferencia fundamental entre las baterías convencionales y las celdas de combustible es que estas últimas no contienen los materiales activos, es decir, no se agotan ni precisan recarga, ya que producirán una corriente eléctrica y calor, en tanto se les provea de combustible. En la práctica, la corrosión y la degradación de materiales y componentes de la celda pueden limitar su vida útil.

A medida que los reactantes son suministrados a la celda, ésta produce electricidad. En las celdas, el combustible es oxidado continuamente en uno de los electrodos (el ánodo) mientras se reduce O_2 en el otro electrodo (el cátodo). La reacción se completa con la circulación de los electrones a través del circuito externo, lo que realiza el trabajo eléctrico. Desde este punto de vista, la reacción que tiene lugar en la celda es una verdadera reacción de combustión.

La reacción más simple y limpia se lleva a cabo en una celda de combustible de H_2 y O_2 :

La reacción del ánodo es: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

La reacción del cátodo es: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

La reacción completa es: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{calor y electricidad.}$

Los electrones generados en el ánodo se mueven por un circuito externo que contiene la carga y pasan al cátodo. Los iones H^+ generados en el ánodo son conducidos por el electrolito al cátodo, donde se combinan con el O_2 y forman agua, como se esquematiza en la figura 9.

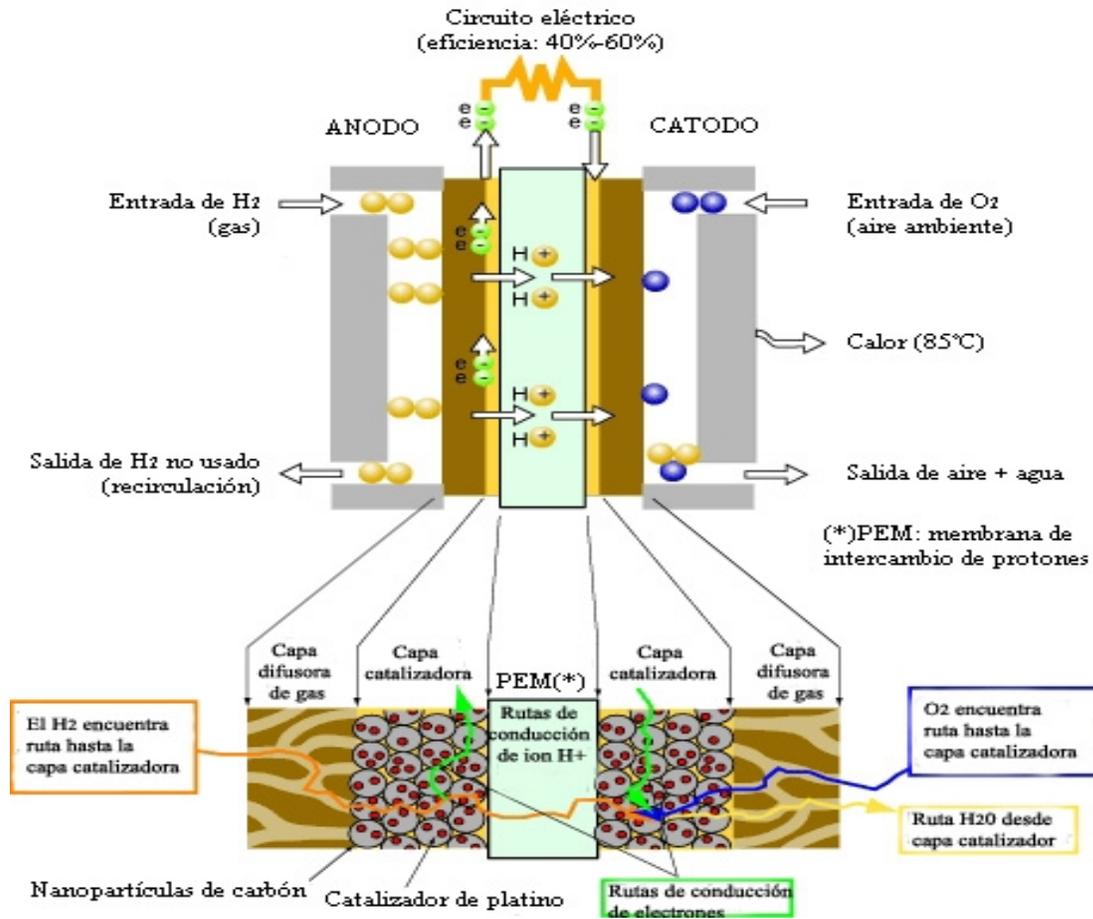


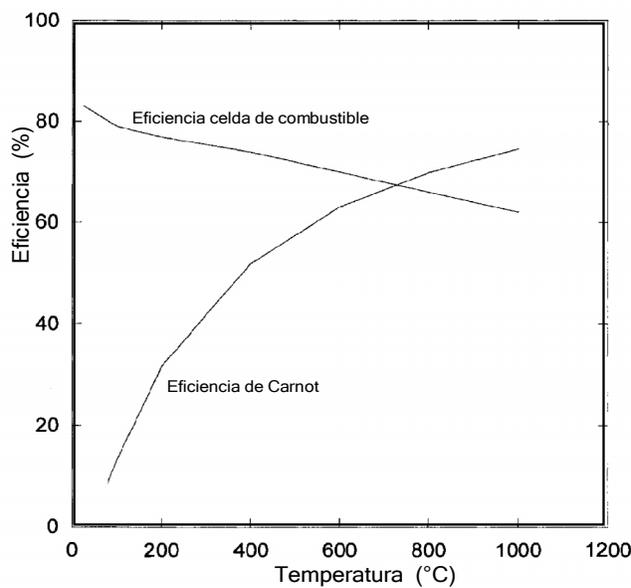
FIGURA 9. ESQUEMA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM.

La primera celda de combustible fue construida en 1839 por Sir William Robert Grove, un juez y científico Galés, pero pocos se interesaron hasta que el interés serio en las celdas de combustible como un generador práctico comenzó hasta la década de 1960, cuando el programa espacial de E.U. las eligió en lugar de la energía nuclear y la energía solar. Las celdas de combustible abastecieron de energía a las naves Apollo y Géminis, y proveían electricidad y agua a los trasbordadores espaciales.

Las celdas de combustible representan un desarrollo potencialmente revolucionario, ya que en lugar de utilizar combustión para generar corriente eléctrica, utilizan la reacción electroquímica entre el H_2 del combustible y el O_2 del aire para producir corriente eléctrica, agua y calor.

A diferencia de las máquinas de combustión cuya eficiencia está regida por el ciclo de Carnot y limitada por la temperatura, la eficiencia teórica de las celdas de combustible está dada por las leyes de Faraday, que relacionan directamente la corriente producida en una reacción electroquímica con la cantidad de material reactivo, es decir, con la cantidad de combustible. La mayor ventaja de las celdas de combustible descansa en el hecho de que su eficiencia teórica no está limitada por la temperatura, lo cual les otorga el gran beneficio de alcanzar altas eficiencias (ver figura 10).

Las leyes de la termodinámica (ciclo de Carnot) limitan la eficiencia de todas las maquinas de combustión interna. Sin flama, las celdas de combustible evitan las pérdidas de eficiencia asociadas con la ignición, quemado y transferencia de calor hacia los gases y escape.



$$\text{Eficiencia de Carnot} = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \times 100\%$$

T_C = Temperatura de salida del calor residual

T_H = Temperatura del calor disponible

$$\text{Eficiencia máxima celda de combustible} = \frac{\Delta G_f}{\Delta H_f} \times 100\%$$

ΔG_f = Energía libre de formación de H_2O a partir de H_2 y O_2

ΔH_f = Entalpía libre de formación de H_2O a partir de H_2 y O_2

$$V = \frac{\Delta G_f}{nF}$$

V = Voltaje teórico de la celda
 n = Núm. de electrones transferidos
 F = Constante de Faraday

FIGURA 10. COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE (EFICIENCIA ELECTROQUÍMICA) CON LA DE UNA MÁQUINA TÉRMICA (EFICIENCIA DE CARNOT). FUENTE: LARMINIE, DICKS, "FUEL CELLS SYSTEMS EXPLAINED" (2000)

Cada molécula de H_2 producirá dos electrones libres y junto con un átomo de O_2 reducido se generará una molécula de agua. Tal reacción electroquímica es exotérmica, por lo que además el calor desprendido puede ser utilizado y así aumentar la eficiencia de las celdas de combustible. Estas características (alta eficiencia y la ventaja de presentar cero emisiones contaminantes cuando el combustible es H_2) hacen de la tecnología de celdas de combustible una buena opción para la generación de energía eléctrica.

Las celdas de combustible ofrecen la posibilidad de utilizar casi cualquier combustible que contenga H_2 , aunque hidrocarburos como el gas natural, metanol, etanol, biogás, así como el diesel y la gasolina son los que mayor atención han recibido por razones de tipo práctico. Pero las celdas de combustible se han utilizado para promover la transición hacia fuentes renovables de energía. Así, en la práctica, las celdas de combustible ya están funcionando con gas de rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de agua, aunque cuando se emplea un combustible distinto a H_2 , se requiere un *reformador* ó procesador de combustible.

Un reformador es un dispositivo que produce H_2 a partir de cualquier material rico en H_2 , incluyendo combustibles fósiles. Existen tres diseños básicos de reformadores:

- Reformador a vapor: combinan el combustible con vapor de agua y calor para producir H_2 . El calor requerido para operar el sistema es obtenido mediante la quema de combustible ó exceso de H_2 de la salida del conjunto de celdas de combustible.
- Oxidación parcial: combinan al combustible con O_2 para producir H_2 y monóxido de carbono (CO), el cual reacciona con vapor de agua para producir más H_2 . La oxidación parcial libera calor, el cual es atrapado y usado en otras partes del sistema. Los Reformadores Auto-térmicos combinan el combustible con ambos, vapor de agua y O_2 de tal manera que la reacción está en balance respecto del calor involucrado.
- Reformación autotérmica: ofrece la mayor flexibilidad en cuanto al manejo de calor, a pesar de no estar tan desarrollada como los otros reformadores.

En general, tanto gasolina como metanol pueden ser usados en cualquiera de los tres diseños de reformador. Sin embargo, las diferencias en la naturaleza química de los combustibles pueden favorecer a un diseño sobre el otro.

Hay tres componentes principales en un sistema de celda de combustible residencial:

- El suministro de H_2 a través de una red de distribución o un reformador de combustible para generar H_2 en el lugar
- El generador de celda de combustible
- El acondicionador de potencia (convierte la corriente directa en corriente alterna, que muchos aparatos electrodomésticos utilizan para su operación)

2.4.6 Tipos de celdas de combustible

- Celdas de combustible con Membrana de Intercambio Protónico (PEM por sus siglas en inglés): usan como electrolito una membrana polimérica, con electrodos de platino (figura 11). Operan a relativamente bajas temperaturas y pueden variar su salida para diferentes demandas de potencia. Son las mejores candidatas para vehículos, para aplicaciones estacionarias y pequeñas aplicaciones portátiles.

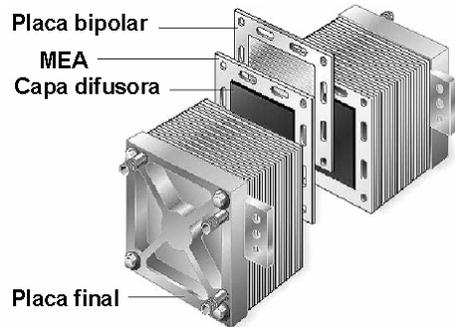


FIGURA 11. ESQUEMA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM.

FUENTE: FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO EN ARAGÓN

- Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC por sus siglas en inglés): consisten de un ánodo y un cátodo hechos de un catalizador de platino finamente disperso en una estructura de carbón y silicón que retiene el electrolito de ácido fosfórico. Puede usarse en vehículos grandes, como autobuses.
- Celdas para la Oxidación Directa de Metanol (DMFC por sus siglas en inglés): Son similares a las PEM en que utilizan como electrolito una membrana polimérica, pero un catalizador en el ánodo que toma el H₂ del metanol líquido, eliminando la necesidad de un reformador de combustible.
- Celdas de Combustible Alcalinas (AFC por sus siglas en inglés): utilizan un electrolito alcalino como hidróxido de potasio. Fue originalmente utilizada por la NASA en misiones espaciales. Los transbordadores espaciales de la NASA usan este tipo de celdas de combustible.
- Celdas de Combustible de Carbonatos Fundidos (MOFC por sus siglas en inglés): usan sales de carbonatos fundidos como electrolito. Tienen el potencial de usar como combustible gases derivados del carbón y gas natural. Pueden trabajar con una eficiencia de hasta el 60%, que puede potencialmente ascender hasta el 80% si se utiliza el calor generado para cogeneración.

- Celda de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC por sus siglas en inglés): utilizan un electrolito de cerámica sólida, como óxido de zirconio estabilizado con óxido de Itrio; opera de 800 a 1,000°C. Alcanzan eficiencias de hasta 60% y se espera que se usen para generación de electricidad y calor en la industria y tienen potencial para brindar potencia auxiliar en vehículos.

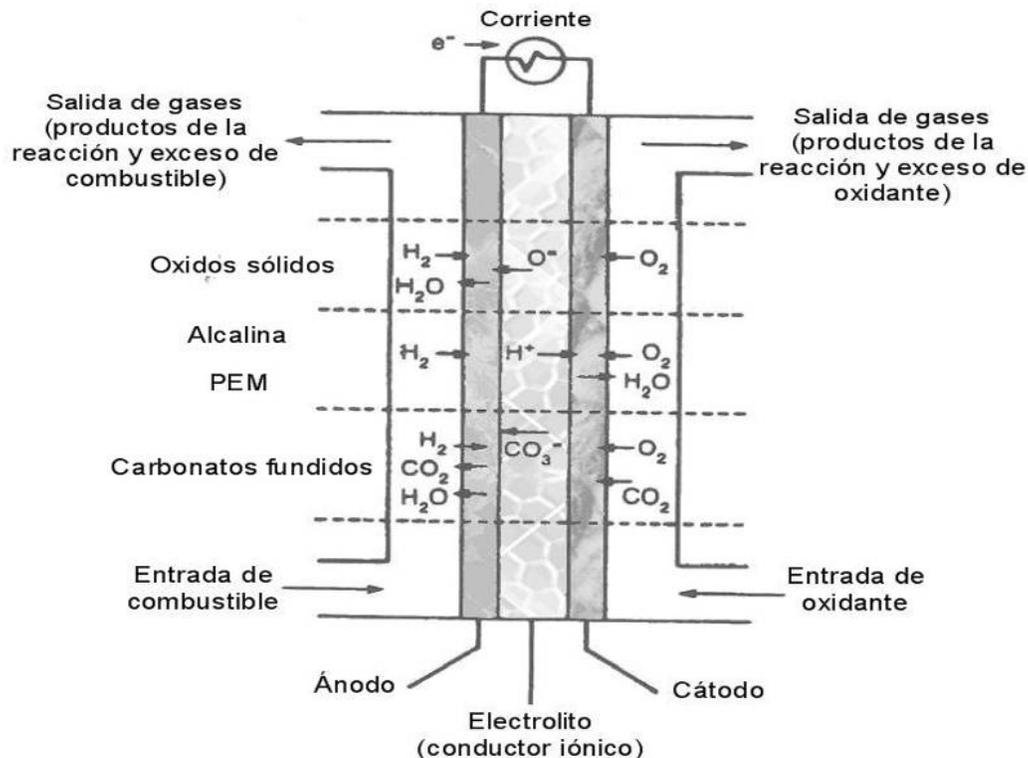


FIGURA 12. ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LAS REACCIONES ELECTROQUÍMICAS, DE ACUERDO AL TIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE

En las tablas 4 y 5 se listan algunos tipos de celdas de combustible con las características más importantes de cada una, lo que permite compararlas.

TABLA 4. COMPARACIONES DE ALGUNOS TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Tipo de celda de combustible	Membrana de intercambio protónico	Ácido fosfórico	Carbonatos fundidos	Óxidos sólidos
Portador de carga	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Catalizador	Platino	Platino	Níquel	Titanato de calcio
Material de celda	Carbón o metal	Grafito	Acero inoxidable	Cerámica
Eficiencia (%)	< 40	40 a 50	50 a 60	Más de 60

Fuente: Alan C, Lloyd. Scientific American, Julio 1999, vol. 281 (1) p. 83

TABLA 5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE ALGUNOS TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Tipo de celda de combustible	Electrolito	Temperatura de operación (°C)	Reacción	Ventajas	Desventajas
Membrana intercambio protónico (PEM)	Polímero orgánico semipermeable	60-100	ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ celda: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> • El electrolito sólido reduce la corrosión y problemas de manejo • Baja temperatura • Inicio rápido 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja temperatura requiere catalizadores costosos • Alta sensibilidad a impurezas en combustible
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio, empapado en una matriz	90-100	ánodo: $H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ celda: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> • Alto desempeño por rápida reacción en el electrolito alcalino 	<ul style="list-style-type: none"> • Es costosa la remoción de CO_2 del combustible y de la corriente de aire
Ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido, empapado en una matriz	175-200	ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ celda: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> • Hasta 85% de eficiencia por cogeneración de electricidad y calor • Puede usar H_2 con impurezas 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere catalizador de platino • Baja corriente y potencia • Gran tamaño y peso
Carbonatos fundidos (MCFC)	Solución líquida de litio, sodio y/o carbonatos de potasio, empapado en una matriz	600-1000	ánodo: $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ celda: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$ (CO_2 se consume en el cátodo y se produce en el ánodo)	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia • Flexibilidad de combustibles • Puede usar diversos catalizadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas temperaturas favorecen la corrosión y rotura de los componentes de la celda
Óxidos sólidos (SOFC)	Óxido de zirconio sólido con una pequeña cantidad de Itrio	600-1000	ánodo: $H_2 + O_2^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O_2^-$ celda: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia • Flexibilidad de combustibles • Puede usar diversos catalizadores • El electrolito sólido reduce la corrosión y problemas de manejo • Baja temperatura • Inicio rápido 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas temperaturas favorecen la corrosión y rotura de los componentes de la celda

Fuente: Argonne National Laboratory, 2004

A finales de los años 50's hubo un gran incentivo para desarrollar plantas de poder de celdas de combustible para aplicaciones terrestres y del espacio. El tiempo de desarrollo fue de aproximadamente cinco años (sorprendentemente corto para aplicaciones espaciales). La razón principal, es que el costo no es tan importante, mientras que el peso, el volumen y la confiabilidad de plantas generadoras son factores críticos. Es más, el H_2 y O_2 criogénicos son los combustibles ideales a utilizar, y desde el punto de vista electroquímico, son los mejores combustibles.

Sin embargo, para aplicaciones terrestres, las celdas de combustible deben competir técnica y económicamente con las plantas generadoras convencionales que han tenido un grado avanzado de desarrollo por más de 50 años.

Se requiere de diversas fuentes de energía para producir el H₂ (figura 13), como lo ilustra el proyecto de Transporte Urbano Limpio para Europa (CUTE por sus siglas en inglés) de la Unión Europea. Se utiliza H₂ para operar autobuses con celdas de combustible en diversas ciudades (como Amsterdam, Barcelona, Beijing, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Perth, Reykjavik) y autobuses por motores de combustión interna en Berlín.

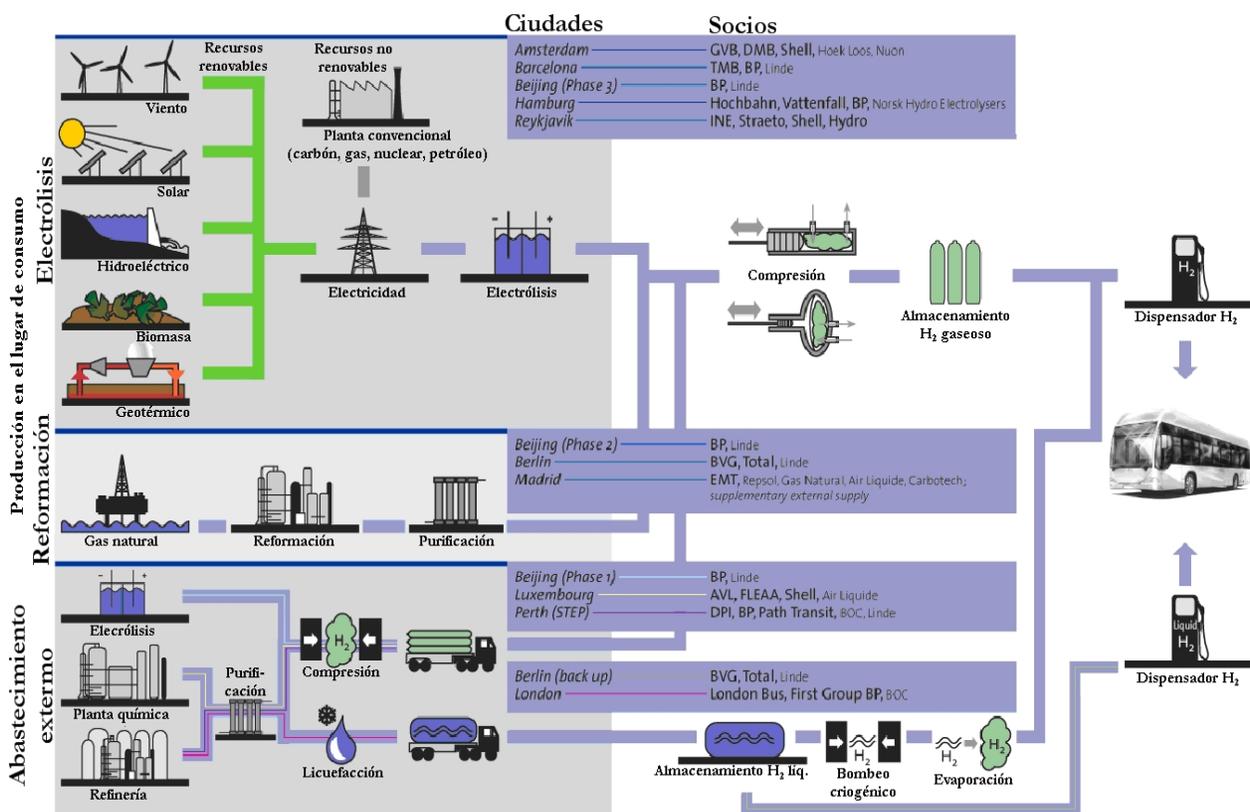


FIGURA 13. VÍAS PARA EL SUMINISTRO DE HIDRÓGENO DEL PROYECTO “HYFLEET:CUTE”

2.6 Estudios mundiales de las patentes de celdas de combustible

El análisis de patentes es una herramienta que permite encontrar indicadores de la actividad inventiva de un determinado territorio (actividades científicas y tecnológicas, tendencias tecnológicas e innovaciones potenciales), así como de la actividad comercial de interés en la entidad que se patenta (las tendencias del competidor, tendencias de mercado, cambios en el competidor, perfil tecnológico de una empresa y actividades de una compañía).

Los documentos de patentes proveen información de negocios relacionada con:

- Actividad de los competidores en cuanto a patentes
- Actividad de la competencia en productos a patentar
- Nuevas oportunidades de negocios para generar productos en países en los que no existe protección
- Detección de nuevas tecnologías en desarrollo
- Nuevas bases científicas y técnicas con las cuales partir para nuevas investigaciones
- La eliminación de la duplicidad de trabajos de investigación
- Tecnologías que han dejado de estar protegidas por patente y por ende, de dominio público

Se han llevado a cabo estudios a nivel mundial sobre la actividad de las patentes de celdas de combustible en el mundo. En el *Worldwide Fuel Cell Industry Survey 2004*, publicado por el Fuel Cell Council de E.U. (2004), participaron un total de 395 organizaciones (el total de miembros del *Consejo Estadounidense de Celdas de Combustible*, de *Celdas de Combustible Canadá*, de *Celdas de Combustible Europa* y de la *Conferencia de Comercialización de Celdas de Combustible de Japón*), a los que se les pidió proporcionar información de manera voluntaria sobre sus actividades en celdas de combustible en las áreas de perfil corporativo, ventas, gastos en I+D y empleos generados. Estos datos se combinaron previamente con información similar proporcionada por los miembros de *Celdas de Combustible Canadá* y reportados en el *Perfil del Sector de Celdas de Combustible e Hidrógeno Canadiense 2004*.

Algunos datos sobresalientes de las compañías que respondieron la encuesta son:

- El 44% son privadas.
- El 66% han estado involucradas en actividades con celdas de combustible por 10 años o menos
- El 75% reportó que tiene sus instalaciones principales de las actividades en celdas de combustible en América del Norte
- Diseñadores, fabricantes y/o proveedores conforman el 49%. Las firmas de investigación y servicios profesionales tienen el 15% cada uno.

Como se ilustra en la figura 14, Estados Unidos, Canadá, Japón y Alemania son prominentemente los países con mayor actividad en I+D y manufactura en celdas de combustible. En el mercado estacionario está enfocada casi la mitad de los entrevistados (42%), mientras que una cuarta parte (26%) está en el mercado de aplicaciones móviles: conducción de vehículos y unidades de poder auxiliares para vehículos. La tecnología PEM domina la industria con 56%, le siguen la SOFC con el 18% y la DMFC con el 10%.

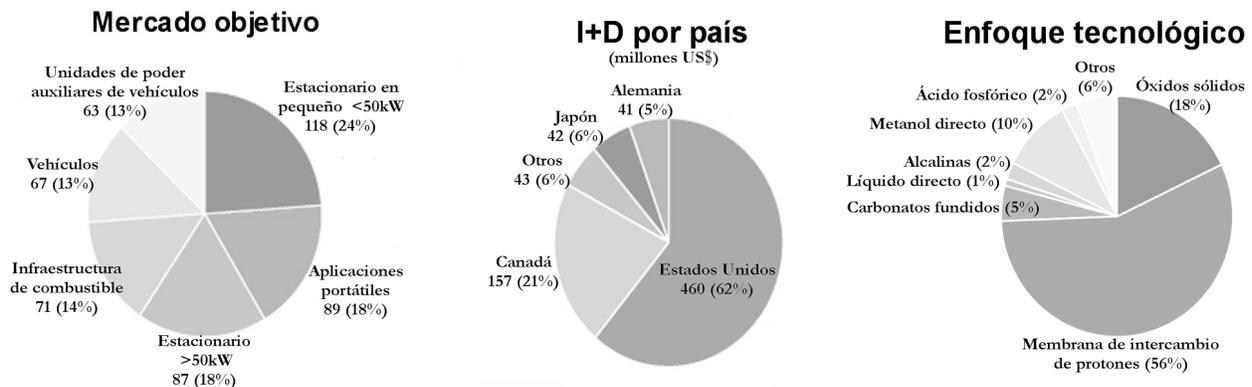


FIGURA 14. RESULTADOS ENCUESTAS MERCADO OBJETIVO, I+D POR PAÍS Y ENFOQUE TECNOLÓGICO, 2004

El 75% de los entrevistados dijeron tener sus instalaciones principales de sus actividades de celdas de combustible en América del Norte, Japón, Alemania, el Reino Unido, Francia, Holanda y Australia.

Entre otras cosas se concluyó en el estudio de que:

- Con el tiempo, el empleo en el sector transporte pasará al sector estacionario; sin embargo, se espera que ocurra esto después del 2021.
- Se espera que el sector portátil penetre en el mercado más rápidamente que los otros sectores, debido a que algunos productos para aplicaciones portátiles tienen mayor viabilidad comercial. Sin embargo, el mercado para baterías es mucho más pequeño que los mercados automotriz y estacionario.
- La industria de las celdas de combustible se encuentra en crecimiento, debido a que entre el 2002 y el 2003:
 - Las ventas aumentaron 41%, de USD\$240 millones a USD\$338 millones
 - La inversión en I+D aumentó 13% de USD\$764 millones a USD\$859 millones
 - Los empleos permanecieron relativamente constantes al pasar de 7,750 a 7,748

Para investigar las tendencias de patentes de celdas de combustible, se consultó un estudio de Thomson Scientific Ltd. (2004), que utilizó la estrategia de búsqueda *Derwent World Patents Index*® (DWPI®), la más extensa base de datos del mundo de valor agregado de documentos de patente de 40 oficinas, para ver el perfil de la investigación en celdas de combustible en un periodo de cinco años, de 1999 al 2003.

Ésta búsqueda produjo aproximadamente 11,000 registros que fueron analizados usando el software “*Derwent Analytics*™” de VantagePoint. Hay una significativa tendencia a la alza en el número de patentes publicadas en el periodo. Debido a que una invención puede ser patentada en múltiples ocasiones en diferentes oficinas de patentes, se utilizó *Basic Applications*, la primera aplicación recibida en el DWPI para cualquier invención. El incremento de 1999 al 2003 en patentes es de 360%, es decir, de unas 870 aplicaciones se incrementó a alrededor de 4,000.

La situación en 1999 fue dominada por compañías interesadas en tecnologías de celdas de combustible en general, y no en una aplicación específica. El mayor número de patentes pertenecía a compañías Japonesas (figura 15). En 1999 ya había señales de que la tecnología DMFC podía mejorar la vida de la batería tradicional para PDA’s y teléfonos móviles hasta 10 veces. La tecnología DMFC patentada en aquel entonces permitía una vida de 10 horas en sus microceldas de combustible, mientras que la de una batería ión-Litio era de 5 horas.

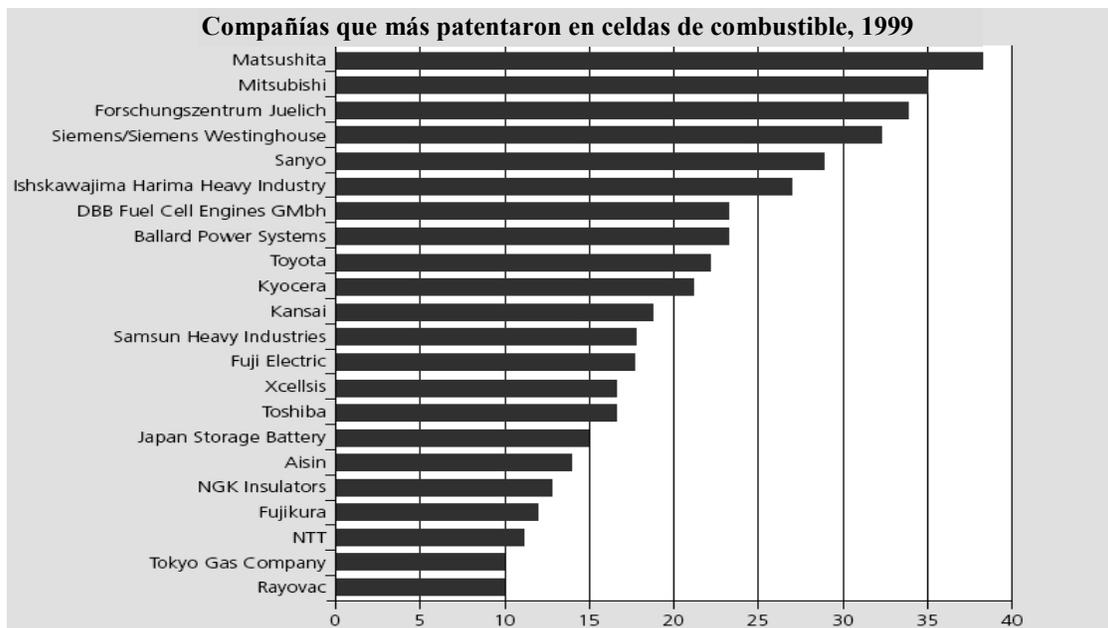


FIGURA 15. COMPAÑÍAS CON EL MAYOR NÚMERO DE PATENTES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN 1999

En el 2003, cinco de las diez primeras empresas que patentaron, son empresas automotrices como se observa en las figuras 16 y 17. Sin embargo, es más interesante el súbito auge en patentes de aplicaciones de teléfonos celulares y computadoras portátiles. El relativamente pequeño número de patentes aplicadas a la industria aeroespacial se explica principalmente por actos de secrecía y clasificación del gobierno, por lo que son inaccesibles al público.

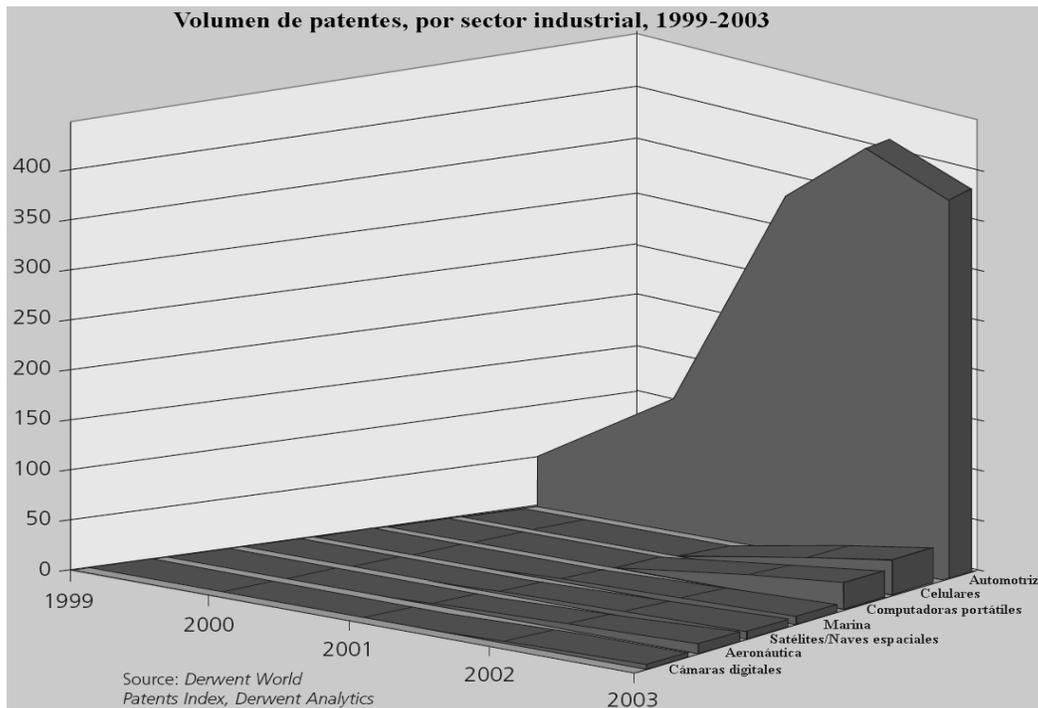


FIGURA 16. COMPAÑÍAS CON EL MAYOR NÚMERO DE PATENTES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN 2003

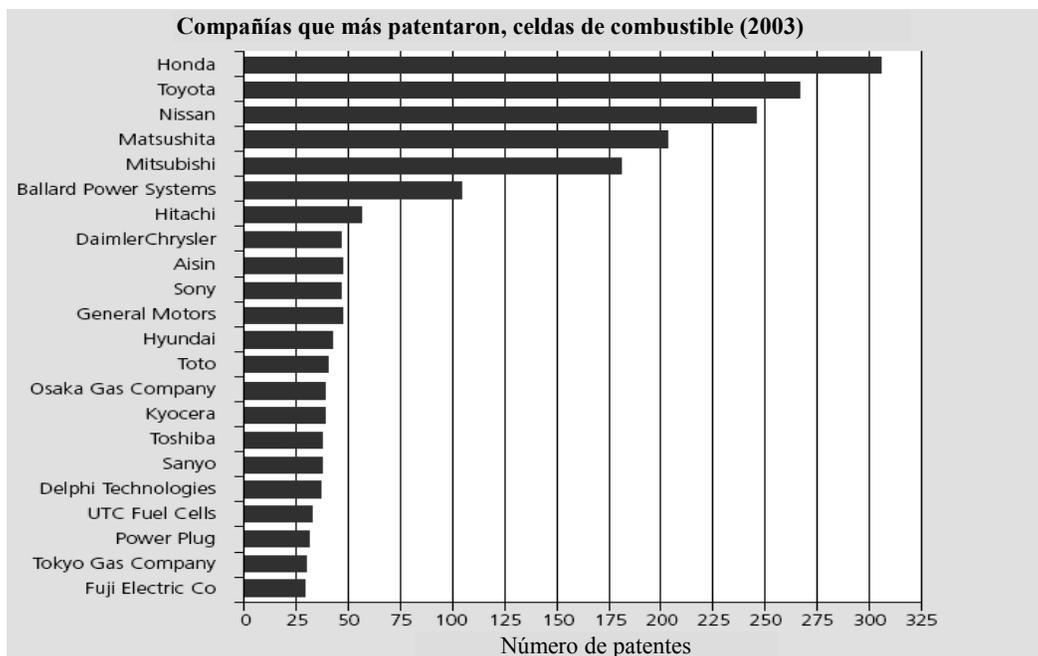


FIGURA 17. NÚMERO DE APLICACIONES DE PATENTES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE, POR SECTOR INDUSTRIAL

Fuel Cell Today's (2011), realizó un estudio sobre la actividad de patentes de celdas de combustible como parte de sus informes anuales. En su reporte se analizan tanto las patentes concedidas y solicitudes de patentes publicadas en 2010. Ya que las patentes solo se conceden si cumplen con el requisito de “novedad”, el crecimiento de patentes concedidas refleja niveles sustanciales de innovación en la tecnología de celdas de combustible del 2000 al 2010.

La actividad en las patentes indica confianza en la industria y se espera que se asiente en un patrón de crecimiento estable y sostenible: la industria se desarrolla con un rápido progreso tecnológico y se mueve hacia la plena comercialización, ya que una patente solo puede conservarse si es empleada para producir ganancias. El número de patentes concedidas aumentó en un 347%, pasando de 403 en 2000 a 1,801 en 2010 (figura 18).

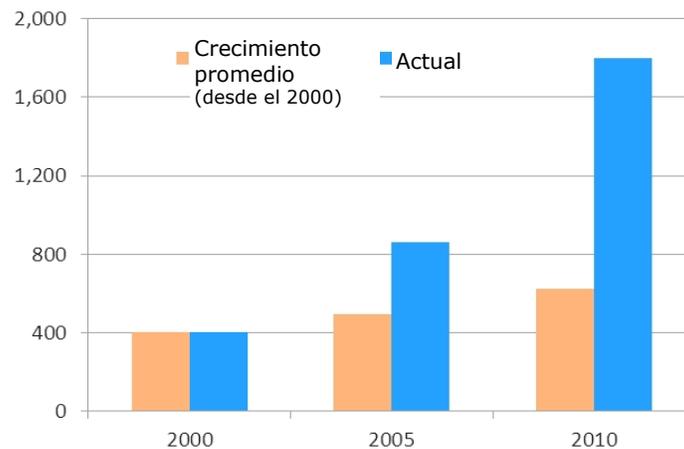


FIGURA 18. CRECIMIENTO EN EL NÚMERO DE PATENTES CONCEDIDAS Y NÚMERO DE PATENTES CONCEDIDAS POR AÑO
FUENTE: FUEL CELL TODAY'S "THE 2011 FUEL CELL PATENT REVIEW", 2011

TABLA 6. PROYECCIÓN DE PATENTES CONCEDIDAS Y APLICACIONES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE, EMPLEANDO EL CRECIMIENTO ANUAL.

Año	% crecimiento general en patentes concedidas	Estimado de patentes concedidas	Patentes concedidas	% crecimiento general en aplicaciones	Estimado de aplicaciones	Aplicaciones
2000	-	-	403	-	-	1,516
2001	4	419	-	5.9	1,605	-
2002	3.8	435	-	-0.1	1,604	-
2003	10.6	481	-	3	1,652	-
2004	1.6	489	-	5.3	1,740	-
2005	1.1	494	861	8.1	1,881	4,051
2006	19.5	591	-	5.7	1,988	-
2007	2.5	605	-	4	2,068	-
2008	0.6	609	-	2.6	2,121	-
2009	1.5	618	-	-2.7	2,065	-
2010	1.5	627	1,801	0	2,065	3,561

FUENTE: FUEL CELL TODAY'S "THE 2011 FUEL CELL PATENT REVIEW", 2011

La OCDE documentó un aumento significativo en propiedad intelectual “verde” desde 1999 al 2008, con el incremento de patentes en energía renovable (OCDE, 2011). La tecnología de celdas de combustible muestra mayor actividad en el número de patentes por encima del resto de las tecnologías para energías limpias (figura 19).

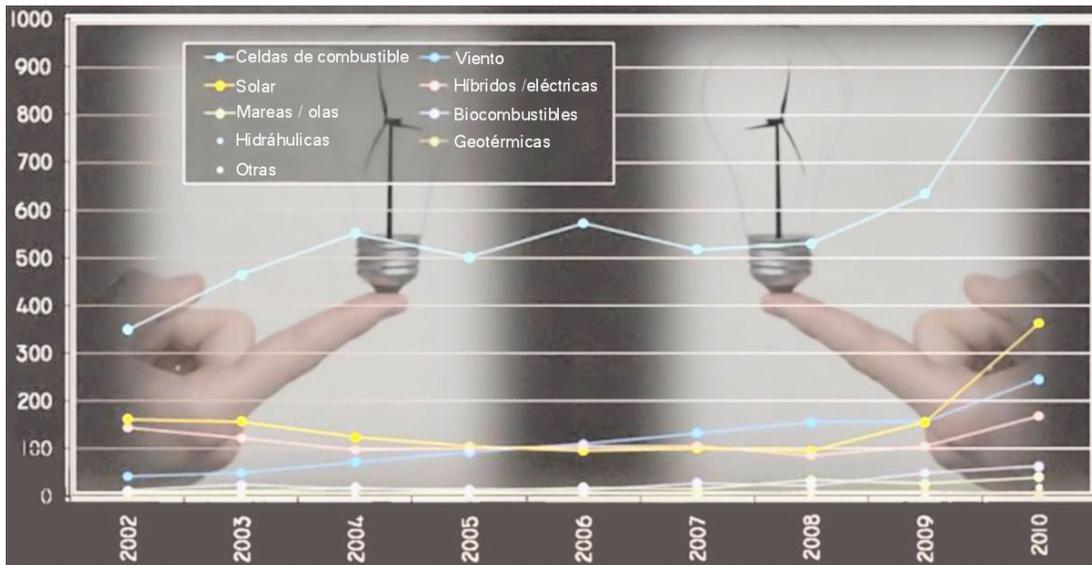


FIGURA 19. NÚMERO DE PATENTES PARA ENERGÍAS LIMPIAS A NIVEL MUNDIAL.
 FUENTE: “FUEL CELLS FOR DISTRIBUTED GENERATION”, DOE, 2011

CAPÍTULO 3 OBSTÁCULOS Y ELEMENTOS DE RUPTURA TECNOLÓGICA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las preocupaciones energéticas y ambientales, y los avances científicos de las últimas décadas han llevado a las celdas de combustible a la vanguardia de la agenda energética. Las principales fuerzas de mercado que pueden impulsar a las celdas de combustible son: el suministro, la seguridad e independencia de la energía, así como el cambio climático y la calidad del aire. Para que la economía del H₂ pueda convertirse en una realidad, deben ser superadas tres barreras principales [DOE, 2004]:

- La tecnología de las celdas de combustible requiere superar diversos obstáculos para que sea competitiva.
- Demostrarse que el mercado del H₂ es económicamente competitivo.
- Construir la infraestructura que proporcione la transición desde la producción hasta el almacenamiento de H₂.

El H₂ todavía no es suficientemente atractivo en costo, rendimiento y fiabilidad para desplazar a la tecnología convencional existente para la generación de energía estacionaria, para el transporte automotor y como reemplazo de la batería de dispositivos electrónicos personales. Por otro lado, la infraestructura necesaria para implementar el H₂ como portador de energía primaria es equivalente a la ya existente para la producción y uso de combustibles fósiles y la electricidad.

El entonces secretario de energía del DOE de E.U., Spencer Abraham (2003), mencionó lo siguiente: “La brecha entre la tecnología actual y la viabilidad comercial es enorme. Para ser económicamente competitivo con la economía de los combustibles fósiles actuales, deben reducirse el costo de las celdas de combustible y el costo de producción de H₂, así como aumentar el rendimiento y la fiabilidad. Cerrar la brecha no sólo requiere una ingeniería creativa, sino también revolucionarios avances conceptuales en la comprensión y el control de los procesos físicos y químicos que gobiernan la interacción del H₂ con los materiales. Estos avances sólo pueden provenir de una amplia investigación básica centrada en el comportamiento del H₂ a nivel atómico, la explotación de los avances en la capacidad de síntesis de materiales, de las herramientas de vanguardia en la caracterización y el modelado. Se debe trabajar en grupos interdisciplinarios para encontrar soluciones innovadoras a los problemas fundamentales de la producción, almacenamiento y uso del H₂”.

3.1 ¿Qué haría posible la comercialización de las Celdas de Combustible?

Los objetivos varían de acuerdo a la aplicación que se le quiera dar a la celda de combustible. El tipo de celda de combustible a seleccionar, se establece por su costo, su eficiencia, durabilidad, densidad de poder, tiempo de respuesta, tiempo de arranque, emisiones, entre otras.

En general, para que las celdas de combustible sean comercialmente viables deben:

- Cumplir con la durabilidad y los requisitos de desempeño en comparación con las tecnologías afines, como baterías y máquinas de combustión interna. La densidad de poder es importante para minimizar el peso y el volumen que determinan los sistemas que rodean a la celda.
- El costo de construcción debe reducirse para que sea competitivo con tecnologías afines.
- Mejorar las características (eficiencia, seguridad, almacenamiento) del combustible. Deben realizarse las inversiones en infraestructura para apoyar la introducción a gran escala de las celdas de combustible.
- La aceptación pública debe afianzarse para asegurar la demanda para esta tecnología.

En general, las mayores áreas de actividad para el desarrollo de la tecnología de las celdas de combustible son:

- Mejorar los sistemas de almacenamiento del H₂
- Superar las barreras de costo, durabilidad y tiempo de arranque
- Mejorar el uso y recuperación del calor para cogeneración
- Desarrollo de procesadores de combustible y catalizadores que se adapten a diversos combustibles como metano, etanol, gas natural, propano y diesel para producir y utilizar H₂
- Validación de la tecnología: integración de sistemas en el mundo real y obtener experiencia en la seguridad

Se esperan grandes reducciones en el costo según se incremente la tasa de producción, pero algunos aspectos del tamaño de las reducciones permanecen en discusión. Es importante decir que la tecnología de celdas de combustible todavía tiene un largo camino por recorrer antes de aproximarse a sus precios proyectados como objetivo. Un listado del análisis de obstáculos y beneficios que presentan las celdas de combustible para llegar al mercado realizado por Johnston et al. (2005), se muestra en la tabla 7.

TABLA 7. ANÁLISIS PARA QUE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE LLEGUEN AL MERCADO.

FUENTE: B. JOHNSTON ET AL. TECHNOVATION 25, 2005

Obstáculos	Beneficios
<p><i>Eficiencia</i> Si se emplea un reformador para producir H₂, la eficiencia se reduce de 30 a 40% en comparación con un 80% si se emplea H₂ puro. La eficiencia de los motores de combustión interna a gasolina oscila entre 10% y 16%</p> <p><i>Tamaño y espacio</i> Cuanto más grande y pesada sea la celda de combustible menor el rendimiento del vehículo.</p> <p><i>Mantenimiento</i> La comercialización en masa de las celdas de combustible requiere de técnicos capacitados para proporcionar el servicio a las celdas, además de las herramientas necesarias para llevar a cabo los trabajos de mantenimiento</p> <p><i>Costo</i> El costo de energía empleada por un vehículo con celdas de combustible (KW/Km) debe ser comparable al de gasolina por Km de un vehículo de combustión interna</p> <p><i>Durabilidad</i> La durabilidad de las celdas de combustible es limitada</p> <p><i>Aceptación Publica</i> Será lenta debido a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La percepción de los problemas de seguridad • El deseo de no renunciar a la comodidad de los motores de combustión interna • Incredulidad de que el daño al medio ambiente pueda ser revertido <p><i>Estandarización</i> Alcanzar acuerdos sobre las normas de celdas de combustible. La falta de normas de fabricación, manejo, seguridad, etc. podría dar lugar a dificultades en el desarrollo de una estructura de apoyo uniforme.</p>	<p><i>Eficiencia</i> Las celdas de combustible que utilizan reformadores son de un 30 a 40% más eficientes que los motores de combustión interna. El factor puede variar dependiendo del combustible</p> <p><i>Partes móviles y ruido</i> Las celdas de combustible no contiene partes móviles, lo que ocasiona que operen sin hacer ruido y bajo costo de mantenimiento</p> <p><i>Respuesta</i> Las celdas de combustible responden de manera casi inmediata</p> <p><i>Emisiones</i> La única emisión es agua.</p> <p><i>Independencia</i> Ofrece una ruta para la independencia energética global y esperanza para países subdesarrollados</p> <p><i>Múltiples fuentes de energía</i> El H₂ puede producirse empleando múltiples fuentes de energía, siendo las fuentes renovables las más atractivas</p>

3.2 Elementos conductores para la ruptura tecnológica de las celdas de combustible

Según un estudio de negocios realizado por *Fuel Cells 2000* (2010), los beneficios que ofrece la tecnología de celdas de combustible son:

- Ahorro en los costos por alta eficiencia en general
- Energía confiable y de alta calidad
- Incremento de la productividad

- No dependiente de la red de suministro eléctrico
- Instalación flexible, modular y con escalabilidad
- Flexibilidad del combustible: operación con combustible convencional o renovable
- Operación silenciosa y menor impacto en el terreno y visual: sortear los síndromes *NYMBY* (por su significado en inglés “*Not In My BackYard*”: no en mi patio) y *BANANA* (por su significado en inglés “*Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anybody*”: construir absolutamente nada, en ningún lugar cerca de nadie)
- Confiable, de poco peso y resistente
- Poca o ninguna emisión al ambiente
- Puede emplearse con o sin baterías y generadores diesel
- Puede asociarse con tecnologías renovables como las de energía solar y eólica

3.2.1 Eficiencia

Al hablar de eficiencia energética, se debe observar el rendimiento de todos los procesos involucrados. Así, para los vehículos podemos identificar tres formas de medir la eficiencia:

- *Tanque-a-ruedas*: la eficiencia para transformar la energía potencial del combustible en energía cinética, desde el tanque de almacenamiento del combustible hasta las ruedas
- *Pozo-a-tanque*: la eficiencia de los procesos involucrados desde la extracción del combustible (un pozo en el caso del petróleo) hasta llegar al tanque de combustible de un vehículo
- *Pozo-a-ruedas*: la eficiencia de los procesos involucrados desde la extracción del combustible hasta que éste se consume para transformarse en energía cinética en las ruedas

La eficiencia total real de un vehículo, está determinada por la eficiencia pozo-a-ruedas. Los vehículos eléctricos con baterías demuestran la importancia de observar la eficiencia pozo-a-ruedas, ya que no hay conversión de energía a bordo del vehículo. Toyota ha mostrado su vehículo eléctrico con una eficiencia del 80%, el doble de los FCV's. Si se toma en cuenta la eficiencia del 26% pozo-a-tanque y las eficiencias asociadas a la carga de las baterías, la eficiencia global pozo-a-ruedas es del 21% (mejor que los autos convencionales de hoy, pero no tan eficientes como los FCV).

Aún hoy, con la generación y distribución de combustibles alternos en su inicio, los FCVs tienen mayores eficiencias pozo-a-ruedas que cualquier otro tipo de vehículo, incluyendo los autos con motores de combustión interna (ICE por sus siglas en inglés) y autos híbridos con baterías (figura 20).

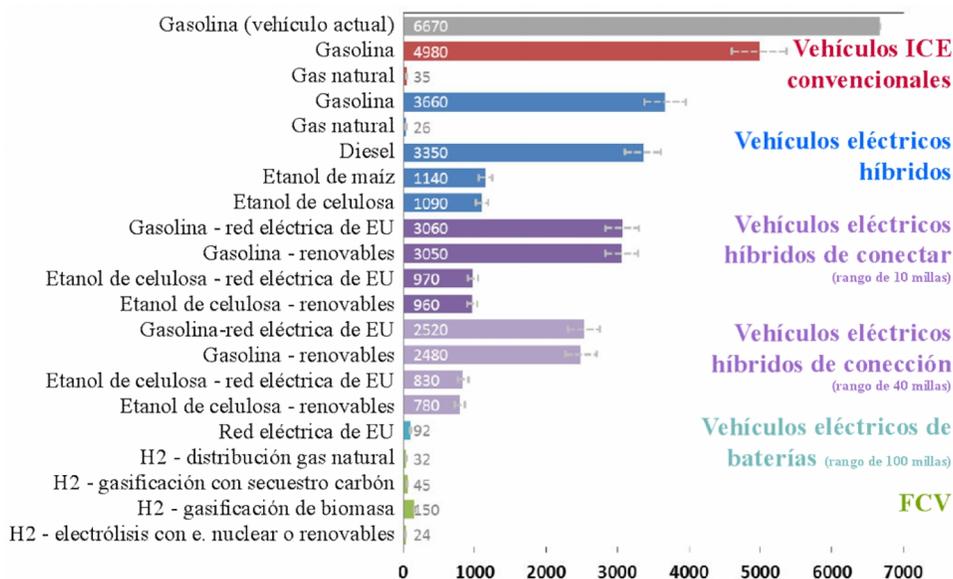


FIGURA 20: USO DE ENERGÍA PROVENIENTE DEL PETRÓLEO POZO-A-RUEDAS PARA FUTUROS VEHÍCULOS UTILITARIOS MEDIANOS Y LIGEROS EN BTU/MILLA (1BTU = 1055J, 1MILLA = 1.6KM). FUENTE: DOE, 2010

La compañía General Motors (GM) realizó estudios pozo-a-ruedas, pozo-a-tanque y tanque-a-ruedas en Norteamérica [GM, 2001] y Europa [GM, 2002]. Estos estudios revelaron que vehículos dotados de celda de combustible con H₂ son la combinación más eficiente de combustible y sistema de propulsión en el largo plazo, ofreciendo además vehículos con cero emisiones en el escape y mayor eficiencia pozo-a-ruedas que otros vehículos. Los prototipos de FCV también tienen un futuro promisorio a largo plazo en términos de reducción de peso, tamaño y costos para hacerlos más competitivos con los actuales autos ICE.

Como ya se discutió anteriormente, el H₂ tiene la ventaja de la mayor variedad de vías de producción y suministro como combustible, desde la perspectiva pozo-a-tanque y la mayor eficiencia al emplearse en sistemas de propulsión con celdas de combustible, desde la perspectiva tanque-a-ruedas. El análisis pozo-a-ruedas muestra que el H₂ producido a partir de recursos renovables, en combinación con sistemas de propulsión de celdas de combustible, ofrece una estrategia efectiva para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la diversidad de suministro de combustible.

3.2.2 Tiempo de respuesta, capacidad de reacción y calidad de la electricidad

Los sistemas de celdas de combustible pueden seguir cambios en cargas de poder con precisión y sin pérdidas económicas, a causa de su curva de *densidad de corriente – voltaje* relativamente llana (figura 21). Los sistemas de celdas de combustible generalmente se diseñan para que operen a la más alta eficiencia consistente con la meta económica (el costo de la energía).

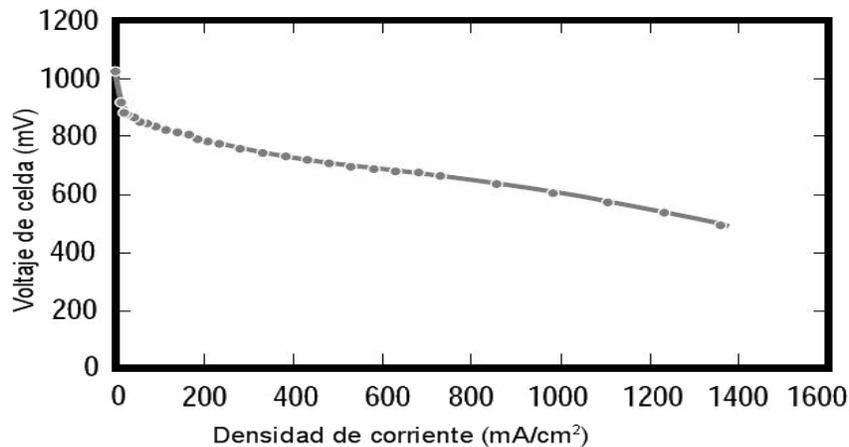


FIGURA 21. CURVA VOLTAJE–DENSIDAD DE CORRIENTE DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM
FUENTE: THOMAS ET AL. “FUEL CELLS: GREEN POWER”, DOE (1999)

Además de su eficiencia relativamente constante sobre de una amplia gama de condiciones de operación, un sistema de celdas de combustible también tiene una respuesta reactiva de poder muy rápida, que permite eliminar la necesidad de operar en un modo de reserva con maquinaria en movimiento (un motor en ralentí, por ejemplo, un vehículo detenido en el tráfico o en un semáforo). La reserva puede proporcionarse casi instantáneamente por el poco tiempo de reacción de la celda de combustible.

Las celdas de combustible conectadas en red proporcionan otras ventajas, ya que pueden reaccionar a cambios bruscos en las condiciones del sistema, como puede ocurrir en tormentas eléctricas. De manera similar, si un corto circuito ocurre en parte de un arreglo de celdas de combustible conectadas en serie, la corriente del cortocircuito se limitará. Esta característica de este tipo de generador puede habilitar un sistema que contiene un número significativo de celdas de combustible para sobrevivir mejor a caídas de transmisión en forma de cascada, perturbaciones de voltaje, y la regulación de frecuencia asociada que frecuentemente llevaron a grandes cortes de energía en el pasado.

Las celdas de combustible pueden producir corriente eléctrica de alta calidad, lo cual es extremadamente importante para el funcionamiento de aplicaciones críticas, como en centros de datos y para operaciones bancarias. Estos negocios requieren un suministro de energía eléctrica libre de fluctuaciones, picos y cortes que puedan detener transacciones, que pueden ocasionar pérdidas por varios millones de dólares por hora: el Laboratorio Nacional *Lawrence Berkeley* (2005) realizó un estudio en que estima un costo anual de USD\$80,000 millones por interrupciones en el suministro eléctrico, mientras que el Laboratorio Nacional *Pacific Northwest* (2002) encontró que el costo por interrupciones eléctricas era de unos USD\$6.5 millones/hr por transacciones inconclusas y USD\$2.5 millones por operaciones con tarjetas de crédito.

3.2.3 Flexibilidad: instalación, modularidad, escalabilidad, ubicación

Los arreglos de celdas de combustible son modulares. En principio, se pueden construir en unidades tan pequeñas según se requiera y el sistema que con ellas se ensamble puede tomar cualquier tamaño, aunque con ciertas limitaciones: se les debe suministrar el combustible y los productos de reacción deben eliminarse, aunado a que las celdas de combustible deben encontrarse en un rango óptimo limitado de temperaturas de operación. Así, los factores determinantes son: las condiciones de operación, la flexibilidad deseada y los costos de los sistemas auxiliares.

Un arreglo de celdas de combustible tiene una eficiencia altamente dependiente de su tamaño, pero su costo por kW es casi independiente del tamaño. Las economías de escala en grandes plantas se pueden compensar por economías de producción en masa en pequeñas unidades. De manera similar, una planta completa de celdas de combustible consistente de varias unidades diferentes (procesadoras de combustible, unidades de poder, acondicionadores de poder, etc.) permiten cierta redundancia en las funciones (lo que permite incrementar la disponibilidad del conjunto de unidades).

Se pueden disponer en módulos compactos separados en una unidad de un tamaño predeterminado y que puede ser fabricado individualmente, lo que permite que si no hay mucho espacio para una gran planta, se puedan interconectar plantas más pequeñas para satisfacer grandes requerimientos.

Para construir grandes plantas de producción de corriente eléctrica, no es necesario contar con enormes fábricas, equipos y laboratorios; basta con la infraestructura para producir cierto número de unidades idénticas de celdas de combustible, lo que disminuye los riesgos técnicos y los costos de capital. Lo anterior, aunado a los bajos requerimientos de mantenimiento, permite que las plantas de poder de celdas de combustible se puedan ubicar en lugares remotos, relativamente inaccesibles y muy cerca del consumidor, lo que permite no solo la reducción de pérdidas de energía en la transmisión y distribución, sino también que el centro de control esté muy cerca del usuario.

Las “emisiones visuales” se deben considerar para cualquier generador utilizado en un terreno de alta plusvalía y regulado de manera estricta por leyes locales. Con niveles de ruido significativamente menores que el entorno urbano y sin necesidad de chimeneas o torres de enfriamiento, es posible mantener un sistema generador de energía de bajo perfil entre construcciones (figuras 21 y 22) o bajo tierra.



FIGURA 21. CELDA DE COMBUSTIBLE DE 400 kW. PROPORCIONA EL 85% DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE UN SUPERMERCADO. SU USO REDUCE SUS EMISIONES DE CARBONO EN 71 TONELADAS Y AHORRA MÁS DE 4 MILLONES DE GALONES DE AGUA AL AÑO (FOTO TOMADA DEL SUMARIO EJECUTIVO DEL “NEW YORK STATE CLIMATE ACTION PLAN INTERIM REPORT”). FUENTE: “FUEL CELLS FOR DISTRIBUTED GENERATION”, DOE, 2011



FIGURA 22. CELDA DE COMBUSTIBLE EN DEER PARK, NEW YORK.
FUENTE: “THE BUSINESS CASE FOR FUEL CELLS”, FUEL CELLS 2000 (2010)

Con la posible excepción de los generadores fotovoltaicos (fuera de la vista al estar instalados en los techos), un sistema generador de celdas de combustible es probablemente el único tipo de planta de poder que se puede localizar sin intrusiones en áreas residenciales, comerciales e incluso centros históricos, como resultado de sus bajas (e incluso nulas) emisiones químicas, térmicas y acústicas, con un bajo impacto visual.

Los síndromes NIMBY y BANANA son cada más comunes a nivel mundial. Es urgente involucrar a los científicos sociales para que descifren este paradigma entre el bien común y el bien personal, para encontrar soluciones adecuadas a esta problemática [SENER, 2005]. En este contexto, las celdas de combustible se perfilan como una de las posibles soluciones.

3.2.4 Confiabilidad y duración

Las celdas de combustible del programa espacial de la NASA tienen una confiabilidad superior al 95% bajo condiciones severas en vuelos espaciales [DOE, 1997]. La confiabilidad se debe a la modularidad, a la falta de partes móviles y su fácil mantenimiento aún bajo condiciones extremas. El paro y arranque de una planta de celdas de combustible son procedimientos especializados pero que pueden ser automatizados y se pueden llevar a cabo de manera remota.

El diseño modular permite que se puedan reemplazar módulos completos, lo que lleva a un uso más económico de lo que sería manejar unidades por separado, minimiza además las pérdidas de salida y hace que una planta pueda ser operada a toda potencia durante los periodos de mantenimiento de rutina. Solo será necesario parar parcialmente la planta en caso de que se presente alguna falla. Debido a que los módulos son repetitivos, se espera que los problemas que puedan surgir fueran similares y del mismo tipo, lo que permite que se pueda contar rápidamente con personal altamente calificado. Las pruebas se pueden realizar sobre una base repetitiva, que permite la retroalimentación de cualquier problema potencial de manufactura y diseño.

Las celdas de combustible ofrecen mayor tiempo de operación y de manera más confiable, tienen menores requerimientos de mantenimiento, mantienen un voltaje estable y son más durables en ambientes difíciles [Mahadevan, 2008].

Los desastres naturales (como huracanes) causan fluctuaciones e interrupciones en la red eléctrica, por lo que existe la necesidad de mejorar la confiabilidad del suministro de electricidad a través de dicha red o de los sistemas de respaldo de baterías. El estudio “*Identification and Characterization of Near-Term Direct Hydrogen Proton Exchange Membrane Fuel Cell Markets*” [Mahadevan et al, 2007], identifica oportunidades de mercado para las celdas de combustible en aplicaciones de respaldo para agencias de respuesta a emergencias. El estudio reporta que el ciclo de vida de las celdas de combustible ofrece menores costos que las baterías para aplicaciones de menos de 5 kW para largos tiempos de respaldo.

El reporte “*Switch Signals: Fuel Cells in Distributed Telecom Backup*” realizado por Citigroup (2005), muestra que las celdas de combustible son de un 12 a un 18% menos costosas que las baterías para soluciones de respaldo de energía, basados en una vida útil de 10 a 15 años y un ciclo de reemplazo de las baterías de 5 años, sin contar créditos a impuestos que puedan existir por la promoción de energías “verdes”.

La durabilidad de un FCV ha mejorado dramáticamente. De acuerdo al DOE de EU (2009), las proyecciones de la duración de las celdas de combustible en los caminos ha mejorado de 950 horas en 2006 a 1900 horas en 2008. En otro reporte del DOE (2011), se menciona la duración de 2500 horas (120,000 km) de los sistemas de FCV al operar en condiciones reales, con menos de un 10% de degradación. El objetivo del programa del DOE es llegar a las 5000 horas de duración en el 2015, equivalentes a conducir 240,000 km.

3.2.5 Seguridad

Una planta de celdas de combustible es tanto o más segura que una central que utiliza carbón o hidrocarburos, debido a que la posibilidad de un desastre es mínima como resultado de fallas en los sistemas o materiales, negligencia e incluso, sabotaje o actos de guerra. Los sistemas distribuidos generan energía de manera dispersa, lo que siempre será más seguro e inherentemente más confiable que la generación centralizada. La protección ante cualquier eventualidad con el H₂ es relativamente más sencilla.

3.2.5 Oportunidades comerciales y validación de la tecnología.

Hasta hace relativamente poco tiempo, se asumía que la responsabilidad de las empresas era únicamente generar utilidades. Actualmente, esta concepción no es suficiente ni aceptable. Además de generar utilidades para sus accionistas, la empresa debe tomar en cuenta que sus actividades afectan, positiva o negativamente, la calidad de vida de sus empleados y de las comunidades en las que realiza sus operaciones. Para que una empresa actúe con responsabilidad social, desde una perspectiva sistémica y amplia, es necesario que ese concepto sea incorporado a sus procesos de gestión y, por lo tanto, que pase a formar parte integral de sus estrategias de negocio y de su sistema de planeación interna. Aunque la responsabilidad social empresarial es inherente a la empresa, recientemente se ha convertido en una nueva forma de gestión y de hacer negocios, en la cual la empresa se ocupa de que sus operaciones sean sustentables en lo económico, lo social y lo ambiental, reconociendo los intereses de los distintos grupos con los que se relaciona y buscando la preservación del medio ambiente y la sustentabilidad de las generaciones futuras [Cajiga, 2009].

Realizar prácticas de uso responsable y “verde” de la energía, y mediante el empleo de procesos “verdes” para fabricar productos “verdes”, beneficia al planeta y a las futuras generaciones, además de proporcionarle beneficios a las empresas cuyos resultados son apreciables y cuantificables. Los esfuerzos basados en la sustentabilidad ofrecen recompensas como ahorros en los costos de operación, incremento de productividad, mayor competitividad, menores costos en la energía, así como la atracción de nuevos clientes e incrementar la lealtad de los ya existentes. Cada uno de estos aspectos impacta en la rentabilidad de las empresas. Diversas encuestas muestran que *las decisiones de 2 de cada 3 consumidores están influenciadas por los valores ambientales de las empresas* [Wills, 2009], lo que les brinda una posición de competitividad.

El hotel Sheraton de San Diego (figura 23) emplea celdas de combustible para proveer del 60 al 80% de sus requerimientos de energía eléctrica y complementa el suministro de agua caliente. El hotel estima que más de 1,000 cuartos fueron reservados durante el 2007 por el interés en el sistema de celdas de combustible y por la reputación de la compañía por sus prácticas ambientalmente amigables [FuelCell Energy, 2008].



FIGURA 23: HOTEL SHERATON DE SAN DIEGO: CELDAS DE COMBUSTIBLE “LIMPIAS Y CALLADAS” LOCALIZADAS JUNTO A LAS CANCHAS DE TENIS DEL HOTEL. FUENTE: FUELCELL ENERGY, 2008.

En el reporte “The Business Case for Fuel Cells” [FuelCells2000, 2011], 38 compañías y corporaciones reconocidas (11 están en la lista *Fortune 500*) han desarrollado proyectos y/o demostraciones basados en celdas de combustible. Las 38 compañías han ordenado, instalado o desplegado:

- Más de 1,000 montacargas con celdas de combustible
- 58 sistemas estacionarios de celdas de combustible, para un total de 14.916 MW
- Más de 600 celdas de combustible para sus espacios de telecomunicaciones

Algunos ahorros notables reportados por las compañías incluyen:

- Más de USD\$2 millones al año en costos de electricidad mediante el uso de plantas de celdas de combustible de 4.2 MW (6 compañías)
- USD\$700,000 al año en costos de seguros y mano de obra (3 compañías)
- 43,122 ton de emisiones de carbono al año (20 compañías)
- 35 horas al día que el personal empleaba en las recargas de las baterías de los montacargas, lo que permitió la reasignación de 6 a 7 empleados a otras tareas (Nissan Norteamérica).

Las celdas de combustible ya se están probando en muchas aplicaciones y encontrando espacios de comercialización en los mercados:

- De dispositivos portátiles. Mercados militares, electrónica para el consumidor, unidades de poder auxiliares.

- De vehículos. Autos, autobuses, camiones, equipo para el manejo de materiales, transbordadores, carritos de golf, sillas de ruedas, bicicletas, motocicletas, patinetas, submarinos, aviones, trenes, vehículos de minería, vehículos militares todo-terreno, vehículos no tripulados. En septiembre de 2009, los vehículos con celdas de combustible del programa de General Motors, sobrepasaron los 1.6 millones de km de conducción en el mundo real.
- Estacionario. Hospitales, hoteles, instalaciones municipales, centros de datos, plantas de tratamiento de aguas, escuelas, estaciones de policía, establecimientos de producción de alimentos, antenas de telefonía celular, torres del número de emergencia 911, aeropuertos.

Para consultar una lista completa de instalaciones y vehículos de demostración que operan con celdas de combustible, se puede consultar: www.fuelcells.org/info/databasefront.html

3.2.6 Costos

Según análisis llevados a cabo para el DOE de E.U., en el 2010 se tiene un costo de USD\$51/kW al emplear celdas de combustible tipo PEM, producidas por volumen (500,000 unidades por año), lo que representa una disminución de 30% respecto al costo en el 2008 y un 81% respecto al costo en 2002 [DOE, 2010], como se observa en las figuras 24 y 25. Las suposiciones del análisis se enlistan en la tabla 8.

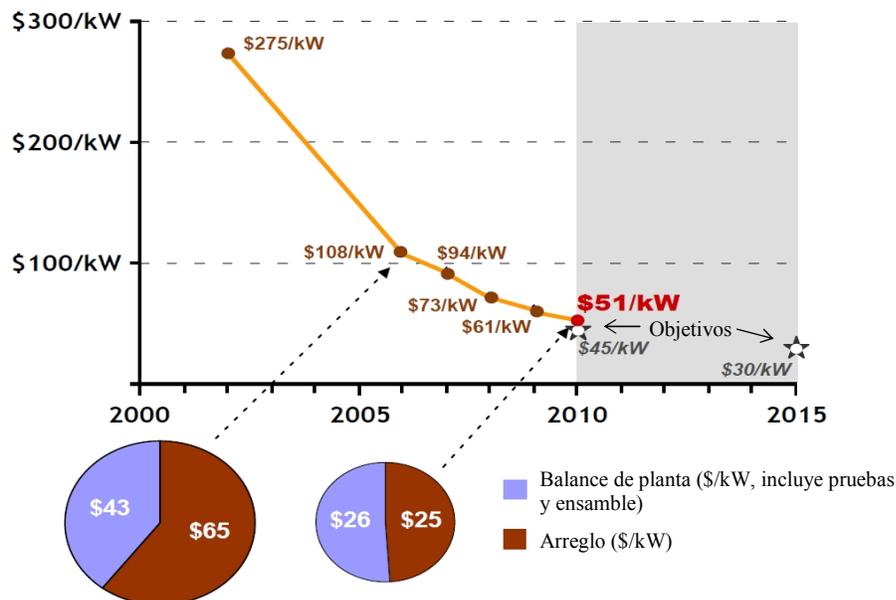


FIGURA 24: EVOLUCIÓN DE COSTOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM. FUENTE: DOE, 2010

TABLA 8: SUPOSICIONES CLAVE DEL ANÁLISIS Y RESULTADO DE COSTOS (DÓLARES EN EL AÑO DEL ANÁLISIS)

Característica	Unidades	2007	2008	2009	2010
Poder del arreglo	kW _{brutos}	90	90	88	88
Poder del sistema	kW _{netos}	80	80	80	80
Densidad de potencia	mW _{brutos} /cm ²	583	715	833	833
Temperatura pico	°C	70-90	80	80	90
Carga de Platino	mg/cm ²	0.35	0.25	0.15	0.15
Contenido total de Platino	g/kW _{brutos}	0.6	0.35	0.18	0.18
Contenido total de Platino	g/kW _{netos}	0.68	0.39	0.20	0.20
Costo Platino	\$/onza troy	1100	1100	1100	1100
Costo del arreglo	\$/kW _{netos}	50	34	27	25
Balance del costo de planta	\$/kW _{netos}	42	37	33	25
Sistema de ensamble y pruebas	\$/kW _{netos}	2	2	2	1
Costo del sistema	\$/kW _{netos}	94	73	61	51

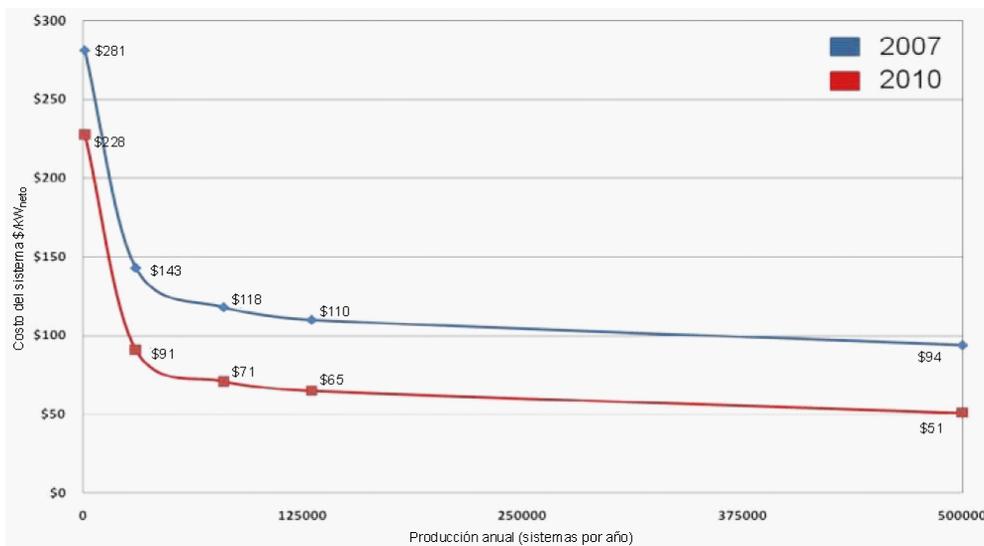


FIGURA 25. COSTO PROYECTADO PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE DE 80 kW_{NETOS} POR VOLUMEN DE PRODUCCIÓN ANUAL (1,000, 30,000, 80,000, 130,000, Y 500,000 SISTEMAS). FUENTE: DOE, 2010

El DOE (2010) también reporta que fueron validadas 24 estaciones de recarga de H₂ y 155 vehículos de demostración que recorrieron más de 4.8 millones de km, con hasta 688 km de alcance entre recargas, 120,000 km de durabilidad y una eficiencia hasta del 59%. Algunas estimaciones son:

- La durabilidad de las celdas de combustible podría aumentar de un 50% al 100% (PEM, MCFC, SOFC), lo que resultaría en la reducción de costos de la electricidad hasta en un 12%
- I+D en la limpieza de los gases, podría reducir los costos de capital hasta en un 25% para los sistemas de biogás de celdas de combustible
- La producción en masa y los avances en tecnologías de fabricación, podrían reducir los costos de capital en más del 50% desde el nivel actual

- La reducción en un 50% del platino en las membranas y la mejora de los métodos de fabricación podrían reducir los costos por lo menos un 10% para las celdas de combustible tipo PEM y PAFC

Los mercados más interesantes a largo plazo están en el sector electrónico portátil. Ya existen dispositivos electrónicos que incorporan celdas de combustible (figura 26). El volumen de estos productos es limitado y el costo no es competitivo, pero se trata del primer paso significativo para tener un mercado comercial.



FIGURA 26. EJEMPLOS DE DISPOSITIVOS PORTÁTILES CON CELDAS DE COMBUSTIBLE.

3.3 Comparación de la tecnología de baterías con el H₂ y las celdas de combustible

James Mason (2003), presentó un escenario idealizado para la sustitución de la gasolina en los vehículos de E.U. con H₂ producido por energía solar. Mason estimó que E.U. quemaría 21 EJ de gasolina en 2010 y dado que generalmente se espera que las plantas de energía de celdas de combustible sean aproximadamente el doble de eficientes que los motores de combustión interna, estimó que se requerirán 11 EJ de H₂. Mason calculó que en terrenos del Suroeste de E.U. que sustentan 270W/m² por hora promedio de la luz solar, con la eficiencia del 10% de la energía solar fotovoltaica y con una eficiencia del 80% en un electrolizador, un rancho solar requerirá 31,000km² para captar 11 EJ de energía, aproximadamente el 5% la superficie de Arizona y Nuevo México. También calculó que alcanzar todo el potencial solar de 340MJ/m² por año, requeriría menos de 2.5cm de precipitación anual en dichos terrenos, mientras que la

precipitación promedio de la zona es de 20cm por año. Un campo solar capaz de generar H₂ suficiente para reemplazar toda la gasolina de vehículos automotores, debería tener una capacidad de 1,800GW de capacidad. El escenario de Mason ofrece un potencial inmenso, casi inimaginable para la producción en masa de H₂ a partir de energías renovables existentes.

Mazza et al. (2004), analizan y cuestionan el escenario de Mason: establecen que construir la fuente del combustible para todo el transporte de toda una nación en una única ubicación, proporciona un objetivo ideal para un ataque militar o del terrorismo, además de que la centralización también implica intensificar los impactos ambientales y el riesgo de sufrir desastres naturales. Continúan remarcando que el transporte de energía mediante el H₂ como portador, es menos eficiente (en todos los casos) que la electricidad. También establecen que el escenario de almacenamiento de H₂ está obstaculizado por pobres eficiencias.

Mazza et al. concluyen que las baterías de iones de Litio superan a la tecnología de celdas de combustible y enlistan los retos que enfrenta la economía del H₂:

- Transmisión de la energía: es más eficiente transmitir electricidad que cualquier combustible
- Almacenamiento de energía: la eficiencia de almacenamiento de H₂ es mucho menor que el de las baterías, aire comprimido y almacenamiento de agua por bombeo.
- Generación local de energía: la producción de H₂ en las estaciones de recarga no son más eficientes que la producción en masa y transmisión centralizada de H₂, por lo que la economía de escala no favorece la producción de H₂.
- Tecnología de los vehículos: una flota de 10,000 FCV consumirían entre 250 y 360 TJ de electricidad cada año, mientras que la misma flota de vehículos eléctricos con baterías consumiría 180 TJ. Además, las tecnologías de las baterías tienen el potencial de superar los obstáculos, como la rapidez de recarga, mejores eficiencias, mayor densidad de carga y duración.

Sin embargo, en el estudio “*Hydrogen Research for Transportation*”, (2009) el Consejo para la Investigación Automotriz de E.U. (USCAR por sus siglas en inglés) publicó un reporte en donde establece que aún con los avances en la tecnología de las baterías, los vehículos a baterías no son competencia de los FCV, en cuanto a que los FCV pueden ser realimentados rápidamente y

podrían ir más lejos entre cada reabastecimiento. También afirman que *“en un futuro mundo de combustibles renovables, la ventaja de la significativa eficiencia de los FCV sobre los ICE, hace a los FCV la mejor solución a largo plazo”*.

Debido a que el desarrollo en masa de un mercado rentable de FCV depende de un progreso significativo en múltiples tecnologías dentro y fuera del vehículo, las compañías que conforman el USCAR han desarrollado diversas formas de vehículos eléctricos e híbridos como su objetivo en el corto plazo, sin embargo, muchas de las tecnologías de los productos de éstos vehículos eléctricos (baterías, sistemas de control, sistemas de conducción eléctrica, motores), directamente se utilizarán en los FCV. Estudios de las compañías automotrices General Motors y Ford [USCAR, 2009] concluyen que los motores de autos con celda de combustible podrían ser contruidos por casi el mismo precio que un motor de combustión interna.

Los FCV de Honda y Toyota son vehículos híbridos, ya que en busca de la mayor integración energética, emplean baterías para almacenar la energía que genera el motor durante la desaceleración:

- El Honda FCX Clarity (2008) tiene unas prestaciones prácticamente comparables a las de los vehículos convencionales: puede alcanzar los 160 km/h y tiene una autonomía de 460 kilómetros. La electricidad que carga la batería e impulsa el vehículo proviene de la celda de combustible. Los excedentes de energía que se obtiene del frenado y de la desaceleración, se almacenan en la batería, y se utiliza para complementar la potencia de la celda de combustible cuando es necesario. El Honda FCX Clarity aprovecha el 60% de la energía generada a partir del combustible, frente al 30% de los híbridos y el 19% de los vehículos de gasolina. También ofrece una mejora del 20% en economía de combustible (2-3 veces el consumo de combustible de un vehículo de gasolina, y una 1,5 veces el de un vehículo híbrido de tamaño y rendimiento similar).
- En el Toyota FCHV-adv (2011) se emplea un motor sincrónico de corriente alterna que funciona como un generador durante la desaceleración, para la regeneración de energía. Emplea una batería NiMH con una potencia máxima de 21 kW. La energía regenerada en la desaceleración se almacena en esta batería y se emplea para proporcionar potencia auxiliar en la aceleración, al complementar a la celda de combustible (figura 27).

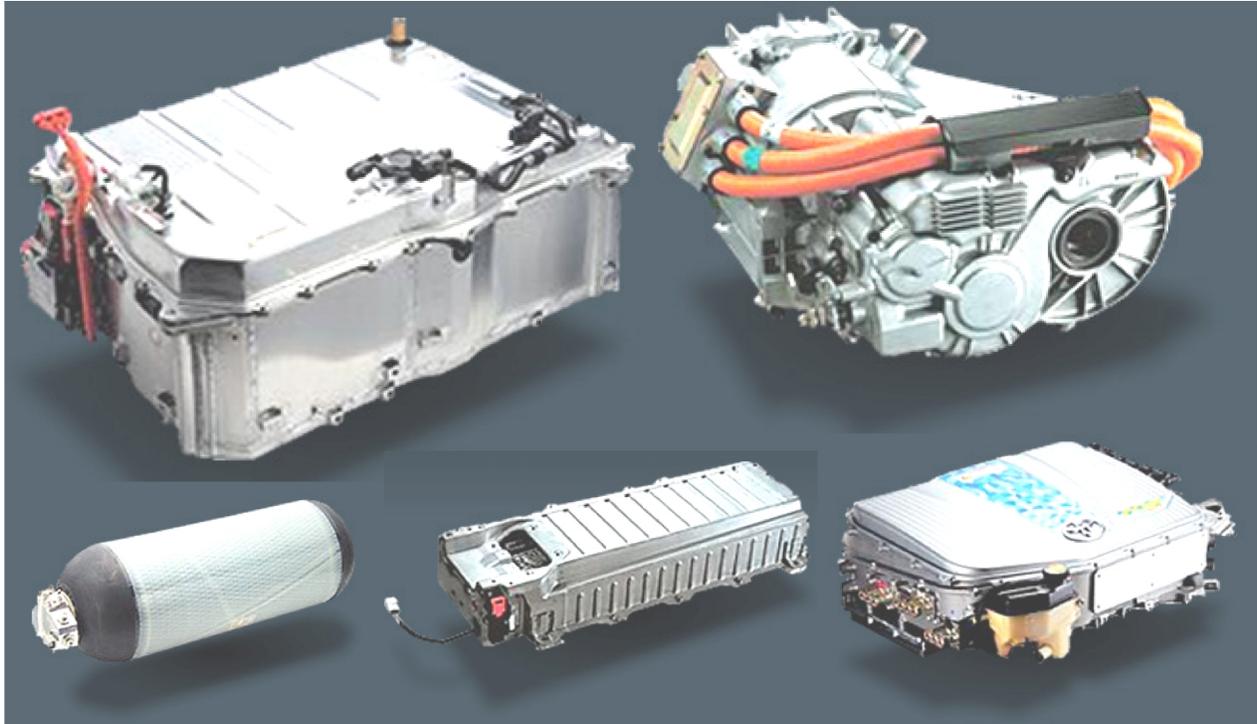


FIGURA 27. COMPONENTES DEL TOYOTA FCHV-ADV (2011).

DE ARRIBA HACIA ABAJO E IZQ. A DER.: ARREGLO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE, MOTOR ELÉCTRICO, TANQUE DE H₂ A ALTA PRESIÓN, BATERÍA NiMH, UNIDAD DE CONTROL DE PODER.

3.4 Escenarios de vehículos con celdas de combustible en E.U.

En el informe “*Vehicle Efficiency and Electrification*” [DOE, 2011], se mencionan las acciones que se llevan a cabo en el Programa de Tecnologías de Vehículos de E.U. y es de notar que en dicho país se está llevando a cabo la I+D en todas las tecnologías que permitan alcanzar la meta de contar con un millón de vehículos eléctricos para el 2015, ya sean FCV, vehículos eléctricos a baterías y/o híbridos.

A mediano y largo plazo se espera que las diversas tecnologías para producir vehículos eléctricos coexistan e incluso se complementen: no se espera que ninguna tecnología desplace totalmente a otra (figura 28). Lo anterior resalta por el hecho de que la presentación del reporte mencionado, se dio al mismo tiempo y lugar que la presentación del reporte “*Improve Internal Combustion Engine Efficiency*” [DOE, 2011], donde se dan a conocer avances y expectativas sobre la tecnología motores de combustión interna.

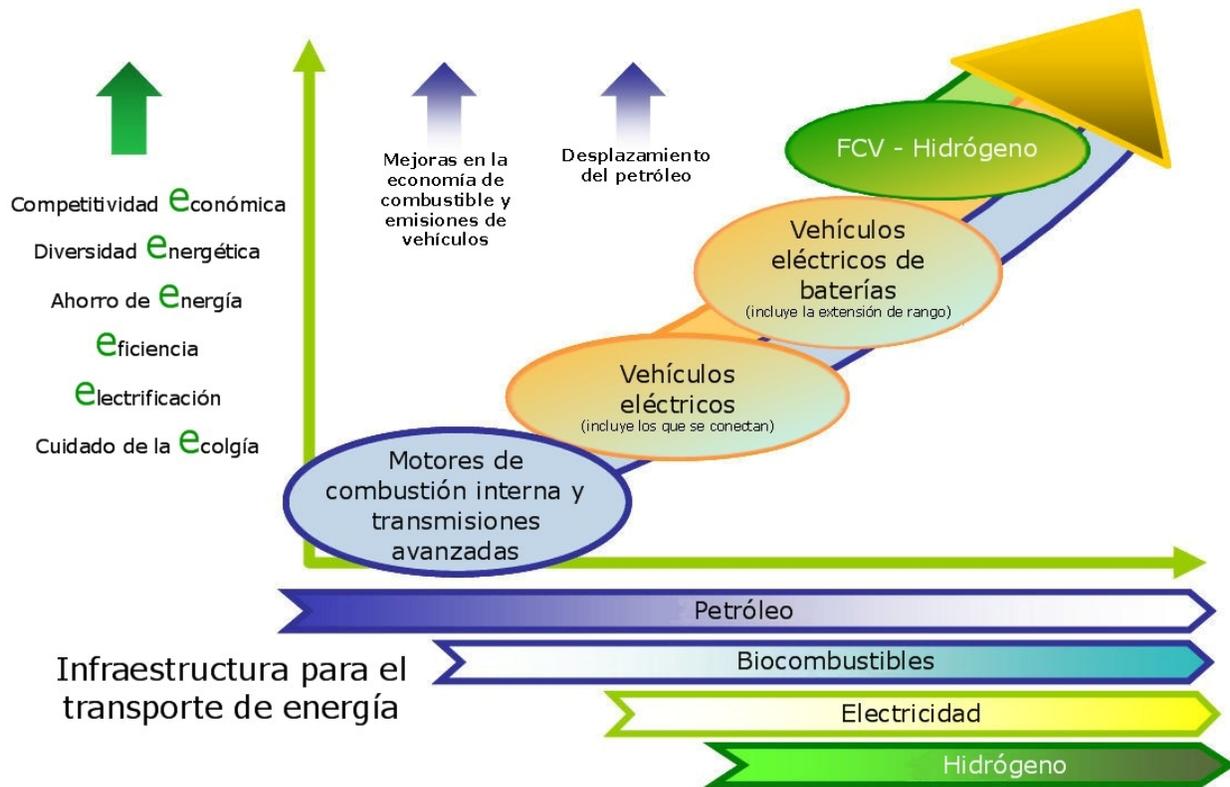


FIGURA 28. EN EL ESTUDIO DE USCAR (2009), ESPERAN QUE ESTÉN DIVERSIFICADAS LAS TECNOLOGÍAS DE LOS VEHÍCULOS Y LAS FUENTES DE ENERGÍA QUE LOS ALIMENTAN.

En el reporte del DOE al Congreso de E.U. (2009), sobre el progreso, planes y actividades de la tecnología del H₂ y las celdas de combustible, se establecen 3 escenarios:

- Escenario 1: producción de miles de FCV por año para el 2015, cientos de miles para el 2019 y 2 millones para el 2025
- Escenario 2: producción de miles de FCV para el 2013, cientos de miles para el 2018 y 5 millones para el 2025
- Escenario 3: producción de miles de FCV para el 2013, cientos de miles para el 2018, millones para el 2021 y 10 millones para el 2025

La conclusión clave de éste análisis de escenarios, es que las redes de estaciones de suministro de H₂ deben establecerse en un número limitado de centros urbanos, durante el periodo de introducción al mercado. El análisis también consideró políticas que ayudarían a compartir los costos de introducir al mercado a los FCV y superar dos barreras económicas: la falta de infraestructura (estaciones de suministro de H₂), y el alto costo de producción de FCV que se tiene con bajos volúmenes de producción.

USCAR (2009), sostiene que diversos análisis establecen que la inversión requerida para mantener la disponibilidad de H₂ para favorecer el desarrollo de FCV para su rápida adopción, es sorprendentemente modesta. Por ejemplo:

- “Una red de 12,000 estaciones de H₂ pondría éste combustible a 3.2km del 70% de la población de E.U. que vive en las 100 ciudades más pobladas, y conectarían la mayoría de las áreas metropolitanas de E.U. con una estación de H₂ cada 40km.”
- Una inversión inicial de USD\$200 millones pueden establecer 40 estaciones de alta capacidad en grandes áreas metropolitanas para suministrar H₂ a más de 40,000 FCV.
- La Asociación Nacional de Protección del Fuego de E.U. (NFPA, por sus siglas en inglés) y el Consejo Internacional de Códigos (ICC, por sus siglas en inglés) concuerdan en que los códigos para las estaciones de suministro de H₂ están listos.

Del análisis de las políticas de E.U. [DOE, 2009] se tiene que:

- Las políticas de transición son esenciales para superar las barreras económicas iniciales al transporte impulsado por el H₂.
- Los costos anuales del gobierno de EU por los casos de las políticas examinadas, suman cerca de USD\$ 6,000 millones (dólares del 2004), que es la misma magnitud de recursos que se espera gastar en las políticas de créditos al impuesto de etanol en 2012 (el mismo año en que se espera que los FCV comiencen a comercializarse en los escenarios examinados)
- Las políticas de créditos a impuestos y las que permiten compartir los costos entre el gobierno y la industria, pueden permitir que lleguen al mercado productos automotrices y de infraestructura competitivos para el 2025, si se alcanzan los objetivos de desempeño y costo de las celdas de combustible y el H₂

CAPÍTULO 4 STEEP EN MÉXICO

Los factores sociales y culturales son las creencias, valores y actitudes de la sociedad con las que se construyen las sociedades e influyen en las decisiones de la gente. Los factores tecnológicos se encuentran integrados en la vida diaria: todos los aspectos de la sociedad se afectan por los cambios en la tecnología. Los factores ecológicos son esenciales para un desarrollo sustentable y es vital para la supervivencia de todas las especies. Los factores económicos incluyen el poder de compra y el costo de capital. Los factores políticos se refieren principalmente a las regulaciones del gobierno y cuestiones legales.

La situación que se vive en el mundo y en México no es muy alentadora del 2008 a la actualidad, ya que son tiempos de crisis económica mundial, se atravesó una crisis epidemiológica, hay crisis por desastres naturales, además de que la crisis política y de seguridad interna continúa, lo que ha traído como consecuencia dramáticas pérdidas económicas, de empleo y poder adquisitivo, lo que genera desconfianza. Aunado a lo anterior, cada vez es más imperativo el tomar acciones para enfrentar el cambio climático (producto de la actividad humana) y para enfrentar la severa dependencia que tiene la economía mexicana del petróleo, debido a la disminución de las reservas de petróleo.

Es imperante la necesidad de un acuerdo de Estado que permita establecer un agresivo plan de acción para aumentar la competitividad de México, como se ha expresado en diversos medios, como en las publicaciones sobre la situación competitiva de México, del Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO).

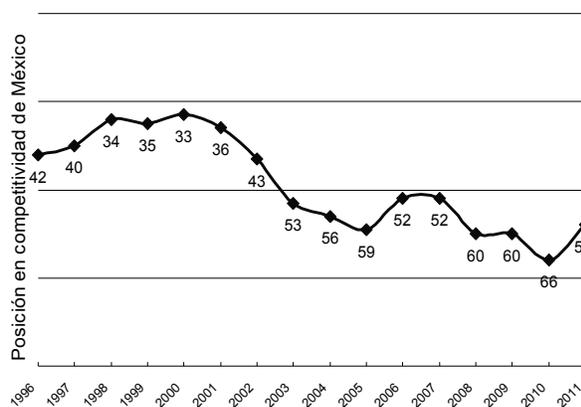


FIGURA 29. POSICIONAMIENTO DE LA COMPETITIVIDAD MEXICANA EN COMPARACIÓN CON OTROS PAÍSES
FUENTE: DATOS DEL *GLOBAL COMPETITIVENESS REPORT*, FORO ECONÓMICO MUNDIAL, VARIOS AÑOS.

En la figura 29 se muestra como se ha comportado el índice de competitividad de México de 1996 a 2011 de acuerdo al Foro Económico Mundial. El número total de países evaluados varía cada año, por ejemplo, del 2006 al 2011, el total de países evaluados fueron: 122, 131, 134, 133, 139 y 142, respectivamente.

Existe una coyuntura favorable para lograr acuerdos y tratar de evitar que México siga perdiendo competitividad, ya que los resultados más sobresalientes y alarmantes al mismo tiempo son [IMCO, 2007]:

- México ocupa el lugar 33 de 45 países en competitividad
- México retrocede tres posiciones y se coloca entre los seis países que más posiciones perdieron
- Sólo en seis países disminuyó la inversión, México es uno de ellos
- La inversión promedio por persona económicamente activa de los 10 países más competitivos es cinco veces mayor que la de México
- En el *Índice de Competitividad 2004* (IMCO), México era el segundo país más competitivo de Latinoamérica
- México retrocedió en seis de los 10 factores de competitividad. Esto sólo ocurre en cinco países más
- En el *Índice de Competitividad 2004*, México superaba la posición 30 en cinco de los 10 factores de competitividad. En el 2006 sólo en el subíndice “*Sectores económicos con potencial*” supera el lugar 30

Las agendas prioritarias tanto de corto como de largo plazo hacen énfasis en cinco factores:

- Gobierno eficiente y eficaz
- Relaciones internacionales benignas
- Sistema político estable y funcional
- Sociedad incluyente, preparada y sana. Competir por talento
- Sistema de derecho confiable y objetivo

De acuerdo al IMCO (2007), es imperativo que México comience a trabajar por la competitividad. Ésta es quizá la última oportunidad que se tiene para ubicar al país como un jugador importante en la economía global y utilizar dicha posición como palanca para emprender la ruta del crecimiento y el empleo acelerados. Ante tal circunstancia, se está en un punto de inflexión en donde se puede potenciar la competitividad de México y explotar las ventajas comparativas y posición estratégica para llegar a los niveles de Chile o Irlanda. Al mismo tiempo se corre el riesgo de perder aún más competitividad y continuar con el estancamiento.

México cuenta con amplios recursos energéticos renovables, una base científica y tecnológica, capacidad industrial de manufactura y una red institucional pública y privada orientada a la I+D de tecnología y equipos. Ello constituye la posibilidad de un mejor desarrollo de las energías renovables y representa una gran oportunidad para una mayor diversificación energética, reducir la dependencia del petróleo, ampliar la base industrial en un área que puede tener valor estratégico en el futuro y atenuar los impactos ambientales producto de la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales. El uso de energías renovables genera nuevas fuentes de empleo, la reactivación de muchas industrias tradicionales, el fortalecimiento del aparato científico y tecnológico del país, ya que alentaría la vinculación de la industria con los centros de investigación y desarrollo tecnológico.

La caída en competitividad se explica por la pérdida de confianza y la falta de estabilidad en nuestro sistema político; aunado a un menor dinamismo económico en nuestros sectores de servicios y de alta tecnología. La primera deriva de eventos como el conflicto de 2006 en Atenco, así como la crisis política de las últimas elecciones presidenciales. La segunda se explica por la falta de competencia en prácticamente todos los sectores, y por la falta de generación de talento e innovación, entre otros factores [IMCO, 2007]. Los mayores problemas de competitividad residen en la rigidez observada en sectores como: el energético, laboral y en la tenencia de la tierra; la falta de agua, el mal manejo de ésta y del resto de los recursos naturales; la alta dependencia comercial con E.U.; y un sistema político con una crisis de representatividad.

En el estudio *“Una visión al 2030 de la utilización de las energías renovables en México”*, encargado por la SENER y el Banco Mundial (2005), se pretende desarrollar una visión de lo que podrían ser algunos escenarios del sector energía en México y como las energías renovables jugarían un papel en la oferta de los energéticos primarios requeridos para satisfacer la demanda de energía interna. El estudio y sus resultados tienen como principal objetivo promover una discusión seria sobre el sector y su futuro, considerando las incertidumbres que contienen los eventos futuros que pueden influir en su comportamiento. La realización del proyecto involucró la participación de expertos en los diferentes temas relacionados con las energías renovables. También, se realizaron reuniones de grupos de enfoque con expertos en el tema para describir varios aspectos del proyecto, los parámetros de entrada al modelo para cuantificar los escenarios,

los obstáculos que se perciben en relación con la penetración de las energías renovables en el sistema, los eventos portadores de futuro en el desarrollo tecnológico involucrado y, los posibles lineamientos de políticas públicas que podrían facilitar esta penetración.

El anexo 11 del estudio anteriormente mencionado, “*Penetración de las fuentes renovables de energía en México: Grupo de Enfoque sobre los Posibles Obstáculos Actuales y Futuros para las Energías Renovables*”, se enlistan los resultados del grupo de consulta a expertos sobre los obstáculos presentes y futuros de las energías renovables en México, realizado el 24 de mayo de 2005 en la Ciudad de México con un pequeño grupo:

- Del IIE: Rolando Nieva Gómez, Gerente del Área de Renovables; Eduardo Iglesias Rodríguez, Investigador; Jorge M. Huacuz V. (Gerente de Energías No-Convencionales)
- Carlos Gottfried, Presidente de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE).
- Del Instituto de Ingeniería la UNAM, los Investigadores: Claudio Alatorre Frenk, y José Luis Fernández Zayas.
- Pablo Mulás del Pozo, Asesor de la Rectoría General de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)
- Odón de Buen R, Director de Energía Tecnología y Educación, S.C. (ENTE).
- Juan Eibenschutz, Director General de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).
- Juan Mata, Director General, Secretaría de Energía (SENER).

Las opiniones y propuestas de éste grupo se discutirán en las próximas secciones con el término *grupo de enfoque*.

4.1 Social

4.1.1 Instituciones

En México, existen diversas instituciones de gobierno, educativas y no gubernamentales, así como expertos del más alto nivel que están participando activamente y dedicando recursos importantes para desarrollar e impulsar tecnologías propias para la generación y uso eficiente de la energía. Por citar solo algunas de las más importantes, están: la SENER, a través de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la

Energía (CONUEE); Petróleos Mexicanos (PEMEX); la Comisión Federal de Electricidad (CFE); el Consejo Nacional para la Ciencia y la Tecnología (CONACYT); la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); el Instituto Politécnico Nacional (IPN); la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM); el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE); sociedades y redes que agrupan diversos sectores, así como empresas, investigadores y público en general. Sin embargo, la sociedad mexicana se encuentra profundamente dividida principalmente por la desigualdad existente en la distribución de la riqueza. Existe un ambiente generalizado de desconfianza hacia las instituciones en general, aunado al clima de inseguridad.

Para promover en México la incorporación del H₂ como un vector energético importante y lograr la transición hacia una economía basada en energía limpia y sustentable, en la UNAM se constituyó la sociedad civil Red Nacional del Hidrógeno (RNH₂), en la que participan 31 instituciones educativas e instancias del sector público y privado, como la Facultad de Ingeniería, el Programa Universitario de Energía y los Centros de Investigaciones en Materiales Avanzados y de Investigación en Energía, de la UNAM, así como el CONACYT, Grupo Carso, el IPN, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), la Sociedad Nuclear Mexicana, la Academia de Ingeniería, el Instituto Mexicano del Transporte, PEMEX, la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Total Energy H₂, la SENER, entre otras. La noticia de la creación de la RNH₂ se publicó en la portada de la Gaceta UNAM el 26 de mayo del 2005. Se desconocen las actividades del RNH₂ ya que no se ha encontrado divulgación alguna.

También existen la Sociedad Nacional del Hidrógeno (SNH) y la Red por la Transición Energética: Energía Tecnología y Educación (ENTE), entre muy diversas organizaciones que destinan esfuerzos para analizar y proponer soluciones para mitigar la generación de gases de efecto invernadero en el sector eléctrico, al promover la cultura del uso y generación eficiente de energía a través de procesos limpios, y crear conciencia en el uso de los recursos. Por otro lado, el Foro consultivo Científico y Tecnológico (2005) llevó a cabo una serie de seminarios y acciones para promover la discusión seria, informada y reflexiva acerca de los problemas de la política en ciencia, tecnología e innovación en México de donde surgió el documento “*Bases para una política de estado en ciencia, tecnología e innovación en México*”, en donde se propone toda una serie de objetivos y líneas de acción.

En el mes de julio del 2009, la SENER presentó la *Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía*. Sin embargo, En periódicos de circulación nacional aparecieron encabezados como “*Decepciona estrategia presentada por SENER para uso sustentable de energía*” (Excelsior) y “*Reprueban estrategia*” (Reforma), que recogían la opinión de Odón de Buen Rodríguez, director general de ENTE, quien sostiene que “*el desarrollo de energías renovables está frenado en el país, ya que la ley para su aprovechamiento, así como el financiamiento de la transición energética y el reglamento de ella, que está en proceso de evaluación, van en contra de las prácticas internacionales*”.

En otras acciones, en el mes de octubre de 2009, se llevó a cabo en León, Gto. el Foro Global de Energías Renovables, promovido por el Gobierno Federal, junto con la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO, por sus siglas en inglés). El objetivo general fue “*proporcionar una plataforma para el dialogo proactivo que permita fortalecer la cooperación interregional y promover asociaciones innovadoras entre los participantes, enfocadas en promover las energías renovables en América Latina y el resto del mundo*”. Eventos como estos, pueden representar oportunidades únicas para crear el liderazgo requerido para la promoción de energías renovables.

Durante el foro, Felipe Calderón Hinojosa, presidente de México, anunció que México firmaría el estatuto de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés), con lo que México ya es parte de la comunidad de naciones que integran IRENA (IRENA se estableció oficialmente el 26 de enero del 2009 y que a diciembre del 2009 ya contaba con 137 países miembros).

Las recomendaciones emitidas en el Foro fueron expuestas por Ged Davis, copresidente del Consejo Global de Energía y son las siguientes:

- Establecer el acceso a fondos globales como complementario a los objetivos de desarrollo de energía y fortalecer la base de datos internacional de soluciones en energía, inspirados por el concepto de “Justicia Energética”
- Establecer una evaluación exhaustiva de los criterios de sostenibilidad de los biocombustibles, para desarrollar estándares y directrices coherentes para su producción y uso

- IRENA se estableció en un momento crucial, ya que la próxima década es fundamental para las energías renovables y el cambio climático
- Fortalecer las redes regionales de investigación. Asegurar un enfoque regional apropiado y considerar proyectos de demostración
- Se debe definir quién debe gestionar la agenda mundial de energía, ya sea por una sola institución o por sociedades y consorcios

Así, aunque el panorama es sombrío y a pesar de que existen trabajos y propuestas importantes, el mundo tiene la tarea ineludible de combatir el cambio climático y defender los recursos naturales del planeta, por lo que debe continuar la enorme labor de llegar a la conciencia de la sociedad en general para adoptar las medidas necesarias, lo que supone un reto importante, ya que se debe lograr un cambio de paradigmas en la población.

4.1.2 Educación e Investigación

La educación es el reto más importante, ya que una población educada y con valores es el verdadero motor del desarrollo de un país. Además, la educación ayuda a que la población sea menos propensa a la delincuencia y a la corrupción. Sin embargo, los retos más urgentes son los que tienen que ver con la atención a las necesidades básicas de la población, como son combate a la pobreza extrema y a la inseguridad, y acceso a los servicios básicos de alimentación, salud y educación.

La mala calidad de varios sectores del sistema educativo, incluyendo a las universidades, es uno de los grandes frenos para la competitividad futura. Se requiere transformar de fondo el modelo pedagógico desde la educación básica [IMCO, 2009]. La población en general presiona a sus instituciones para cambiar su situación, por lo que las acciones están enfocadas principalmente a resolver las manifestaciones de los problemas, pero no las situaciones que los originan. En México existe la posibilidad de que la actividad académica y de investigación sufra o se detenga por el nivel de inseguridad. Las oportunidades existentes de empleo en las actividades de I+D, son extremadamente limitadas, ya que existe muy poca oferta de plazas, en gran medida también porque existen pocos centros dedicados a estas actividades.

En gran parte de la investigación que se realiza en México, participa una cantidad importante de estudiantes realizando servicio social, becarios y tesistas. Éste personal, al concluir sus estudios o plazos y a pesar de haber adquirido conocimientos y experiencias importantes en la investigación realizada, en buena medida se ve forzado a abandonar la investigación, debido a que se mantiene a base de apoyos, lejos de su lugar de origen y habitando en espacios compartidos. La vida de un estudiante de posgrado, tesista o becario, muchas veces es nómada: buscan las oportunidades y se dirigen hacia donde éstas se encuentren y, tristemente, en muchas ocasiones es fuera de nuestro país. La posibilidad de perder el empleo es una preocupación real para cualquier asalariado, pero para un becario casi siempre se trata de una realidad que se llevará a cabo en un plazo previamente establecido. Así, aunque en México se están formando recursos humanos de alto perfil, muchos de ellos se pierden por la falta de oportunidades, apoyos e interés. El posgrado en ingeniería de la UNAM, publicó las gráficas que se reproducen en la figura 30 y 31, que ilustra las actividades de los egresados de los programas de estudio de la institución en el 2008 y 2011.

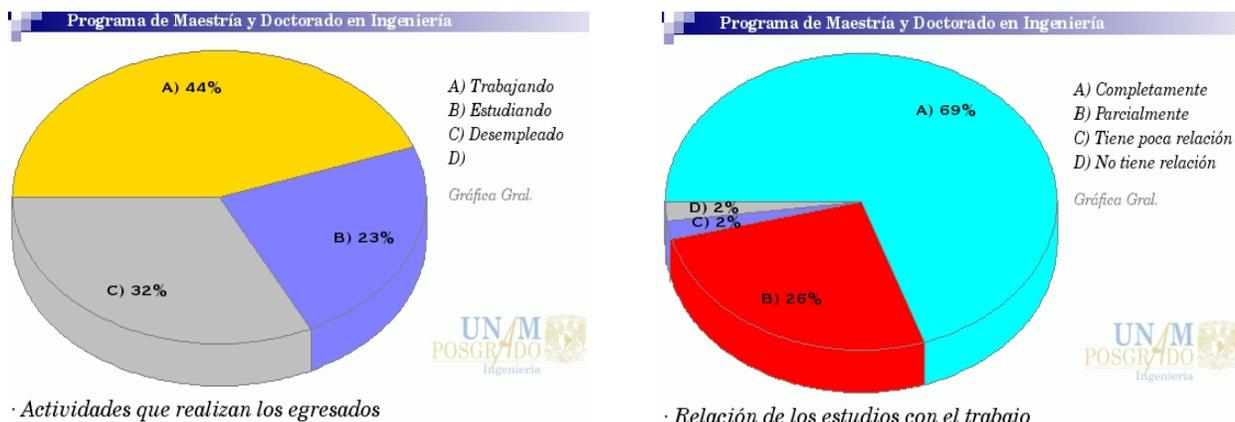


FIGURA 30. ACTIVIDADES DE LOS EGRESADOS DEL POSGRADO DE INGENIERÍA DE LA UNAM, 2008

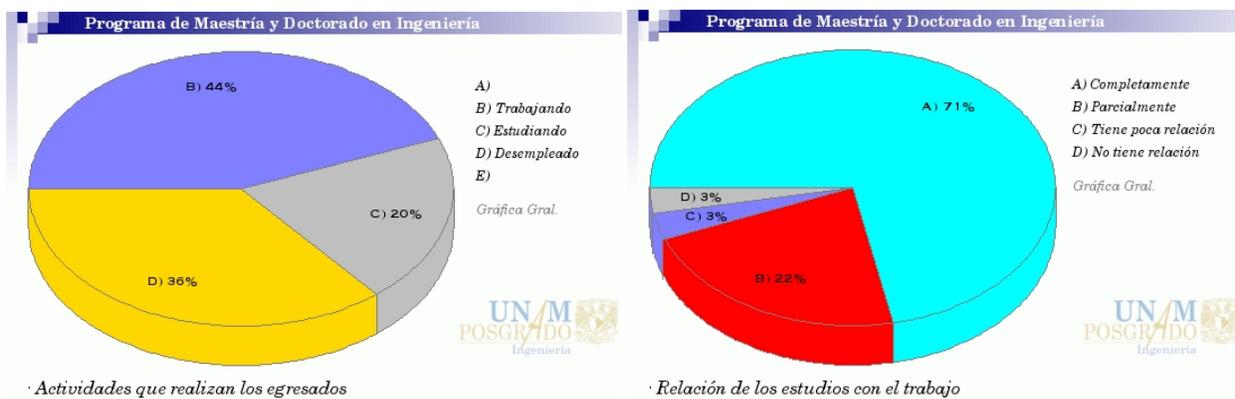


FIGURA 31. ACTIVIDADES DE LOS EGRESADOS DEL POSGRADO DE INGENIERÍA DE LA UNAM, 2011

4.1.3 Cultura del agua

Para avanzar en la tecnología de celdas de combustible y su comercialización, también es importante que se resuelvan otros problemas, como son la tenencia de la tierra y la disponibilidad del agua, ya que representan una barrera para el establecimiento de las plantas de tecnologías limpias que generalmente requieren grandes extensiones de tierra. Al acelerar la regularización de los derechos de propiedad en ciertas zonas, se evitarían costos y retrasos innecesarios, donde además los dueños legítimos de la tierra se podrían beneficiar sin tener necesariamente que vender su propiedad.

El agua dulce y limpia se está acabando. De no cambiar la forma en que asignamos este recurso México pronto enfrentará una grave crisis. La disponibilidad natural del agua en México, definida como el volumen de agua dulce renovable, se redujo significativamente (figura 32). Esto es el resultado de una tasa de extracción de agua mayor a la capacidad natural de recarga. Por si esto fuera poco, el 33% de los ríos del país tienen altos niveles de contaminación.

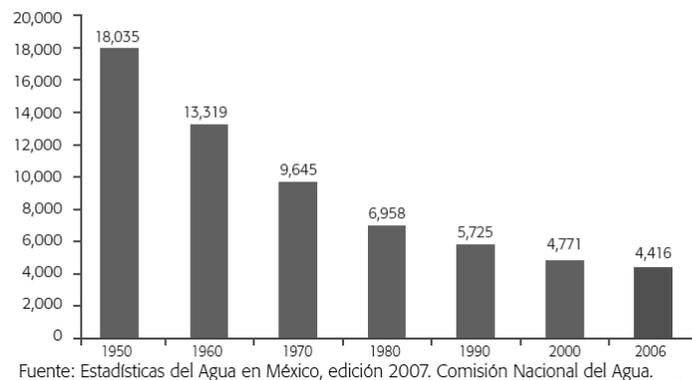


FIGURA 32. EVOLUCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN MÉXICO (M³/HAB/AÑO).

Según la Comisión Nacional del Agua, [CONAGUA, 2010], la *cultura del agua* es un proceso continuo de producción, actualización y transformación individual y colectiva de valores, creencias, percepciones, conocimientos, tradiciones, aptitudes, actitudes y conductas en relación con el agua en la vida cotidiana. Por lo anterior, el enfoque de las acciones de la CONAGUA en esta materia, es lograr un cambio positivo y proactivo en la participación individual y social en torno al uso sustentable del agua, para no afectar a las siguientes generaciones, incidiendo en el/los procesos de comunicación a través de los cuales la sociedad se allega información, desde la educación formal, no formal (familia, medios de comunicación, capacitación) y espacios de participación social.

A pesar de que garantizar el acceso universal del líquido hace sentido por tratarse de un recurso vital, el esquema actual de subsidios generalizados tiene resultados desastrosos:

- Promueve el desperdicio: en México, el promedio de agua consumida por habitante es mayor al promedio mundial.
- Baja productividad del agua en el sector agropecuario: el campo mexicano utiliza 1,750 litros de agua para producir un kilo de maíz mientras que en Estados Unidos se utilizan 490 litros y el promedio mundial es de 900 litros por kilo. Lo mismo ocurre con el ganado, mientras que en promedio en el mundo se utilizan 15,500 litros de agua para producir un kilo de carne, en México se utilizan 37,700 litros, es decir, más de 2.4 veces.
- El acceso es inequitativo entre sectores económicos: se cobra 250% más en promedio al sector industrial que al residencial por ser el único al que se le puede cobrar fácilmente.
- Genera mercados negros: al concentrar el sector agropecuario la mayor proporción de las concesiones y al impedir la transferencia de estos entre sectores, genera escasez para las demás actividades económicas, lo que incentiva a la venta ilegal de las concesiones agrícolas para destinarse a otros usos (ej. industrial).
- No hay recursos para ofrecer agua a todos: sólo el 50% del agua suministrada en las ciudades se cobra, mientras que la otra mitad no se recupera debido a las fugas, deficiencias del padrón y por robo. Lo anterior condena a los más pobres, quienes terminan pagando más por m³ de agua debido a que no hay suficientes recursos para ampliar la red y conectar a las zonas más marginadas.
- No hay eficiencia en el sistema: la falta de recuperación de cuotas desincentiva a invertir y dar mantenimiento oportuno a la infraestructura, así como a mejorar la calidad en el servicio (ej. regularidad, calidad, cobertura, etc.). El insuficiente mantenimiento ha resultado en un incremento en el volumen perdido por fugas en los últimos años y representan alrededor del 40% del volumen suministrado.

Como resultado, existe un desperdicio y consumo de agua desproporcionado. Si el agua es un recurso indispensable para la vida y su uso enfrenta problemas graves por la cultura existente, es difícil vislumbrar el empleo racional de los recursos energéticos renovables, ya que ambos temas están íntimamente ligados.

4.1.4 Grupo de enfoque

Como se mencionó al inicio de éste capítulo, el panel de expertos que aquí se denomina *grupo de enfoque* enlistó los principales obstáculos sociales/culturales que enfrentan las energías renovables:

- Los recursos humanos capacitados para labores de desarrollo de proyectos, ingeniería y operación de centrales generadoras son escasos
- Existe una percepción social de que el petróleo es “inagotable”
- Existe la percepción social de que hay otras alternativas mejores a las energías renovables; por ejemplo la nuclear
- El público en general, y los tomadores de decisiones en particular, desconocen los beneficios ambientales de las energías renovables
- Las energías renovables no pertenecen al marco cultural actual. Por ejemplo, existen zonas sumamente asoleadas, con proveedores de equipos solares bien acreditados, donde no se instala ni un solo calentador solar de agua
- No se valora en México la cobertura energética de largo plazo
- Las energías renovables no forman parte de las tradiciones; es muy fácil subir a tender la ropa al sol, pero es imposible que la misma persona cocine con una estufa solar
- En el caso de la energía eólica hay, a nivel mundial, un rechazo local por el problema de la contaminación visual; ello probablemente se reproducirá en México en la medida en que se empiecen a instalar granjas eólicas en nuestro país. Los síndromes BANANA y NIMBY se están extendiendo a las granjas eólicas; cuando las fotovoltaicas se vuelvan más atractivas, es probable que esto también ocurra. No así con las basadas en plantaciones energéticas (biomasa), geotermia, o mini/micro hidráulicas.

El *grupo de enfoque* enlistó las posibles tendencias o eventos futuros que podrían influir sobre la evolución de los obstáculos que enfrentan las energías renovables para tener una mayor penetración en el mercado mexicano y/o posibles nuevos obstáculos que podría volverse relevantes en el futuro para dichas energías:

- El tema de las energías renovables podría incorporarse en los programas de educación media, básica y superior, y podrían crearse especialidades sobre el tema en las carreras profesionales.

- El desarrollo de una cultura de la autosuficiencia en el ámbito individual y colectivo podría hacer que parte de la población voltease hacia las energías renovables (en hogares, edificios y comunidades).
- Los medios de comunicación masiva podrían lanzar campañas de información sobre los beneficios de las energías renovables
- Crecerá la oposición social a la contaminación estética y ello podría afectar negativamente a algunas fuentes de energías renovables, pero favorecer las celdas de combustible
- Las autoridades del sector energético y el sector privado cobrarán conciencia sobre la magnitud y aplicabilidad de los recursos geotérmicos mexicanos
- Por disminución importante de la calidad de vida en las grandes ciudades podrían desarrollarse flujos migratorios desde las zonas urbanas hacia las rurales, creando una demanda para las energías renovables en sistemas aislados

4.2 Tecnológico

La inversión de recursos para ciencia y tecnología en México es incipiente, principalmente porque solo se invierte en actividades de investigación menos del 0.5% del PIB, mientras que lo recomendado es mínimo el 1%. Aunado a esto, es bajo el índice de formación de recursos humanos en ramas de la ciencia y tecnología (ver tablas 9 y 10). En el primer lugar por sector de empleo de éste personal se encuentra el gobierno, en segundo lugar la educación y en tercero el productivo.

Se dice de manera popular que los mexicanos tienen una gran creatividad. Si como resultado de actividades creativas surge una invención, proceso o tecnología digna de ser aprovechada y registrada, en rara ocasión se protege, ya que en general se carece de formación y cultura en propiedad intelectual e industrial, lo que ocasiona pérdida de ventajas competitivas y que los competidores (generalmente de otros países) se aprovechen de lo bien hecho en México. Ejemplos de lo anterior son los productos del chocolate y el maíz, autóctonos de México, pero que se reconoce a otros países como los que verdaderamente los han sabido aprovechar: Suiza produce y vende productos de chocolate a través de la poderosa transnacional Nestlé y Estados Unidos es el principal productor de maíz en el mundo y de donde México importa grandes cantidades.

TABLA 9. ACTIVIDADES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS, 2006 A 2008

Indicador	Unidad de medida	Valores			Variación anual	
		2006	2007	2008	2007	2008
Patentes solicitadas en México ^a	Número	15 500	16 599	16 581	7.1	-0.1
Patentes concedidas en México ^b	Número	9 632	9 957	10 440	3.4	4.9
Acervo de recursos humanos en ciencia y tecnología ^{c, d}	Miles de personas	8 688.5	9 263.6	9 540.2	6.6	3.0
Población que está ocupada en actividades de ciencia y tecnología ^d	Miles de personas	5 388.3	5 357.9	5 492.8	-0.6	2.5
Proporción de la población económicamente activa ocupada que labora en actividades de ciencia y tecnología ^d	Porcentaje	12.8	12.5	12.2	-2.2	-2.6
Egresados de licenciatura	Personas	311 463	325 319	341 311	4.4	4.9
Graduados de programas de doctorado	Personas	2 112	2 283	2 554	8.1	11.9
Miembros del sistema nacional de investigadores ^e	Personas	12 096	13 485	14 681	11.5	8.9
Ayodos a becarios del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en el país y el extranjero ^f	Becas vigentes (Personas)	20 111	23 210	26 918	15.4	16.0
Gasto federal en ciencia y tecnología	Millones de pesos	33 276	35 832	43 829	7.7	22.3
Establecimientos certificados con ISO 9001:2000 y 14001	Número	1 268	1 383	1 497	9.1	8.2
Saldo de la balanza de pagos tecnológica	Millones de dólares	-1 067.9	-810.4	ND	-24.1	ND
Exportaciones mexicanas de bienes de alta tecnología	Millones de dólares	40 396.2	46 536.6	ND	15.2	ND
Importaciones mexicanas de bienes de alta tecnología	Millones de dólares	49 547.7	60 630.0	ND	22.4	ND

^a A partir de 1995, incluye patentes solicitadas vía tratado de cooperación en materia de patentes.

^b A partir de 1997, incluye patentes concedidas vía tratado de cooperación en materia de patentes.

^c En el Manual de Canberra se define al ARHCyT como el subconjunto de la población que ha cubierto satisfactoriamente la educación de tercer nivel de acuerdo con la clasificación internacional normalizada de la educación (ISCED por sus siglas en inglés), en un campo de la ciencia y la tecnología y/o está empleada en una ocupación de ciencia y tecnología que generalmente requiere estudios de tercer nivel. El tercer nivel de acuerdo con la ISCED comprende los niveles educativos posteriores al bachillerato, estudios conducentes a grados universitarios o superiores.

^d A partir de 2006 se refiere a la población catalogada como disponible de acuerdo con la definición de la ENOE.

^e Para 2007, las cifras son preliminares.

^f Para 2006, las cifras son preliminares.

ND: No disponible.

Fuente: CONACYT. *Informe General del Estado de la Ciencia y la Tecnología*. México. 2009.

Presidencia de República. *Cuarto Informe de Gobierno. Anexo*. México. 2010

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). *IMPI en cifras 2008 y 2010*. México. 2010.

Lo anterior también se ve reflejado en los indicadores de actividades científicas y tecnológicas (tablas 11 a 13), realizado por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), en cuanto a: la relación de dependencia (solicitudes de patentes extranjeras / solicitudes de patentes nacionales); la tasa de difusión (patentes solicitadas en el extranjero por residentes / solicitud de patentes nacionales) y; el coeficiente de inventiva (solicitud de patentes nacionales por cada 10,000 habitantes). Otro indicador muestra que en el año 2008, se otorgaron 197 patentes a nacionales y 10,243 a extranjeros, lo que representa un 1.89% de la actividad inventiva que se protege de los mexicanos, frente a la de los extranjeros.

TABLA 10. RECURSOS HUMANOS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA, 1993, 1995-2008

Año ^a	Acervo de recursos humanos en ciencia y tecnología (ARHCyT) ^b		Población que completó exitosamente el tercer nivel de educación (niveles ISCED 5 o superior) ^b		Población que está ocupada en actividades de ciencia y tecnología		Población que completó exitosamente el tercer nivel de educación (ISCED 5 o superior) y está ocupada en actividades de ciencia y tecnología	
	Miles de personas	Proporción con respecto a la población de 18 años o más	Miles de personas	Proporción con respecto a la población de 18 años o más	Miles de personas	Proporción con respecto a la población económicamente activa ocupada	Miles de personas	Proporción con respecto a la población económicamente activa ocupada
1993	4 454.9	9.13	3 310.5	6.79	2 484.1	7.42	1 339.8	4.00
1995	5 639.6	10.82	3 968.7	9.10	3 572.7	10.34	1 901.8	5.50
1996	6 330.8	11.89	4 743.0	9.40	3 919.5	11.13	2 331.7	6.62
1997	6 746.0	12.30	5 005.5	9.13	4 141.8	11.09	2 401.4	6.43
1998	7 005.9	12.42	5 290.5	9.38	4 299.5	11.13	2 584.1	6.69
1999	6 882.2	11.92	5 290.6	9.17	4 079.1	10.44	2 487.4	6.37
2000	6 557.6	11.41	4 631.9	8.06	4 283.8	12.19	2 358.0	6.71
2001	7 799.5	13.11	6 065.3	10.20	4 634.2	11.88	2 900.1	7.44
2002	8 228.5	13.33	6 540.2	10.59	4 768.8	11.83	3 080.6	7.64
2003 ^c	8 586.2	13.61	6 932.7	10.99	4 956.1	12.20	3 302.6	8.13
2004	8 733.1	13.06	7 028.1	10.56	5 226.5	12.40	3 344.6	7.91
2005	8 385.7	12.72	6 345.1	9.57	4 507.8	10.91	3 117.4	7.54
2006 ^d	8 688.5	13.23	6 572.5	10.01	5 388.3	12.77	3 272.3	7.75
2007 ^e	9 263.6	13.65	7 306.0	10.75	5 357.9	12.49	3 544.6	8.26
2008	9 540.2	13.83	7 552.9	10.93	5 492.8	12.16	3 665.8	8.11

NOTA: Para clasificar los recursos humanos en términos de escolaridad, el manual de Canberra propone las siguientes clasificaciones: a) Población núcleo, incluye las disciplinas a nivel licenciatura o superior de los diferentes campos de la ciencia; b) Población extendida, se conforma por la Población núcleo más las disciplinas del área de humanidades y de otras áreas de conocimiento y el nivel educativo de técnico profesional en los diferentes campos de la ciencia; y c) Población completa, además de la Población extendida incluye las disciplinas del nivel técnico profesional en todos los campos del conocimiento, la Población completa conforma el acervo de recursos humanos por educación. Este cuadro hace referencia a la Población completa.

^a No existen datos disponibles para 1994.

^b En el manual de *Canberra* se define al ARHCyT como el subconjunto de la población que ha cubierto satisfactoriamente la educación de tercer nivel de acuerdo con la clasificación internacional normalizada de la educación (ISCED por sus siglas en inglés), en un campo de la ciencia y la tecnología y/o está empleada en una ocupación de ciencia y tecnología que generalmente requiere estudios de tercer nivel. El tercer nivel de acuerdo con la ISCED comprende los niveles educativos posteriores al bachillerato, estudios conducentes a grados universitarios o superiores (ISCED 5A: licenciaturas; ISCED 6: especialidades, maestrías y doctorados) y estudios de tercer nivel que crean habilidades específicas (ISCED 5B: carreras de técnico superior universitario).

^c A partir de la fecha en que se indica.

^d A partir de 2006 se refiere a la población catalogada como disponible de acuerdo con la definición de la ENOE.

^e Cifras estimadas.

^R Cifras revisadas.

FUENTE: Para 1993-2000: CONACYT. *Informe General del Estado de la Ciencia y la Tecnología*. México. 2006-2008.

Para 2001-2008: CONACYT. *Informe General del Estado de la Ciencia y la Tecnología*. México. 2009.

TABLA 11. PATENTES* SOLICITADAS Y CONCEDIDAS EN MÉXICO, 1999-2008 FUENTE: IMPI, INFORME ANUAL 2008.

Año	Solicitadas			Concedidas		
	Nacionales	Extranjeras	Total	Nacionales	Extranjeras	Total
1999	455	11,655	12,110	120	3,779	3,899
2000	431	12,630	13,061	118	5,401	5,519
2001	534	13,032	13,566	118	5,360	5,478
2002	526	12,536	13,062	139	6,472	6,611
2003	468	11,739	12,207	121	5,887	6,008
2004	565	12,629	13,194	162	6,676	6,838
2005	584	13,852	14,436	131	7,967	8,098
2006	574	14,926	15,500	132	9,500	9,632
2007	641	15,958	16,599	199	9,758	9,957
2008	685	15,896	16,581	197	10,243	10,440

* Incluye Patentes Solicitadas y Concedidas vía PCT.

TABLA 12. COEFICIENTE DE INVENTIVA DE PAÍSES MIEMBROS DE LA OCDE 1997-2007.

País	1997 1/	1998 1/	1999 1/	2000 1/	2001 1/	2002 1/	2003 1/	2004	2005	2006	2007
Alemania	5.4	5.7	6.1	6.3	6.1	5.8	5.8	5.9	5.9	5.8	5.8
Australia	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2	1.4	1.3
Austria	2.4	2.5	2.5	2.4	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	2.7	n.d.
Bélgica	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
Canadá	1.1	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.6	1.6	1.7	1.5
Corea del Sur	14.7	10.9	12.0	15.5	15.6	16.1	18.9	21.9	25.4	26.0	26.6
Dinamarca	2.5	2.9	3.1	3.2	3.3	3.4	3.3	3.5	3.1	2.8	3.0
Eslovaquia	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
España	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
E.U.A.	4.4	4.9	5.3	5.8	6.2	6.4	6.5	6.5	7.0	7.4	8.0
Finlandia	4.6	4.8	4.9	5.0	4.6	4.2	3.8	3.8	3.5	3.4	3.4
Francia	2.2	2.2	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3
Grecia	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.6	0.7
Holanda	1.5	1.6	1.6	1.5	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3
Hungría	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Irlanda	2.2	2.7	2.7	2.4	2.6	2.3	2.2	1.9	1.9	2.0	1.9
Islandia	0.8	1.5	1.3	1.8	1.7	2.5	2.0	2.3	1.6	1.5	2.0
Italia	n.d.	n.d.	1.1	1.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.6
Japón	27.7	28.3	28.2	30.3	30.1	28.7	28.1	28.8	28.8	27.2	26.1
Luxemburgo	1.1	1.0	0.6	1.9	1.2	0.9	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3
México	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06
Noruega	2.9	2.7	3.0	2.9	2.6	2.6	2.4	2.5	2.5	2.5	2.6
Nueva Zelanda	4.2	3.1	3.7	3.8	4.5	4.7	4.5	4.0	4.5	5.1	4.4
Polonia	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6
Portugal	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Reino Unido	3.1	3.3	3.6	3.7	3.6	3.5	3.4	3.2	3.0	2.9	2.9
Rep. Checa	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7
Suecia	4.7	4.5	4.7	4.8	4.4	3.8	3.4	3.1	2.8	2.7	2.8
Suiza	3.4	2.8	2.7	2.9	2.6	2.5	n.d.	2.3	2.2	2.3	2.2
Turquía	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2

1/ Cifras sujetas a revisión por modificaciones en la información de la OMPI

Fuentes: OMPI, IMPI, OCDE

TABLA 13. RELACIONES DE DEPENDENCIA, AUTOSUFICIENCIA, COEFICIENTE DE INVENTIVA Y TASA DE DIFUSIÓN

Año	Relación de Dependencia	Relación de Autosuficiencia	Coefficiente de Inventiva	Tasa de Difusión 1/
1998	23.05	0.04	0.050	0.59
1999	25.62	0.04	0.050	0.55
2000	29.30	0.03	0.044	0.76
2001	24.40	0.04	0.054	0.57
2002	23.83	0.04	0.052	0.49
2003	25.08	0.04	0.046	0.58
2004	22.35	0.04	0.055	0.56
2005	23.72	0.04	0.056	0.53
2006	26.00	0.04	0.054	0.77
2007	24.90	0.04	0.061	0.71
2008	23.21	0.04	0.064	n.d.

Definiciones:

Relación de Dependencia = solicitudes de extranjeros/solicitudes de nacionales.

Relación de Autosuficiencia = solicitudes de nacionales/solicitudes totales.

Coefficiente de inventiva = solicitudes de nacionales/10,000 habitantes.

Tasa de Difusión = solicitudes de mexicanos en el extranjero/solicitudes de nacionales.

Notas:

1/ La tasa de difusión se calculó con cifras OMPI a partir de 2000, y es el cociente de solicitudes del mismo año.

n.d. dato no disponible.

Fuentes: OMPI, IMPI, e INEGI para datos poblacionales. Al trabajar con datos OMPI, se debe tener en cuenta que una invención puede derivar en tantas patentes como países en que se registre dicha invención.

4.2.1 Patentes de celdas de combustible y uso del H₂ en México

Para éste trabajo de investigación se realizó la búsqueda de patentes en nuestro país de celdas de combustible en las bases de datos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). Se encontraron 157 solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005 con el término “*celda combustible*” como el término de búsqueda. Los criterios de búsqueda gratuitos que ofrece el IMPI no permite eliminar la duplicidad de resultados ni asegurar que los resultados correspondan al tema y tampoco hay garantía de encontrar todas las patentes buscadas. Esto nos indica que el interés de las grandes empresas que se dedican de alguna manera al desarrollo de celdas de combustible, no están muy interesadas en proteger sus invenciones en México, por lo que podemos suponer que todavía no ven a nuestro país como un potencial mercado del uso de celdas de combustible en los próximos años, considerando que las patentes tienen una vigencia de 20 años en México. En el anexo de este trabajo, se enumeran las patentes encontradas.

4.2.2 Visitas a centros de investigación

Al realizar la pregunta “si se conjuntara en México un grupo interdisciplinario con los recursos humanos nacionales existentes ¿en cuánto tiempo se podrían producir celdas de combustible competitivas a nivel mundial?” a diversos investigadores, tesisistas y becarios, la respuesta común fue “en un año o menos”. Los problemas son: cada grupo de trabajo enfoca sus esfuerzos de manera independiente, lo que genera duplicidad de esfuerzos y; la mayoría de las materias primas serían de importación.

4.2.2.1 Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)



El CIDETEQ es una institución perteneciente al sistema de Centros Públicos de Investigación del CONACYT, que desarrolla proyectos de investigación y tecnología, oferta servicios acreditados a la industria y además ofrece programas de formación de recursos humanos en el nivel posgrado en sus áreas de especialidad que son la electroquímica y la tecnología ambiental. Están orientados a la generación y aplicación de conocimiento de frontera con el objeto de incrementar la infraestructura científica del país, aumentando la competitividad del sector productivo y académico mejorando así, las condiciones de vida de la sociedad mexicana.

El CIDETEQ lleva a cabo un proceso de planeación que se lleva a cabo año con año, en el que se plasma para cada área el avance mensual de cada proyecto, así como el balance de recursos que éste genera. Para que un proyecto se pueda llevar a cabo, debe existir una necesidad de la industria para desarrollar un proceso o producto de manera conjunta.

El enfoque del CIDETEQ es diferente de los centros de investigación básica. En los centros CONACYT se tiene un enfoque de ventas (corto plazo y justificación de los proyectos) mediante la vinculación con la industria, mientras que en los centros de investigación básica se centran en publicar, y sus proyectos en general son a largo plazo y obedecen la necesidad de la búsqueda del conocimiento. El objetivo del grupo de celdas de combustible, dirigido por el Dr. Germán Orozco Gamboa es desarrollar tecnología de celdas de combustible con el mayor número de insumos producidos por el CIDETEQ, mediante la generación de recursos que produce la transferencia de la tecnología por licenciamiento. Su equipo de análisis, diagnóstico y operación (potenciostatos, software, prensas, etc.) es importado. Algunos elementos de las celdas y algunos otros utilizados para su manufactura, ensamble y operación son producidos en México de manera “artesanal”.

El CIDETEQ forma recursos humanos de alto nivel con conocimientos de Celdas de Combustible. El acercamiento con la industria lo realiza a través de diversos mecanismos. La promoción de los servicios que ofrece el CIDETEQ se realiza a través de medios impresos y electrónicos, participación en exposiciones y congresos, así como en eventos del gobierno.

El CIDETEQ hace notar que se ha incrementado el nivel de inversión y ha crecido el interés, por lo que está aumentando su infraestructura y lleva a cabo acciones para mejorar y aumentar los recursos humanos. Cada vez se abren más espacios y más gente se encuentra interesada. Las celdas de combustible no las ofrecen como un producto, sino que se integran como parte de otros. Esto se debe a que el interés de la industria es cubrir sus necesidades de la mejor manera posible y no en la tecnología de celdas de combustible en sí.

En sus planes del 2005 pretendían contar con prototipos de celdas de combustible desde 50 W hasta 1 kW para el 2009. De los tres tipos de celdas de combustible que producen, aunque no se protejan bajo una patente, si buscarán registrarlas mediante una marca y el diseño industrial. La perspectiva del CIDETEQ sobre el mercado es la siguiente:

- El sector privado está interesado indirectamente. Aceptan la tecnología solo si les ofrece una ventaja competitiva.
- El establecimiento comercial de unidades estacionarias de baja potencia (50 W a 1 kW) se dará como complemento de algún producto.
- La evolución de los sectores transporte y de dispositivos portátiles, será lento y siguiendo los pasos de los esfuerzos internacionales, debido principalmente a que son manufacturados en/para los mercados extranjeros.
- La infraestructura para el almacenamiento y distribución del combustible (principalmente H₂) constituye un gran reto. Esperarían la comercialización generalizada de las celdas de combustible en estos sectores posterior al 2025.

4.2.2.2 Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)



La misión del IIE es promover y apoyar la innovación mediante la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico con alto valor agregado para aumentar la competitividad de la industria eléctrica y otras industrias con necesidades afines. Las tareas principales del IIE son realizar y promover la investigación científica, el desarrollo experimental y la investigación tecnológica. En el IIE se mantiene la atención en combustibles alternos y en tecnologías eficientes y limpias. Actualmente, centra su atención en baja potencia con celdas de combustible PEM. Algunas celdas de combustible desarrolladas en el IIE se ilustran en la figura 33.

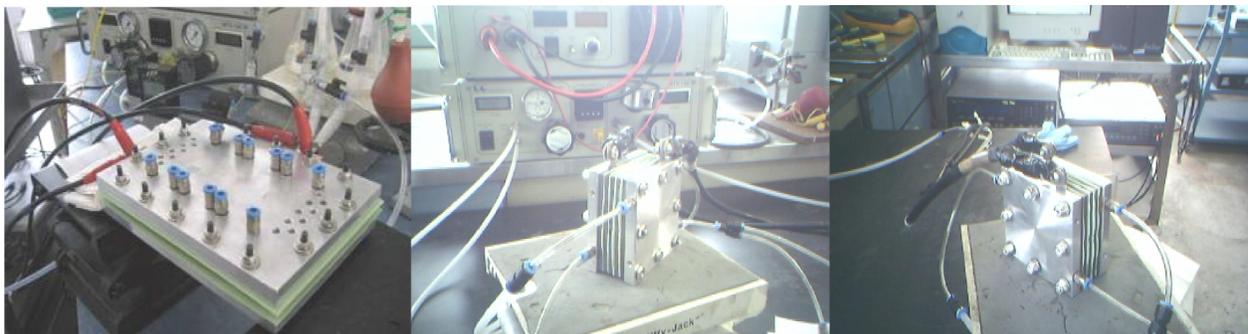


FIGURA 33. ALGUNOS EJEMPLOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DESARROLLADAS EN EL IIE

El grupo de celdas de combustible, está dirigido por el Dr. Ulises Cano Castillo, quién cuenta con una representación gráfica y clara de la ruta tecnológica que están siguiendo para el desarrollo de las celdas de combustible y que hace comprender el grado de complejidad involucrado en cada aspecto de la tecnología de las celdas de combustible. Cada una de las partes de la celda y de los insumos que requieren, ya sea para su construcción u operación, se ven envueltos en complejos problemas de ingeniería que deben ser resueltos.

Se observaron algunos procesos para la elaboración de las membranas de intercambio protónico, en que al principio se rociaba el catalizador sobre la membrana de *naftión* de manera manual, por lo que existían diferencias en la distribución del catalizador, que influían directamente en el comportamiento de cada membrana. Eran muchas las variables involucradas, por lo que uno de los proyectos de investigación atacaba una variable a la vez, con el objetivo final de automatizar el proceso, asegurar la calidad de las membranas tratadas y lograr un comportamiento estandarizado de las mismas. Por otro lado, también se trabaja sobre modelos matemáticos y métodos de simulación sobre el comportamiento eléctrico de las celdas.

Hasta el momento de las visitas, no existían mediciones sobre la duración de las celdas construidas, ya que a cada celda se le realizan las pruebas para las que fue fabricada y después se recicla para la producción de nuevas celdas de combustible.

Por lo anterior, entre otras cuestiones que se observaron en las visitas al IIE, es evidente que se requiere de un grupo multidisciplinario de alta especialización para poder cubrir todos los aspectos y retos que plantea la construcción y, eventualmente, la manufactura de celdas de combustible que estén a un nivel competitivo de clase mundial.

4.2.3 Actividades específicas de otras instituciones

El Dr. Solorza (2003), realizó un estudio con el objetivo de presentar algunos de los proyectos de I+D que se están realizando en instituciones mexicanas en relación a la generación, almacenamiento y aplicaciones del hidrógeno. Los proyectos de investigación mencionados en el estudio se resumen en la tabla 14.

TABLA 14. ALGUNOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN INSTITUCIONES MEXICANAS EN RELACIÓN A LA PRODUCCIÓN, ALMACENAMIENTO Y APLICACIONES DEL H₂. (SOLORZA, 2003)

Institución o proyecto	Actividades
UAM – Azcapotzalco	Síntesis, caracterización y aplicación de una membrana compuesta Pd- Al ₂ O ₃
Proyecto CONACyT (NC-209)	Hidrógeno, producción, almacenamiento y su uso en celdas de combustible y en el tratamiento de crudos pesados
Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. (ESIQIE-IPN)	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de hidrógeno libre de CO por descomposición catalítica de metano • Síntesis y caracterización de materiales nanométricos con actividad electrocatalítica para las reacciones de evolución de hidrógeno y oxígeno, reducción de oxígeno y oxidación de metanol.
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)	Síntesis y caracterización de compuestos fotocatalizadores, electrocatalizadores y para almacenamiento de hidrógeno
Instituto Mexicano del Petróleo	Desarrollo de hidruros metálicos con incorporación de materiales nano-estructurados para aplicaciones en sistemas de almacenamiento de energía de hidrógeno
Centro de Investigación en Materiales Avanzados CIMAV- Chihuahua	<ul style="list-style-type: none"> • Generación Biológica de Hidrógeno • Celdas de Polímero Electrolítico • Celdas de Oxido Sólido
Instituto de Investigaciones Eléctricas	<p>Departamento de Energías No Convencionales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de generadores de baja potencia (<3kW) basados en celdas de combustible PEM. • Integración de sistemas eléctricos mediante generación de hidrógeno a partir de fuentes renovables de energía y celdas de combustible. • Desarrollo de componentes para celdas de combustible y electrolizadores tipo PEM <p>Gerencia de Control e Instrumentación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelado y Control de Celdas de Combustible y sus Sistemas de Soporte
Centro de Investigación en Energía (CIE)	Desarrollo de sistemas solar hidrógeno utilizando nuevos materiales catalíticos y fotocatalíticos.
Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM)	<ul style="list-style-type: none"> • Síntesis y caracterización de materiales de electrodos para celdas de combustibles de óxidos sólidos. • Síntesis de membranas poliméricas a base de Poliimidias sulfonadas para la preparación de ensambles MEA a altas temperaturas.
Universidad de Guanajuato	Obtención de hidrógeno a partir de hidruros metálicos
SOLZAID, S.A.	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de electrolizadores para la generación de hidrógeno operando con fuente de poder fotovoltaica de 72 KW/ día-sol.
Centro de Estudios en Hidrógeno, S.C.	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación de una estación de recarga de hidrógeno para automóviles.
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav)	Síntesis y caracterización de nuevos materiales nanométricos para cátodos en celdas de combustible

- Existen nuevos grupos de investigación que trabajan en torno al hidrógeno como una fuente de generación de energía limpia y protectora de la salud y del medio ambiente.
- La infraestructura experimental para el desarrollo de investigación en la generación, almacenamiento y aplicaciones del H₂ es reducido, por el escaso financiamiento en esta área.
- La era del petróleo esta concluyendo y no es por falta de petróleo, de igual manera que la edad de piedra concluyó y no fue precisamente por falta de piedras.

4.2.4 Grupo de enfoque

Obstáculos técnicos/tecnológicos que enfrentan las energías renovables:

- Existe poca información detallada y confiable sobre los recursos energéticos renovables del país.
- Los “*stocks*” tecnológicos del país en energías renovables son prácticamente nulos.
- La característica de intermitencia de las energías solar y eólica.
- La producción de etanol a partir del maíz es un proceso que es negativo en su balance energético en Estados Unidos; es comercial gracias a los subsidios gubernamentales. Se requiere investigación y desarrollo tecnológico para volverlo positivo.
- Los recursos humanos capacitados para labores de desarrollo de proyectos, ingeniería y operación de centrales generadoras son escasos.

Posible evolución futura de los obstáculos:

- Probablemente se incrementará el financiamiento para actividades de prospección y caracterización de los recursos energéticos renovables y la información obtenida se integrará en un sistema de información geográfica.
- Las tecnologías de aprovechamiento de la energía eólica evolucionarán haciendo que los generadores eólicos sean menos sensibles a variaciones de tensión en la red.
- Podría darse un desarrollo tecnológico acelerado que redujese los precios unitarios de producción de las tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables.
- Seguirá dándose un desarrollo tecnológico y baja de precios unitarios de las alternativas con energéticos no renovables.
- Por falta de inversión en redes de distribución podría bajar notablemente la calidad y certidumbre de las soluciones convencionales, lo que haría más atractivas a las energías renovables.
- Para algunas fuentes renovables podrían saturarse los sitios susceptibles de aprovechamiento.

3.3 Económico

Los tiempos de crisis pueden ser considerados como la mejor posibilidad para realizar los cambios necesarios y establecer políticas de Estado, y así aprovechar las oportunidades que por años se dejaron escapar. La economía mexicana se encuentra “petrolizada”, por lo que es urgente que se tomen medidas para remediar la situación. El potencial que puede alcanzar México al adoptar una economía del H₂ es enorme, ya que su territorio es rico en recursos naturales.

El 26 de agosto del 2009, el director de producción y exploración de PEMEX, Carlos Morales, confirmó el pronóstico preliminar de que la producción petrolera de México caería durante el 2010 a 2.5 millones de barriles por día (mbpd). Y es que la producción petrolera de México cayó un 7.8 por ciento en julio a tasa anual, a 2.56 mbpd y se ha desplomado casi en una cuarta parte desde 2004, a causa de la decreciente producción en Cantarell. Pemex está apostando millones de dólares en su proyecto Chicontepec para compensar algo de la caída en la producción. La menor producción de crudo ha puesto más presión sobre las finanzas públicas del país.

En el documento titulado “*Propuesta para ampliar la mitigación de gases de efecto invernadero en el sector eléctrico de México*” publicado por ENTE (2009), se presenta un estudio sobre las oportunidades del ahorro y uso eficiente de la energía, aunado al potencial del aprovechamiento de energías no convencionales y proponen una serie de medidas para lograrlo. En la tabla 15, el ENTE estima el potencial de cogeneración de energía eléctrica en México por sectores.

TABLA 15. POTENCIAL DE COGENERACIÓN EN MÉXICO (ENTE, 2009)

SECTOR	Potencial de Cogeneración (MW)
Industrial	10,267
Siderurgia	2,395
Química	1,703
Azúcar	235
Cemento	732
Minería	769
Celulosa y Papel	496
Vidrio	542
Cerveza y Malta	278
Fertilizantes	57
Automotriz	49
Aguas Envasadas	150
Hule	107
Aluminio	22
Tabaco	4
Otras ramas	2,727
Pemex	1,986
Petroquímica	517
Refinación	1,469
Comercial	1,210
Total	13,463

Fuente: Elaboración de ENTE.

La Comisión Reguladora de Energía (CRE, 2009), publicó el potencial de cogeneración en México (figura 34). Aunque el potencial es significativo, su desarrollo se ha visto limitado por la falta de un marco regulatorio adecuado, la falta de conocimiento en la industria sobre los beneficios de la cogeneración, y la falta de personal capacitado en esta especialidad [SENER, 2011].

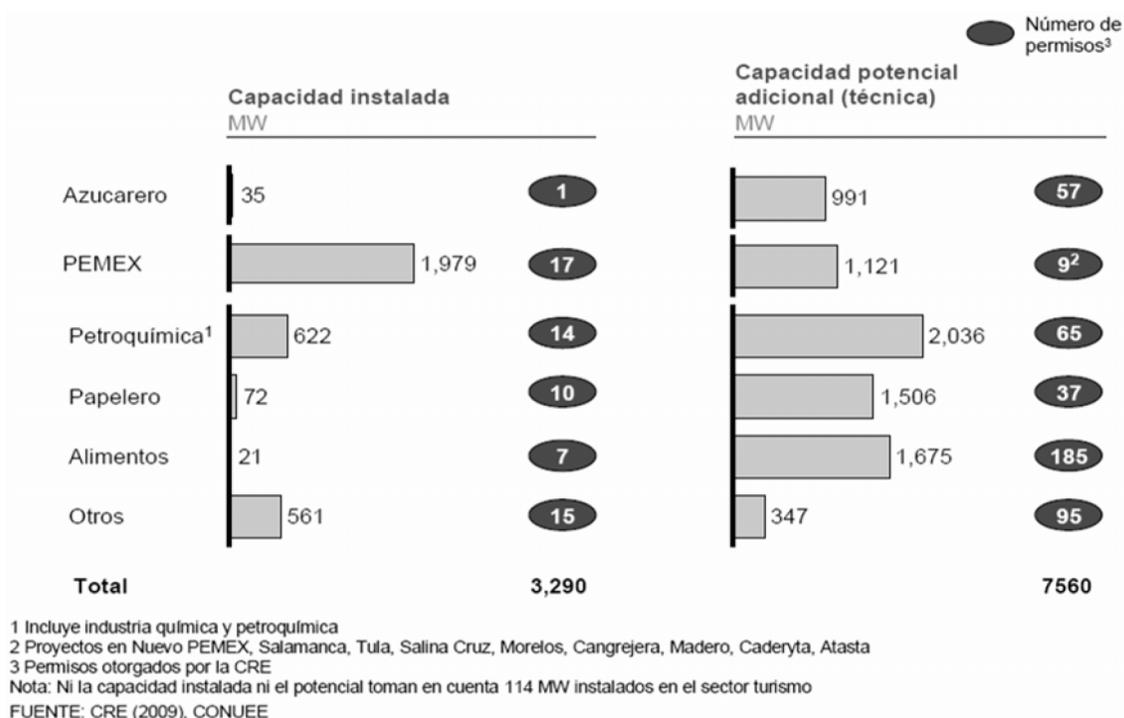


FIGURA 34: POTENCIAL DE COGENERACIÓN EN MÉXICO (CIFRAS EN MW).

Desde hace más de un par de décadas se han integrado mapas de radiación solar en México, basados en imágenes provenientes de satélites y apoyados en algunas mediciones sistemáticas para algunas localidades. Este conocimiento indica que más de la mitad del territorio nacional presenta una densidad energética de 5 kWh por metro cuadrado. Por otro lado, se ha estimado de manera muy conservadora y con muy pocas evaluaciones, que el potencial eoloelectrico de México alcanza los 5,000 MW. Sin embargo, de acuerdo con un estudio publicado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los Estados Unidos, realizado con sistemas de evaluación a partir de imágenes satelitales, se observó que el potencial para la región de La Ventosa en el Estado de Oaxaca es de más de 33,000 MW en cerca de 7,000km². Esto hace suponer que el potencial nacional ha sido subestimado y que la suma de recursos explotables sea de una magnitud superior, en varios órdenes, a las estimaciones conservadoras [SENER, 2005].

En cuanto a la competitividad tecnológica, México no está a la altura de las inversiones que han realizado otros países para el desarrollo de celdas de combustible y la infraestructura para soportarla. México tiene bien definido el papel de seguidor tecnológico, principalmente de E.U. Cuando en E.U. se cuente con las condiciones para la comercialización de los FCV, solo será cuestión de tiempo para que se comience a importar la tecnología, pero tristemente, existe la posibilidad de que se siga repitiendo el esquema histórico de las “importaciones de caja negra”: se utiliza la tecnología, pero prácticamente no se aprende nada de ella.

3.3.1 Grupo de enfoque

El *grupo de enfoque* enlista los principales obstáculos económicos que enfrentan las energías renovables:

- Los energéticos primarios convencionales tienen precios relativamente bajos.
- Algunas fuentes energéticas tradicionales tienen subsidios.
- Las energías renovables tienen actualmente altos costos.
- Los precios de los energéticos no reconocen ni valoran los costos ambientales y de salud de las distintas fuentes energéticas (lo que juega en contra de las energías renovables).
- Prevalecen los intereses de los sistemas centralizados.
- Las energías renovables requieren en general de inversiones iniciales mayores (aunque sus costos de operación son menores).
- No existen mecanismos comerciales para el financiamiento de proyectos de energías renovables.

Posible evolución futura de los obstáculos económicos:

- Los precios del petróleo probablemente tendrán aumentos radicales y a largo plazo (por múltiples razones).
- La incorporación de las externalidades ambientales y de salud a los precios de los energéticos volverá a las energías renovables económicamente competitivas.
- Los costos de las energías renovables tenderán a la baja como resultado de la investigación y desarrollo tecnológico (en unas más que otras).

- Aumentos en el precio de las materias primas de los sistemas de aprovechamiento de las energías renovables (por ejemplo, en celdas fotovoltaicas) podrían crear nuevas barreras de entrada para éstas.
- Probablemente se desarrollarán esquemas de promoción económica para las energías renovables por parte del estado (por ejemplo, exención de impuestos los primeros años, menores impuestos por energía “limpia”, etc.).
- Con una estrategia de apoyo a clientes privados para la compra de equipos de energías renovables (principalmente solares), podría iniciarse de manera apropiada el recorrido sobre las curvas locales de aprendizaje (costo unitario/ número de unidades producidas), y de ahí podrán surgir cadenas de valor.
- Probablemente se avanzará en la construcción y divulgación de casos de éxito en la aplicación de las energías renovables, mediante organizaciones modernas, lideradas por la iniciativa privada, sin participación del gobierno.

3.4 Ecológico

Del informe “Situación de la competitividad de México 2006: Punto de inflexión” editado por el Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. [IMCO, 2007], se pueden recuperar aspectos importantes como los cambios ambientales positivos de México, que se deben a cuatro factores:

- El incremento en la tasa de reforestación
- La disminución de emisiones contaminantes
- El aumento en empresas certificadas como “limpias”
- La baja en tragedias ecológicas por intervención humana.

Por otro lado, México ha actuado de manera eficaz en la disminución de contaminantes de sus vehículos e industrias en las principales ciudades, a través de programas de verificación vehicular, reubicación de industrias e incentivos para reconvertir el parque vehicular. Sin embargo, hace falta desarrollar políticas más eficientes y eficaces para incentivar el transporte público.

México perdió competitividad en el manejo sustentable de sus recursos naturales por el deterioro en cinco variables:

- La sobreexplotación de los mantos acuíferos
- La baja productividad del campo (que utiliza el 70% del agua en México)
- Una caída en fuentes de energía limpias, resultado de un retraso insostenible del sector energético
- Una depredación de la biodiversidad que cada día deja a más especies en peligro de extinción
- Una caída en el porcentaje del territorio protegido.

Una buena cantidad de la electricidad que se emplea en México es resultado de la utilización de combustibles fósiles, por ende, es una fuente significativa de contaminantes del aire. En la tabla 16 se listan los impactos ambientales producidos por la operación de centrales eléctricas. Se debe recordar que los impactos al ambiente no solo se centran en la emisión de gases residuales.

TABLA 16. IMPACTOS AMBIENTALES POR OPERACIÓN DE CENTRALES ELÉCTRICAS

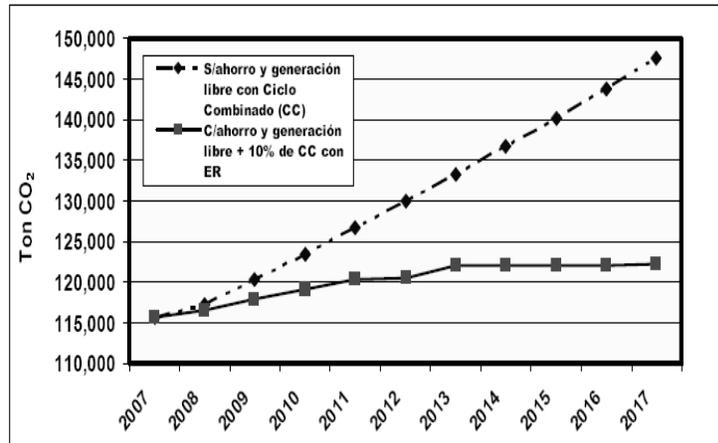
Tipo de central	Tipo de impactos ambientales
Carboeléctricas	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de superficie de tierra por apertura de minas, incluyendo daños al subsuelo e infraestructura urbana cercana • Contaminación del agua debido a flujo de agua residual de las minas • Contaminación del agua por residuos sólidos y líquidos de las plantas • Pérdida de bosques, cosechas y especies animales por absorción de gases contaminantes resultantes de la combustión de carbón de la planta
Centrales de combustóleo	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del agua por derrames en el transporte de combustible y accidentes • Contaminación del agua debido a residuos sólidos y líquidos resultantes de la operación de la planta • Pérdida de bosques, cosechas y especies animales por la absorción de gases contaminantes resultantes de la combustión de petróleo de la planta
Centrales a gas natural	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de bosques, cosechas y especies animales por la absorción de gases contaminantes resultantes de la combustión de gas de la planta
Nucleoeléctricas	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de superficies de tierra por minas de uranio • Contaminación del agua por derrame de líquidos en las minas • Efectos de radiación en especies vegetales y animales en el caso de accidentes severos • Calentamiento de agua por el calor de desecho
Grandes centrales hidroeléctricas	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en el clima local y regional • Influencia en las reservas pesqueras • Manejo de agua y control de flujos de agua para otros usos • Influencia negativa en las tierras aledañas, que pueden sufrir sequías o inundaciones, con cambios significativos en los niveles y calidad de los mantos acuíferos subterráneos

Fuente: IAEA, 1999

Asimismo, las particulares características de los combustibles fósiles mexicanos (residuo de la refinación de crudos pesados y altos en contenido de azufre y asfaltenos) han motivado diversos estudios en torno a la valoración de la calidad de las emisiones de gases de combustión.

El Instituto Nacional de Ecología (INE), señaló en el *Inventario Nacional de Emisiones 1990-2002*, que México tiene emisiones de gases de efecto invernadero de poco más de 643 mil Giga-

gramos en bióxido de carbono equivalente. Estas emisiones lo convierten en el país número 13 en el mundo en cuanto a emisiones anuales. De las emisiones cuantificadas, 61% proviene del sector de energía. En la figura 35 se ilustra un escenario estimado por ENTE de la reducción en las emisiones de CO₂ mediante el uso de energías renovables.



Fuente: Estimaciones de ENTE, S.C. con base en datos de CFE.

FIGURA 35. ESCENARIOS DE EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO DE SERVICIO PÚBLICO (2007-2017)

Las políticas y medidas destinadas a mitigar gases de efecto invernadero pueden aportar otros beneficios y costos sociales, también llamados subsidiarios o *co-beneficios* y costos. De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el término *co-beneficio* se refiere a aquellos beneficios de las políticas que son implementadas por varias razones al mismo tiempo, incluyendo la mitigación del cambio climático.

El término *co-impacto* es utilizado para cubrir los lados positivos y negativos de los beneficios. Asimismo y aun cuando se puede percibir de manera evidente que la reducción de emisiones de CO₂ globales es el principal motor para llevar a cabo acciones orientadas a mitigar el cambio climático, sus efectos tienen igual relevancia en lo que se refiere a disminución de contaminantes locales.

Se pueden definir los tipos de *co-beneficios* asociados a las acciones de mitigación del sector eléctrico por la contaminación derivada de la operación de centrales convencionales y generación de electricidad, partiendo del hecho de que se reducirá el consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad y, por ende, las emisiones de otros gases contaminantes y partículas, como son:

- Disminución de la lluvia ácida
- Menos smog fotoquímico
- Reducción en los efectos para la salud humana, particularmente en enfermedades respiratorias y cardiopatías
- Menor contaminación del agua en la operación de plantas industriales y comercios
- Disminución de los efectos adversos para ecosistemas vegetales y animales, derivados de la menor absorción de emisiones contaminantes.

La falta de una política de mercado de aguas en México, le cobra cada día al país una factura más alta, que pronto será insostenible. Sin embargo, la problemática no se puede resolver si no es por la vía política, por lo que está paralizada. En esta misma línea, el retraso en el consumo de energía limpia se debe también a la falta de una reforma energética. Mientras PEMEX y la CFE no puedan invertir en nuevas tecnologías y se prohíba o dificulte la entrada de nuevos oferentes, se tendrán pocas fuentes de energía limpias en México.

3.5 Político

Existe una gran desconfianza y un ambiente generalizado de desaprobación hacia la clase política mexicana. Son muchos los espacios que se dedican en los medios masivos de comunicación a programas de política, por lo que todos los días se pueden escuchar analistas políticos que dan cuenta de un sinnúmero de temas, de los que destacan escándalos de todo tipo, corrupción, clientelismos, etc.

En general se acepta que en los últimos años, el Poder Ejecutivo ha perdido mucha fuerza frente al Poder Legislativo, lo que ha llevado en algunos casos a situaciones de ingobernabilidad. Un Poder Ejecutivo débil no puede llevar a cabo las acciones de gobierno que planteó como sus objetivos, al verse limitado en sus recursos o al ser rechazados sus proyectos.

En los últimos años, los mexicanos han sido testigos del intento por lograr reformas estructurales a los sectores más importantes del país, como las reformas energética, electoral, fiscal, política y a los sistemas de pensiones (IMSS e ISSSTE). Los temas referentes a la reforma energética son

especialmente sensibles al pueblo mexicano por cuestiones históricas y de nacionalismo, al grado de que la legislación vigente sobre la política energética mexicana se considera que es de las más cerradas del mundo, equiparable solamente a la del régimen militar de Corea del Norte.

Pero los intentos por alcanzar reformas que, dadas las condiciones del país, aseguren un cambio a corto, mediano y, sobretodo, a largo plazo, se han visto empañadas por los intereses de unos cuantos sectores políticos. Muchas son las causas: poder económico y político, viejas creencias infundadas, nacionalismo radical, errores cometidos en el pasado por gobiernos negligentes, etc.

Las reformas logradas gozan de impopularidad, ya que los grupos conservadores las rechazan totalmente (las tachan de aberrantes, generalmente porque afectan sus intereses) y por el otro lado, no cumplen con las medidas que necesita el país para mejorar su nivel competitivo. A éstas reformas se les ha dado por llamar las “reformas posibles”, pero solo la clase política sostiene que son las reformas que se requieren.

Repetidamente, los sectores empresarial e industrial hacen continuos llamados a revisar las reformas y realizan acciones para demostrar que con la actual legislación, se va a continuar con la pérdida de la competitividad.

Algunas de las barreras que la política energética mexicana provoca son:

- Los precios de la energía que no reflejan sus verdaderos costos
- Altos costos de transacción (reales y percibidos)
- Desconocimiento y desconfianza en la tecnología
- Poco desarrollo de mercados financieros asociados al ahorro de energía
- Discrecionalidad en trámites y permisos de interconexión, que frecuentemente imponen requerimientos desproporcionados e injustos con cargo al desarrollador
- Falta de infraestructura para el transporte de la energía cuando los centros de consumo están ubicados lejos de los sitios con potencial para generación con energía renovable
- Insuficiente información sobre los recursos de energías renovables
- Incertidumbre en el suministro y los precios de los energéticos

- Tendencia a privilegiar la extensión de la red sobre el aprovechamiento de energías renovables
- Poco desarrollo de cadenas de suministro y servicio de sistemas que aprovechan la energía renovable en zonas fuera de la red eléctrica
- Excedentes de energía comúnmente desperdiciados

En México, cuando un problema técnico se convierte en un problema político, la única forma de resolverlo es a través de la política, dejando fuera los hechos científicos, técnicos, ambientalistas y económicos, lo que plantea el desafío más importante al problema que enfrentamos de competitividad.

3.5.1 Grupo de enfoque

El *grupo de enfoque* enlista los principales obstáculos políticos/legales/institucionales que enfrentan las energías renovables:

- Los promotores de las energías renovables tienen poco peso político
- Existe un monopolio del estado en la generación de energía eléctrica
- Existe un vacío legal en torno al aprovechamiento de las energías
- No existen regulaciones regionales sobre el uso de suelos y el acceso a recursos energéticos.
- La ley reglamentaria de electricidad indica que CFE debe generar al menor costo, lo que se interpreta que en todas sus compras debe preferir la opción más barata (por kWh); por tanto, CFE no compra kWh renovables
- Existen dificultades para la participación privada en la generación de energía eléctrica
- En el caso de autoconsumidores cuya corriente eléctrica generada tiene que transportarse por la red, la CFE es muy conservadora en los criterios para calcular el costo de posteo en relación con la capacidad que les reconoce, y les exige además una capacidad de respaldo muy alta
- Las instituciones del sector energético son rígidas frente al desarrollo de nuevas fuentes porque están dominadas por quienes se benefician con el “status quo”
- El marco institucional para la promoción y aplicación de las energías renovables es muy limitado

- La CFE prefiere desarrollar las tecnologías para el aprovechamiento de fuentes tradicionales
- La política energética y las perspectivas correspondientes están basadas en combustibles fósiles
- La planeación energética está basada en “tecnología de mínimos costos”.
- Existe falta de sinergia entre los planes de electrificación rural y el desarrollo de fuentes renovables
- En el marco de toma de decisiones actual (que incluye subsidios, hábitos de consumo, costumbres sindicales, etc.), las energías renovables no son competitivas.

Posible evolución futura de los obstáculos políticos/legales/institucionales:

- Crecerá el interés de políticos locales para desarrollar oportunidades independientes de la Federación, lo que favorecerá el desarrollo de las energías renovables
- El desincentivo de la CFE para incorporar energías renovables, debido a su obligación de comprar la energía más barata (por kWh), se resuelve modificando la ley reglamentaria de electricidad, posiblemente dando a la CFE libertad de autogestión, lo que podría animarla a incorporar energías renovables con más entusiasmo
- El monopolio del estado para la generación eléctrica podría desaparecer en el corto o mediano plazos
- Habrá un recambio generacional en la cúpula de la CFE, lo que podría traducirse en una mayor apertura para que incorpore energías renovables
- Las energías renovables podrían incorporarse en las perspectivas del sector energético
- Se podría establecer un programa para la incorporación de las energías renovables en las instalaciones de los tres niveles de gobierno.

CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 Discusión

Las acciones y propuestas para reducir y/o eliminar los obstáculos que presenta la adopción de la tecnología de las celdas de combustible y el H₂ son tantas como instituciones, centros de investigación y desarrollo tecnológico, organizaciones, redes, grupos, centros educativos, investigadores independientes, empresas y analistas. Cada una ha desarrollado una propuesta y tiene su propia visión e interés particular en cuanto a la política energética, ambiental, científica y tecnológica del país. Algunas de ellas se contraponen y sus justificaciones son muy variadas. No se pretende en este trabajo calificar a ninguna de ellas.

En muchos sectores cada vez existe una mayor conciencia de la situación que se vive en México y parte de ella ha sido expuesta en este trabajo. Muchas propuestas públicas concentran años de duro trabajo de investigación de los más reconocidos personajes de nuestro país, incluyendo al premio Nobel de Química de 1995, el Dr. Mario Molina, por lo que se pretende señalar algunas de las que parecen más ligadas al contexto nacional y que, de alguna manera, se pueden adoptar como parte de la vida de cualquier interesado en que mejore la situación mexicana.

Determinar el estado del arte de la tecnología de las celdas de combustible y el H₂ es complejo, ya que es un campo cada vez más dinámico (indicativo de que la etapa de comercialización es cercana), además de que existen muchos tipos, visiones, consideraciones y aplicaciones de éstas. Lo importante es que a través del tiempo se han cumplido diversos objetivos de los escenarios de prospectiva en los Estados Unidos, sobre los avances en la tecnología y sus costos, como se discute previamente.

A continuación se discuten algunas acciones que podrían acelerar cambios en México que podrían favorecer la superación de las barreras.

5.1.1 Social

El propósito fundamental de la difusión y educación científica y tecnológica, es lograr una conciencia en la población. La cultura del agua, la del ambiente, la del respeto a los derechos humanos, la del respeto a la propiedad intelectual e industrial, entre otras, así como los valores, son aspectos que se deben inculcar desde edades muy tempranas pero, en ocasiones, los encargados de transmitirlos (padres y maestros) carecen de ellos. Las consecuencias de la falta de educación, se reflejan cotidianamente en la realidad mexicana, en que la piratería se encuentra por doquier y afectando todo el aparato productivo y los servicios.

En términos generales, a la ciencia le han faltado narradores, que contagien al público de la pasión por el conocimiento, del asombro por los descubrimientos y de la maravilla de encontrar la ciencia y la tecnología en la vida diaria. Ha faltado la transmisión entusiasta, emotiva y humana de las grandes hazañas diarias del investigador científico.

El papel de los medios de comunicación es el de ser testigos. Su función de información tendría que reflejar el desarrollo científico y tecnológico, pero no para apoyar a los científicos, ni al Sistema Nacional de Investigadores (SNI), ni a otras entidades, sino para contribuir a mayor transparencia en el manejo público del país y haciendo que ciencia, tecnología e innovación sean más relevantes. Aún no se logran los objetivos del periodismo científico, que puede considerarse como “la comunicación pública de ciencia, tecnología e innovación, que se realiza por los medios de comunicación de masas, con el triple objetivo de: informar al público de los avances científicos y tecnológicos; proporcionar el contexto político, social y cultural de esos nuevos conocimientos y sus posibles repercusiones; y contribuir a crear un pensamiento científico que aliente la conciencia crítica de la población, para que influya en la política científica, con el propósito de lograr el desarrollo integral del país”.

Para aumentar el impacto social de los temas científicos y tecnológicos, medios y profesionales, se debe informar sobre la importancia de la ciencia, tecnología e investigación para el progreso y mejoramiento de la calidad de vida de los Estados y los ciudadanos. ¿Cómo pasar de la economía del Petróleo a la del H₂ si la población mexicana no tiene información al respecto?

5.1.2 Tecnológico

El mayor reto, es la conjunción de esfuerzos, ya que a pesar de la existencia de redes y grupos que involucran y extienden puentes de colaboración entre instituciones e investigadores, generalmente existe una burocracia que tiende a entorpecer la colaboración, aunado a que cada instancia considera que su trabajo es el de mayor relevancia, lo que provoca la duplicidad de esfuerzos y un desperdicio importante de recursos.

Se debe extender la cultura de la protección de la propiedad industrial, ya que en general, los investigadores tienden a publicar sus hallazgos e invenciones, en lugar de protegerlos, con lo que se pierde competitividad al compartir indiscriminadamente el activo más importante: el conocimiento.

Otro reto importante es la dependencia existente del extranjero, ya que las materias primas más importantes para la construcción de las celdas de combustible son de importación. Como son el platino (componente del catalizador) y el Nafión (membrana patentada por DuPont) para las celdas PEM. Además, la inmensa mayoría de la propiedad intelectual de la tecnología de las celdas de combustible pertenece también a extranjeros.

Es insuficiente y carece de promoción la capacidad para hacer el tránsito desde una idea, invención, innovación al mercado, mediante la elaboración de un plan de negocios, la transferencia de tecnología y el financiamiento.

5.1.3 Ecológico

Los problemas ecológicos son especialmente preocupantes, por lo que se deben establecer acciones de emergencia para atacarlos. La población en general ya es testigo del cambio climático y de la manera en que se afecta toda actividad humana. De nada importan los problemas económicos, políticos o sociales si el planeta se convierte en un lugar inhabitable.

Es imperativo aprovechar las oportunidades que ofrece México en función de su territorio. Debe observarse la ventaja que ofrecen las plantas de generación de corriente eléctrica mediante fuentes renovables (limpias y verdes), ya que tienen que ubicarse en el lugar donde se dispone del recurso, utilizar el H₂ como el elemento para almacenar la energía generada, y enviarse a donde se requiera, lo que ya ha sido probado con éxito en otras regiones del mundo.

Lo anterior significa que se pueden establecer plantas generadoras de H₂ en las mismas estaciones dispensadoras (es como si las gasolineras contaran con su propio pozo de petróleo y refinería), lo que reduce costos de infraestructura y operación.

El uso de recursos renovables *limpios* y *verdes* para generar corriente eléctrica, lleva a la posibilidad de obtener recursos energéticos abundantes, disminuyendo el daño al planeta.

5.1.4 Económico

El costo de llevar a cabo los cambios necesarios para adoptar la economía del H₂ son altos, pero de no invertir en un futuro sustentable, los costos serán mucho mayores. Diversos estudios estiman los costos para realizar cambios para revertir el cambio climático y los costos provocados por la generación de condiciones adversas provocadas por la inacción, pero en conjunto, el margen de variación de la evidencia publicada indica que es probable que los costos netos se incrementen con el transcurso del tiempo. Es prácticamente cierto que las estimaciones totales de los costos enmascaren diferencias significativas de los impactos a través de sectores regionales, países y poblaciones. En algunos sitios y entre algunos grupos de personas con elevada exposición, alta sensibilidad, y/o baja capacidad de adaptación, los costos serán significativamente mayores que el total mundial [IPCC, 2007].

Una paradoja que se presenta en las empresas dedicadas a la generación y distribución de electricidad es que inviten al ahorro de energía, es decir, campañas destinadas a que sus usuarios (clientes) utilicen lo menos posible su producto.

5.1.5 Político

La política contribuye al desarrollo de los países y al bienestar de sus ciudadanos cuando permite acuerdos nacionales y regionales en los que se establecen agendas mínimas para el crecimiento y el desarrollo, así como la creación de instituciones que orienten y complementen los esfuerzos para progresar. De esta manera se organiza el desarrollo de un país y se pueden establecer estrategias de crecimiento de largo plazo que le dan certidumbre a todos para invertir, para trabajar, para estudiar e incluso para investigar con el propósito de generar y aplicar el conocimiento en aquellas áreas consideradas como estratégicas para el desarrollo del país en el corto y el mediano plazos.

Continúa en aumento el número de entusiastas que esperan que se alcance el “punto crítico” en el que la sociedad responsable, informada y preparada, forme una mayoría que establezca un nuevo orden político que instaure las reformas que se requieren. Aunque algunos planes y acciones ya se están llevando a cabo para mitigar el cambio climático, resultarán ser insuficientes mientras no se adopte una política de Estado y se llegue a una conciencia nacional e internacional.

Los puntos anteriores se resumen en la tabla 17, junto con elementos que podrían favorecer innovaciones. En el diagrama 3 se muestra un esquema con los actores que deben participar en el sistema promotor de la tecnología de celdas de combustible – H₂.

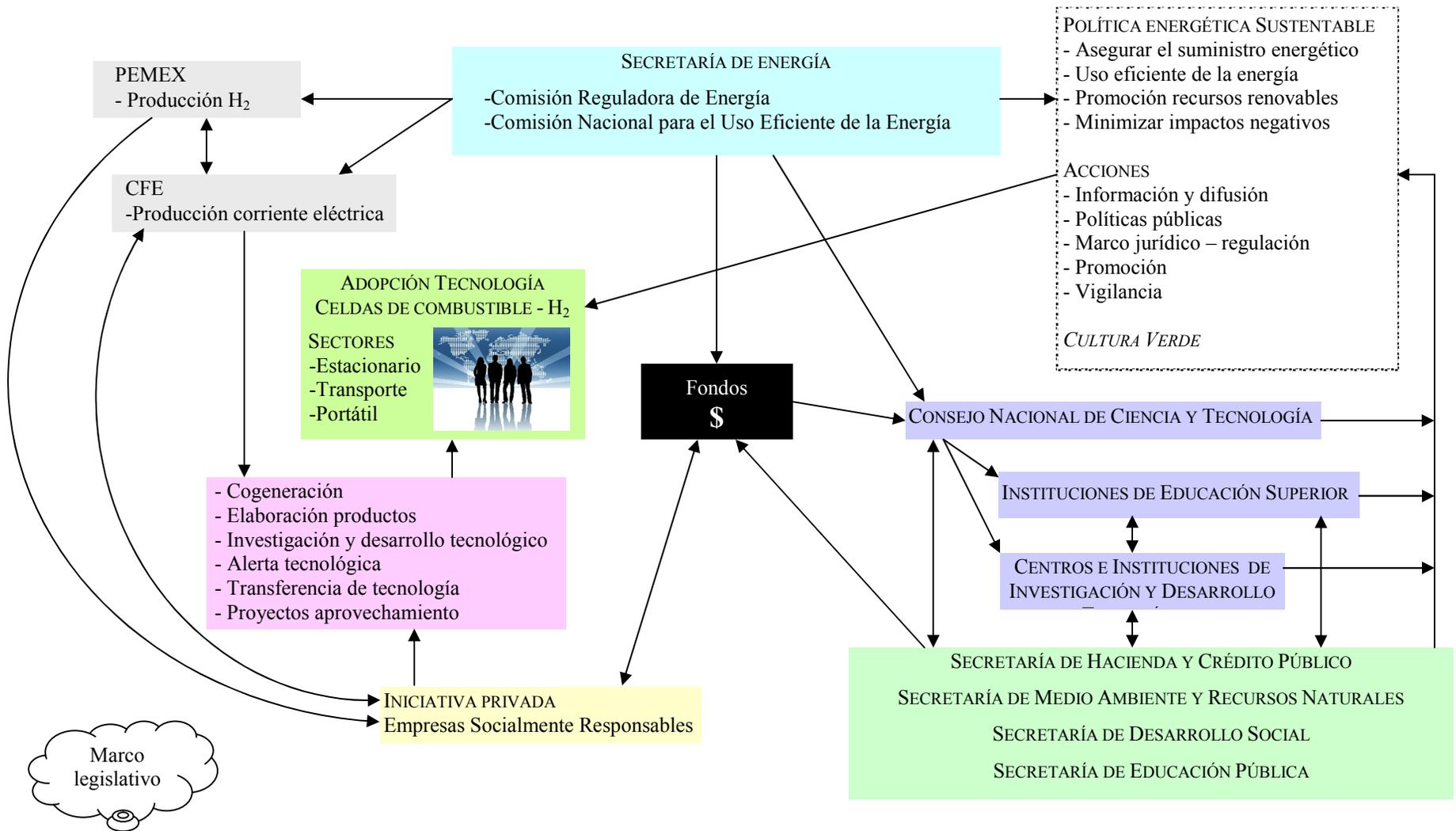
TABLA 17. OBSTÁCULOS Y ELEMENTOS DE RUPTURA QUE ENFRENTAN LAS TECNOLOGÍAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE E HIDRÓGENO PARA SU ADOPCIÓN, ASÍ COMO DE POSIBLES ELEMENTOS QUE PUEDEN PROPICIAR INNOVACIONES. ELABORACIÓN PROPIA (2012).

	OBSTÁCULO PARA LAS TECNOLOGÍAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE – H₂	ELEMENTO DE RUPTURA	POSIBLES ELEMENTOS QUE PROPICIEN INNOVACIONES
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Cultura de la <i>economía del petróleo</i> • Preferencia para cubrir las necesidades urgentes y/o individuales sobre las importantes • Mala calidad de algunos sectores del sistema educativo • Falta de cultura del aprovechamiento responsable de los recursos naturales • Paradigmas negativos de la población en general sobre la seguridad del H₂ • Síndromes BANANA y NIMBY 	<ul style="list-style-type: none"> • Aceptación pública: <ul style="list-style-type: none"> – Cultura de la <i>economía del H₂</i> – Cultura de los recursos energéticos renovables – Preferencia por tecnologías socialmente responsables, limpias y verdes • Sociedad incluyente, preparada y sana • Sistema de derecho confiable y objetivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Difusión masiva de los beneficios de las tecnologías mediante proyectos de demostración en aplicaciones populares • Desarrollo de eventos (cursos, talleres, exposiciones, competencias) de proyectos creativos que empleen celdas de combustible
Tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> • Baja producción y escasos recursos humanos en el área de CyT • Poco apoyo y recursos destinados a actividades de CyT • Poca información sobre el potencial de los recursos energéticos renovables • Baja actividad inventiva y alta tasa de dependencia en la propiedad industrial • Escasos proyectos y recursos destinados al desarrollo tecnológico de celdas de combustible y del aprovechamiento del H₂ • Falta de infraestructura para la producción, almacenamiento y distribución de H₂ requerida para una <i>economía del H₂</i> • Grupos aislados de investigación, duplicidad de esfuerzos • Intermittencia y lejanía de las fuentes de energías renovables • Propiedad industrial e insumos de origen extranjero en su mayoría • Durabilidad y requisitos de desempeño todavía no alcanzados • Validación de la tecnología 	<ul style="list-style-type: none"> • Destinar al menos el 1% del PIB a actividades de CyT • Establecimiento de cursos curriculares sobre propiedad industrial y recursos tecnológicos en los diversos niveles educativos • Promoción del uso de recursos renovables • Fomento a proyectos que puedan ser acreedores de apoyos • Desarrollo de proyectos de reingeniería de celdas de combustible – H₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de proyectos empresa-gobierno que desarrollen aplicaciones con celdas de combustible • Ampliación de la plataforma tecnológica • Desarrollo de tecnología y recursos humanos propios • Mayor cultura sobre la protección de la propiedad industrial
Económico	<ul style="list-style-type: none"> • Poco interés de los sectores público y privado • Los energéticos primarios convencionales tienen precios relativamente bajos y cuentan con subsidios • Las energías renovables continúan con precios elevados • Los precios de los energéticos no reconocen ni valoran los costos ambientales y de salud de las fuentes energéticas tradicionales • Prevalen los intereses de los sistemas centralizados • En general, las energías renovables requieren de inversiones iniciales mayores, aunque sus costos de operación sean menores • Incertidumbre para la inversión dentro del ambiente macroeconómico global 	<ul style="list-style-type: none"> • Financiamiento para actividades de prospección y caracterización de los recursos energéticos renovables • Reducción los precios unitarios de producción de las tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables • Esquemas de promoción económica para las energías renovables por parte del Estado • Incorporación de las externalidades ambientales y de salud a los precios de los energéticos podría volver a las energías renovables económicamente competitivas 	<ul style="list-style-type: none"> • Independencia energética • Suministro confiable de energía y de alta calidad • Incremento en la productividad

TABLA 17. OBSTÁCULOS Y ELEMENTOS DE RUPTURA QUE ENFRENTAN LAS TECNOLOGÍAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE E HIDRÓGENO PARA SU ADOPCIÓN, ASÍ COMO DE POSIBLES ELEMENTOS QUE PUEDEN PROPICIAR INNOVACIONES. ELABORACIÓN PROPIA, 2012. (CONTINUACIÓN)

	OBSTÁCULO PARA LAS TECNOLOGÍAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE – H₂	ELEMENTO DE RUPTURA	POSIBLES ELEMENTOS QUE PROPICIEN INNOVACIONES
Ecológico	<ul style="list-style-type: none"> • La sobreexplotación de los mantos acuíferos • La baja productividad del campo (que utiliza el 70% del agua en México) • Una caída en fuentes de energía renovables, resultado de un retraso del sector energético • Grandes impactos ambientales por de centrales eléctricas convencionales 	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas más eficientes y eficaces para incentivar tecnologías limpias, como en transporte público y de bajo impacto ecológico • Mejora de programas de verificación vehicular e incentivos para reconvertir el parque vehicular 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultura <i>verde</i>
Político	<ul style="list-style-type: none"> • Desconocimiento y desconfianza en la tecnología por parte del sector político • Discrecionalidad en trámites y permisos de interconexión, que frecuentemente imponen requerimientos desproporcionados e injustos con cargo al desarrollador • Los promotores de las energías renovables tienen poco peso político • Existe un monopolio del estado en la generación de energía eléctrica • Existe un vacío legal en torno al aprovechamiento de las energías • Falta de regulaciones regionales sobre el uso de suelos y el acceso a recursos energéticos • La ley reglamentaria de electricidad indica que CFE debe generar al menor costo, por lo tanto, CFE no compra kWh renovables • Dificultades para la participación privada en la generación de energía eléctrica • Las instituciones del sector energético son rígidas frente al desarrollo de nuevas fuentes porque están dominadas por quienes se benefician con el “status quo” • El marco institucional para la promoción y aplicación de las energías renovables es muy limitado • La CFE prefiere desarrollar las tecnologías para el aprovechamiento de fuentes tradicionales • La política energética y las perspectivas correspondientes están basadas en combustibles fósiles. • La planeación energética está basada en “tecnología de mínimos costos”. • Existe falta de sinergia entre los planes de electrificación rural y el desarrollo de fuentes renovables. • En el marco de toma de decisiones actual (que incluye subsidios, hábitos de consumo, costumbres sindicales, etc.), las energías renovables no son competitivas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reestructuración de la normatividad general, referente a la política energética • Reestructuración de las políticas internas de los sectores industrial, comercial y residencial • Gobierno eficiente y eficaz • Las energías renovables podrían incorporarse en la política, planeación y prospectiva del sector energético • Se podría establecer un programa para la incorporación de las energías renovables en las instalaciones de los tres niveles de gobierno • Cambio del marco de toma de decisiones • Apoyos gubernamentales a sectores que empleen tecnologías limpias 	<ul style="list-style-type: none"> • Fundación de organizaciones públicas y privadas que promuevan, incentiven, asesoren, apoyen y/o desarrollen tecnologías limpias en los sectores energéticos

DIAGRAMA 3. SISTEMA PROMOTOR PARA LA TECNOLOGÍA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE – H₂, PRINCIPALES ACTORES
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, 2012



5.2 Conclusiones

La prospectiva en nuestro país no es tan alentadora como en Estados Unidos, en que esperan que exista un mercado en crecimiento de celdas de combustible para el 2015. Aunque México tiene un marcado papel de seguidor tecnológico, no espera alcanzar la comercialización de la tecnología de celdas de combustible y el H₂ antes del 2025, además de que se requiere la aprobación de reformas estructurales que incluyan una reforma energética.

Existen muchos retos tecnológicos y barreras de todo tipo (tabla 17), pero cada vez están más cerca de establecerse las condiciones para que se adopte la *economía del hidrógeno*, lo que se logrará cuando las celdas de combustible alcancen el nivel de economías de escala mediante su producción en serie.

Las fuerzas conductoras que nos encaminan hacia la *economía del hidrógeno* son: la necesidad de reducir las emisiones de CO₂, aumentar la seguridad en el suministro de energía (disponibilidad y diversidad), mejoramiento y estabilización del precio que suponen los energéticos y, el empuje que brindan las nuevas tecnologías (conductor económico).

Parece inevitable que la tecnología del par H₂-celdas de combustible llegue a nuestro país, ya sea por la condición de seguidor tecnológico, o por la generación de conciencia, investigación y desarrollo que está tomando lugar en México.

APÉNDICE

Patentes concedidas: Enero de 1980 a Septiembre de 2005. Fuente: IMPI

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/a/2000/010022 7817	CELDA DE COMBUSTIBLE. CELDA DE COMBUSTIBLE DE OXIDO SOLIDO MONOLITICO Y UN METODO PARA SU CONSTRUCCION	H01M8/10 H01M-008/012 H01M-008/024
PA/a/1999/006336	CELDA DE COMBUSTIBLE DE REPLICA SUPERFICIAL PARA UNIDAD DE PODER ELECTRICA DE MICROCELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/004
PA/a/1998/002189	CELDA DE COMBUSTIBLE DE REPLICA SUPERFICIAL QUE TIENE UNA MEMBRANA REFORZADA CON FIBRA	H01M4/86 H01M4/88
PA/A/2002/001727	CELDA DE COMBUSTIBLE QUE TIENE CAPACIDADES MEJORADAS DE ADMINISTRACION DE PRODUCTO DE CONDENSACION Y DE REACCION.	H01M8/04
PA/A/2002/001726	CELDA DE COMBUSTIBLE Y PLACA BIPOLAR PARA UTILIZARSE CON LA MISMA.	B01J31/18 B01J37/34 C07C253/10 C07F15/04
9304706 182176	CELDA DE HIDROGENO Y OXIGENO COMBUSTIBLES CELDA QUEMADORA MEJORADA PARA MATERIALES COMBUSTIBLES SOLIDOS DE DESECHO	F02B-043/008 F23G-007/002 F23D-011/010
PA/a/2001/005070 194945	DISEÑO DE PLACA BIPOLAR DE LAMINA METALICA PARA CELDAS COMBUSTIBLES DE MEMBRANA DE ELECTROLITO POLIMERICA. DISPOSITIVO CALENTADOR MEJORADO PARA HORNOS UTILIZADOS EN EL COCIMIENTO DE LOS ANODOS DE CARBON PARA CELDAS DE ELECTROLISIS DE ALUMINIO	H01M8/02 F27B-013/012 C04B-035/052
9100651	JUNTA PARA UNA PILA O CELDA DE COMBUSTIBLE DE CARBONO FUNDIDO	H01M-008/004
PA/a/1999/007923	MATERIALES COMPUESTOS DE POLIMERO Y METODOS PARA HACER Y USAR LOS MISMOS.	B01J23/00 B01J23/16 B32B27/20 B32B5/28 C ...
PA/a/1998/003975 197801 195597	MATERIALES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO QUE TIENEN UNA ALTA DENSIDAD DE SITIOS DE ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO USABLES NO CONVENCIONALES MEJORAS A UNA PILA DE COMBUSTIBLE MEJORAS EN APARATO DE COMPRESION DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	C22C14/00 C22C16/00 C22C19/03 H01M-008/004 H01M-002/000
9408850	MEJORAS EN CELDAS INTERNAS COLECTORAS DE PARTICULAS PARA COMBUSTION CIRCULANTE DE LECHO FLUIDIFICADO	F22B-001/000
PA/a/1999/001811 195872 195378	MEJORAS EN EL USO DE MICROCAMPOS MAGNETICOS PARAQUEMAR COMBUSTOLEO. MEJORAS EN EMSAMBLE DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MEJORAS EN ENSAMBLE DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE CON TRANSPORTE DE ELECTROLITO	F02M27/04 F02M7/00 H01M-008/002 H01M-008/024
198283	MEJORAS EN METODO PARA PRODUCIR UN ELECTRODO PARA CELDA DE COMBUSTIBLE	C25B-011/004
196869	MEJORAS EN PILA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE ENFRIADAS CON GAS	H01M-010/050
8832	MEJORAS EN UN ENSAMBLE DE COMBUSTIBLE NUCLEAR	G21C-005/000
195873	MEJORAS EN UN PAQUETE DE CELDAS DE COMBUSTIBLE PARA USARSE EN LA FORMACION DE UNA PILA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	H01M-008/024
190162	MEJORAS EN UNA DISPOSICION ESTRUCTURAL DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ELECTROLITO SOLIDO	H01M-008/010
174923	MEJORAS EN UNIDAD DE CALENTAMIENTO DE FLUIDOS	F22D-001/000
PA/a/1999/006005 9202306	METODO Y DISPOSITIVOS PARA LA PRODUCCION DE HIDROGENO MEDIANTE REFORMADOR DE PLASMA. OBTURADOR EXTREMO PARA BARRA DE LONGITUD PARCIAL Y SUJETADORES PARA EL MISMO	C01B-003/034 G21C-003/335 G21C-019/105

Patentes concedidas: Enero de 1980 a Septiembre de 2005. Fuente: IMPI (continuación)

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/A/2001/005063	PLACA COLECTORA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y METODO DE FABRICACION.	H01M8/10
PA/A/1998/003614	PLACA SEPARADORA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES.	H01M8/02 H01M8/24
9406447	PLANTA DE ENERGIA MODULAR PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA DESDE LA ENERGIA SOLAR	H01M-008/006
PA/a/1998/005024	PROCEDIMIENTO CONTINUO PARA PRODUCIR CUERPOS MIXTOS DE MEMBRANAS Y ELECTRODOS (MEA).	B32B-031/000 C25B-011/012 H01M-008/010
PA/a/1999/003137	PROCEDIMIENTO PARA PRODUCIR PELICULAS POLIMERICAS PARA UTILIZARSE COMO CELDAS DE COMBUSTIBLE.	B29C-067/020 C08J-005/022 H01M-008/010
9603464	PROCESO PARA PREPARAR PLACAS SEPARADORAS PARA CELULAS O CELDAS COMBUSTIBLES DE CARBONATO FUNDIDO Y LAS PLACAS SEPARADORAS DE ACUERDO A ESTE PROCESO	H01M-008/002
PA/a/1999/005118	PROCESO QUE INTEGRA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE OXIDO SOLIDO Y UN REACTOR DE TRANSPORTE DE IONES	H01M8/10
9101780	SEPARADOR MIXTO CON UNA REJILLA DE INCONEL Y UNA BANDA DE ZIRCALOY	G21C-003/034
9100653	SISTEMA DE CELDA COMBUSTIBLE CON REFORMACION INTERNA QUE EMPLEA UNA ALIMENTACION DE METANO	H01M-008/006
9604282	SISTEMA DE INYECCION DE COMBUSTIBLE PARA UNA HERRAMIENTA IMPULSADA POR COMBUSTION	B25C-001/004 B25C-001/008
PA/a/1999/002588	SISTEMA PARA SUMINISTRO DE ENERGIA PARA CELDA DE COMBUSTIBLE	B60L11/18 H01M16/00 H01M8/04
9200262	SISTEMA SUPERVISOR DE LA ESCALA DE POTENCIA DE OSCILACION Y METODO PARA REACTORES NUCLEARES	G21C-017/012
PA/a/1997/000986	TURBINA DE ULTRA-ALTA EFICIENCIA Y COMBUSTION DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	F01K-023/006 H01M-008/002 H01M-008/004 H ...
194197	UN METODO MEJORADO PARA REMOVER UN ELECTROLITO DE UNA CORRIENTE GASEOSA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE	H01M-008/000
92000275	UNIDAD DE REFORMACION PARA CELDAS COMBUSTIBLES ARREGLADAS EN UNA PILA	H01M-008/004

Solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005: 157. Fuente IMPI.

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/a/2002/004529	ALEACIONES CON ALTA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO QUE HACEN POSIBLE UN ECOSISTEMA BASADO EN EL HIDROGENO.	C01B-006/024 C22C-023/002 H01M-008/018
9202305	ALETAS DE REMOLINO EN SEPARADOR DE INCONEL.	G21C-003/000
PA/a/2002/000547	APARATO ALIMENTADOR DE PARTICULAS PARA FUENTE DE ENERGIA ELECTROQUIMICA Y METODO PARA HACER EL MISMO.	H01M12/06 H01M2/40 H01M6/50 H01M8/04 H01 ...
PA/A/2003/010397	APARATO Y METODO PARA FORMAR SELLOS EN CELDAS DE COMBUSTIBLE Y PILAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M8/02
PA/a/2001/009832	AUTOMOVIL ULTRA ANGOSTO ESTABILIZADO CON LASTRE.	B60K-001/000 B60K-016/000 B62D-061/006
PA/a/2003/007162	BASE QUIMICA NOVEDOSA PARA REFRIGERANTE/ANTICONGELANTE DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE MOTOR DE CELDAS COMBUSTIBLES.	C09K5/10 H01M8/04
9306366	BATERIA DE CELDA DE FLUJO DE MEMBRANA.	H01M-010/000

Solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005: 157. Fuente IMPI.
(continuación)

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/A/2003/002659	CALENTADOR/HUMIDIFICADOR DE CONTACTO PARA SISTEMAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	F28C3/02
PA/A/2000/012324	CELDA CERAMICA DE COMBUSTIBLE.	H01M8/12
PA/a/2000/009507	CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/002 H01M-008/010
PA/a/2000/012281	CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/010
PA/a/2000/010022	CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/010
PA/a/2002/009033	CELDA DE COMBUSTIBLE ALCALINA NOVEDOSA.	C01B6/24 H01M4/58 H01M4/86 H01M8/00
PA/a/2001/002724	CELDA DE COMBUSTIBLE CON AUTOHUMIDIFICACION.	H01M-002/000 H01M-008/004
PA/a/2002/004950	CELDA DE COMBUSTIBLE DE ELECTROLITO DE POLIMERO.	H01M4/86 H01M8/02 H01M8/10
PA/a/2001/001262	CELDA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE POLIMERO ELECTOLITO.	H01M-000/00000
PA/A/2005/008828	CELDA DE COMBUSTIBLE DE OXIDO SOLIDO, DE ELECTRODO POROSO Y METODO PARA PRODUCIR LA MISMA.	B05D5/12 H01M4/86 H01M4/90 H01M4/96 H01M ...
9906336	CELDA DE COMBUSTIBLE DE REPLICA SUPERFICIAL PARA UNIDAD DE PODER ELECTRICA DE MICROCELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/004
9802189	CELDA DE COMBUSTIBLE DE REPLICA SUPERFICIAL QUE TIENE UNA MEMBRANA REFORZADA CON FIBRA.	H01M-004/086
PA/a/2000/012320	CELDA DE COMBUSTIBLE MEJORADA Y METODO PARA CONTROLAR LA MISMA.	H01M-008/004
9605871	CELDA DE COMBUSTIBLE QUE INCORPORA MEMBRANA CONDUCTORA DE IONES NOVEDOSA.	C08J-005/022
PA/a/2002/001727	CELDA DE COMBUSTIBLE QUE TIENE CAPACIDADES MEJORADAS DE ADMINISTRACION DE PRODUCTO DE CONDENSACION Y DE REACCION.	H01M000/00000
PA/A/2004/006320	CELDA DE COMBUSTIBLE QUE TIENE UNA CAPA METALIZADA DE DIFUSIÓN DE GAS.	H01M4/86
PA/a/2002/001726	CELDA DE COMBUSTIBLE Y PLACA BIPOLAR PARA UTILIZARSE CON LA MISMA.	H01M8/00
9304706	CELDA DE HIDROGENO Y OXIGENO COMBUSTIBLES.	F23C-003/000
PA/a/2000/003279	CELDA SOLIDA DE COMBUSTIBLE DE OXIDO Y REFORMADOR INTEGRADOS.	H01M-008/006 H01M-008/012
PA/A/2004/008511	CELDAS COMBUSTIBLES DE ALTO DESEMPEÑO.	H01M8/00
PA/a/2001/004162	COLECTOR DE GAS COMPRIMIDO.	B67D-005/004
PA/a/2002/009557	COMBUSTION DE ETAPAS MULTIPLES PARA PROCESADO DE COMBUSTIBLE, PARA UTILIZARSE CON CELDA DE COMBUSTIBLE.	C01B000/00000
PA/A/2004/007398	COMPONENTES DE CELDA DE COMBUSTIBLE METALICO RECUBIERTOS CON SILANO Y METODOS DE FABRICACION.	H01M000/00000
PA/a/2003/001375	COMPOSICION DE AISLAMIENTO Y SELLADO.	H01M8/00 C08G-059/000
PA/a/2000/003780	COMPOSICION DE MOLDEO CONDUCTORA TERMOFIJADA Y METODO PARA PRODUCIR LA MISMA.	C08K-011/000 C08K-003/004 C ...
PA/a/2002/000789	COMPOSICION FLUIDA ADECUADA PARA LA PRODUCCION Y REPARACION DE MEMBRANAS DE INTERCAMBIO IONICO.	C08L27/12 C08L27/18
PA/A/2003/005826	COMPOSICIONES DE COMBUSTIBLE LIQUIDO PARA CELDAS ELECTROQUIMICAS DE COMBUSTIBLE.	H01M000/00000
PA/A/2004/005559	COMPOSICIONES DE EMULSIÓN DE ÉSTER DE ALQUILO ALCOXILADO Y ALCOHOL PARA ARRANQUE DE REFORMADOR DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	C10L1/18 C10L1/32 H01M8/06 H01M8/22

Solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005: 157. Fuente IMPI.
(continuación)

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/A/2004/005798	COMPOSICIONES EN EMULSIÓN DE ALQUIL SORBITANO PARA EL ARRANQUE DE REFORMADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	C10L1/32
PA/A/2004/006397	COMPOSICIONES EN EMULSIÓN DE ALQUIL-AMINA ETOXILADA, PARA EL ARRANQUE DEL REFORMADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	C10L1/32
PA/A/2004/005982	COMPOSICIONES EN EMULSIÓN DE ALQUILAMINAS ETOXILADAS PARA EL ARRANQUE DE UN REFORMADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	C10L1/32
PA/A/2004/006219	COMPOSICIONES EN EMULSIÓN DE TRIAZINA ALCOXILADA PARA EL ARRANQUE DE LOS REFORMADORES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	C10L000/00000
PA/A/2004/005900	COMPOSICIONES EN MICROEMULSIÓN PARA EL ARRANQUE DE UN REFORMADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	C01B3/26 H01M8/06
9400178	COMPUESTO PARA UTILIZARSE EN UN ELECTROLITO Y ELECTROLITO POLIMERICO SOLIDO QUE LO INCLUYE.	C07D-319/002
PA/A/2003/002658	CONDENSADOR/SEPARADOR INTEGRADO PARA GASES DE DESCARGA DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	B01D53/92
PA/a/2003/006225	CONTROL DE CAMBIO DE TRANSMISION CON CONTROL DE TORSION DEL MOTOR.	F02D41/00
PA/a/2002/000712	CONTROLADOR DE SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-002/000 H01M-002/002 H01M-008/002 H ...
PA/a/2001/005070	DISEÑO DE PLACA BIPOLAR DE LAMINA METALICA PARA CELDAS COMBUSTIBLES DE MEMBRANA DE ELECTROLITO POLIMERICA.	H01M8/02
PA/a/2001/013140	DISPOSITIVO Y METODO PARA PROPORCIONAR UN FLUJO DE HIDROGENO PURO PARA UTILIZARSE CON CELDAS DE COMBUSTIBLE.	B01J-008/004
9900183	ELECTRODO DE DIFUSION DE GAS.	H01M-008/010 H01M-004/062
PA/a/2002/003503	ELECTRODO ELECTROQUIMICO PARA CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-004/080 H01M-004/086
PA/a/2002/012234	ELECTRODO PARA CELDA DE COMBUSTIBLE DE GRAFITO FLEXIBLE PERMEABLE A LOS FLUIDOS.	H01M02/00 H01M02/22
9802670	ESTRUCTURAS DE CAMPO DE FLUJO PARA ENSAMBLES DE ELECTRODO DE MEMBRANA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/002
PA/A/2002/006605	ESTRUCTURAS GENERADORAS DE CAPILARIDAD PARA EL CONTROL DE AGUA Y/O COMBUSTIBLE EN CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M8/04 H01M8/10
PA/a/2001/008345	FILTRO DE QUEMADOR RADIANTE.	F23D14/12
PA/a/2001/005148	GASIFICACION DE LOS BIO-SEDIMENTOS.	C10L-005/046 C10L-005/048
9810491	GENERADOR DE CELDA DE COMBUSTIBLE DE OXIDO SOLIDO, CON CONFIGURACIONES REMOVIBLES DE APILAMIENTO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MUDULARES.	H01M-008/024
9807059	GENERADORES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MONO CONTENEDOR AUTOENFRANTES Y PLANTAS DE ENERGIA QUE USAN UN ARREGLO DE TALES GENERADORES.	H01M-008/024
PA/a/2003/007131	GEOMETRIAS DE PLACA DE CAMPO DE FLUJO.	C25B9/00 C25B9/04 H01M8/02
PA/a/2003/007132	GEOMETRIAS DE PLACA DE CAMPO DE FLUJO.	C25B9/00 C25B9/04 H01M8/02
PA/A/2003/000238	HERRAMIENTA SUJETADORA CON ADAPTADOR DE SELLO DE VASTAGO PARA UNA VALVULA DE MEDICION DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE AUXILIR..	B67B5/00
PA/a/2003/007454	HUMIDIFICACION DE CORRIENTES DE REACTIVO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M8/04

Solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005: 157. Fuente IMPI.
(continuación)

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/A/2005/000500	INYECCION DIRECTA DE AGUA DE CELDA DE COMBUSTIBLE	H01M8/00
PA/a/2000/008492	IONOMEROS SUBSTANCIALMENTE FLUORADOS.	C07C-311/048 C07C-317/018 C07C-317/044 C ...
9100651	JUNTA PARA UNA PILA O CELDA DE COMBUSTIBLE DE CARBONATO FUNDIDO.	H01M-008/000
9202081	MATERIAL CATALIZADOR MEJORADO.	B01J-023/040
PA/a/2001/001261	MATERIAL DE CAPA ELECTRICAMENTE CONDUCTORA.	C08K-007/006 H01B-001/024 H01M-004/096 H ...
9807143	MATERIAL DE ELECTRODO DE AIRE ESTABLE DE BAJO COSTO PARA CELDAS ELECTROQUIMICAS DE ELECTROLITO DE OXIDO SOLIDO DE ALTA TEMPERATURA.	H01M-004/088
PA/a/2000/0000868	MATERIAL MIXTO FLEXIBLE DE GRAFITO.	H01M-008/002
PA/a/2002/009032	MATERIAL Y CELDA DE COMBUSTIBLE COMPUESTOS DE ALMACENAJE DE HIDROGENO CATALITICO QUE EMPLEA EL MISMO.	H01M4/86
9907923	MATERIALES COMPUESTOS DE POLIMERO Y METODOS PARA HACER Y USAR LOS MISMOS.	B01J-023/000
9803975	MATERIALES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO QUE TIENEN UNA ALTA DENSIDAD DE SITIOS DE ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO USABLES NO CONVENCIONALES.	C22C-014/000
PA/a/2003/002783	MEDICION DE IMPEDANCIA DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	G01R31/36
PA/a/2001/012358	MEDIOS PARA DETECTAR Y MEDIR LA CONCENTRACION DE ACETILENO DISUELTO EN UN FLUIDO.	G01N-027/049
9901811	MEJORAS EN EL USO DE MICROCAMPOS MAGNETICOS PARA QUEMAR COMBUSTOLEO.	F23C-011/002
PA/a/2003/009187	MEMBRANA CONDUCTORA DE PROTONES Y EL USO DE ESTA.	B05D3/00 C08G73/00 C08J5/00 C08J7/00 C08 ...
PA/a/2003/009184	MEMBRANA CONDUCTORA DE PROTONES Y EL USO DE LA MISMA.	B05D3/00 C08G73/00 C08J5/00 C08J7/00 C08 ...
PA/A/2003/000904	MEMBRANA PERMEABLE AL HIDROGENO PARA SU USO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE, Y SISTEMA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE UN REFORMADO PARCIAL QUE TIENE CATALIZADORES DE REFORMACION EN EL COMPARTIMIENTO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE DEL ANODO.	H01M8/10
PA/A/2004/005696	MEMBRANAS BIOCOMPATIBLES DE COPOLIMEROS EN BLOQUE Y CELDAS DE COMBUSTIBLE PRODUCIDAS CON ELLAS.	H01M8/04
PA/A/2004/005698	MEMBRANAS BIOCOMPATIBLES ESTABILIZADAS DE COPOLIMEROS EN BLOQUE Y CELDAS DE COMBUSTIBLE PRODUCIDAS CON ELLAS.	H01M8/16
PA/A/2004/005694	MEMBRANAS BIOCOMPATIBLES Y CELDAS DE COMBUSTIBLE PRODUCIDAS CON ELLAS.	G01N27/26
9805237	MEMBRANAS DE MEZCLA BASADAS EN POLI (OXIDO FENILENO) SULFONADO PARA CELDAS ELECTROQUIMICAS POLIMERICAS MEJORADAS.	H01M-008/010
PA/a/2001/003880	MEMBRANAS QUE CONTIENEN CETONA POLIETER SULFONADA Y OTRO POLIMERO, PROCEDIMIENTO PARA SU PRODUCCION, Y USO DE LAS MISMAS.	B01D-061/042 B01D-061/044 B01D-071/052 B ...
9706919	METODO PARA ABASTECER DE COMBUSTIBLE Y OPERAR LA PARTE CENTRAL DE UN REACTOR NUCLEAR.	G21C-007/008
PA/a/2003/008092	METODO PARA PRODUCIR UNA MEMBRANA ELABORADA DE POLIMERO CON PUENTES Y UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.	C08J5/22 H01M8/10
PA/A/2003/008155	METODO PARA UTILIZAR LAS SALIDAS ELECTRICAS DE VEHICULOS IMPULSADOS POR CELDA DE COMBUSTIBLE.	B60L11/18

Solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005: 157. Fuente IMPI.
(continuación)

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
9501807	METODO Y APARATO PARA LA DETECCION IN SITU DE UN ENSAMBLE DE COMBUSTIBLE NUCLEAR DEFECTUOSO.	G21C-003/000
PA/A/2004/000990	METODO Y APARATO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE BATERIAS / CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M12/06
PA/A/2004/007070	MÉTODO Y APARATO PARA MONITOREAR RESISTENCIAS DE SERIES EQUIVALENTE Y PARA DERIVAR UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M8/04
PA/A/2004/011192	MÉTODO Y APARATO PARA VAPORIZAR COMBUSTIBLES PARA UN SISTEMA REFORMADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M8/00
PA/a/2001/002845	METODO Y DISPOSITIVO ELECTROCATALITICO PARA ELIMINAR MONOXIDO DE CARBONO DE UN GAS RICO EN HIDROGENO.	B01D-053/032 C01B-003/050 C01B-003/058 C ...
9906005	METODO Y DISPOSITIVOS PARA LA PRODUCCION DE HIDROGENO MEDIANTE REFORMADOR DE PLASMA.	C01B-003/034
9204745	MONTAJE DE BARRAS DE COMBUSTIBLE PARA REACTOR NUCLEAR DE AGUA HIRVIENTE CON DISPOSICION ESPACIADORA ENTRE LAS BARRAS DE COMBUSTIBLE.	G21C-003/036
PA/A/2004/009372	MONTAJE DE COMPRESIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M8/00 H01M8/24
PA/a/2000/012860	MONTAJE HERMETICO A GAS COMPUESTO DE UNA PLAC BIPOLAR Y UNA UNIDAD DE ELECTRODO-MEMBRANA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA ELECTROLITICA, POLIMERICA.	H01M-004/000
PA/A/2003/009231	MONTAJES Y SISTEMAS DE FILTRO PARA AIRE DE ENTRADA PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE.	B01D53/04 F02M35/14 H01M8/04 H01M8/06
PA/A/2003/012036	MÚLTIPLE PARA UN SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M8/04 H01M8/24
9810695	PELICULAS DECORATIVAS Y HOJAS LAMINADAS CONFORMABLES CON CAPAS DUALES DE PELICULA PROTECTORA.	C09J-007/002
PA/a/2003/011703	PELICULAS POLIMERICAS BASADAS EN POLIAZOL.	C08J5/18
PA/a/2001/003413	PLACA BIPOLAR PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/002
PA/a/2001/005063	PLACA COLECTORA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y METODO DE FABRICACION.	H01M-008/010
PA/a/2002/000522	PLACA COLECTORA DE CONDUCTIVIDAD MEJORADA PARA CELDA DE COMBUSTIBLE Y METODO DE FABRICACION.	B29C-059/002 B29C-070/064 H01M-002/016 H ...
PA/a/2003/010396	PLACA DE CAMPO DE FLUJO PARA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE Y MONTAJE DE CELDA DE COMBUSTIBLE QUE INCORPORA LA PLACA DE CAMPO DE FLUJO.	H01M8/02 H01M8/24
9803614	PLACA SEPARADORA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES.	H01M-004/000
PA/a/2002/000159	PLACAS DE CAMPO DE FLUJO.	H01M8/02
PA/a/2000/000277	PLANTA DE ENERGIA DE CELDA DE COMBUSTIBLE CON REFORMADOR AUTOTERMICO ELECTROQUIMICO.	H01M8/06
9406447	PLANTA DE ENERGIA MODULAR PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA DESDE LA ENERGIA SOLAR.	H02N-003/000
PA/a/2004/002161	POLIMEROS HIDORFILICOS Y SUS USOS EN CELDAS ELECTROQUIMICAS.	C08F226/00 C08F26/00 C25B9/02 H01B1/12 H ...
9805024	PROCEDIMIENTO CONTINUO PARA PRODUCIR CUERPOS MIXTOS DE MEMBRANAS Y ELECTRODOS (MEA).	H01M-008/010
9903137	PROCEDIMIENTO PARA PRODUCIR PELICULAS POLIMERICAS PARA UTILIZARSE COMO CELDAS DE COMBUSTIBLE.	C08J-005/022
PA/a/2003/009451	PROCESADOR DE COMBUSTIBLE INTEGRADO, PILA DE CELDA DE COMBUSTIBLE Y OXIDADOR DE GAS RESIDUAL CON REMOCION DE DIOXIDO DE CARBONO.	C01B3/32 C01B3/38 C01B3/56 C01B3/58 H01M ...
PA/a/2001/008839	PROCESO DE FUSION CONTINUA PARA FABRICAR ARTICULOS IONICAMENTE CONDUCTIVOS.	B29C-047/000 B29K-027/012 C08J-005/018 C ...

Solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005: 157. Fuente IMPI.
(continuación)

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/a/2001/004992	PROCESO DE MEZCLADO Y MOLDEO PARA PLACAS COLECTORAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/010
9603464	PROCESO PARA PREPARAR PLACAS SEPARADORAS PARA CELULAS O CELDAS COMBUSTIBLES DE CARBONATO FUNDIDO Y LAS PLACAS SEPARADORAS DE ACUERDO A ESTE PROCESO.	H01M-002/016
9905118	PROCESO QUE INTEGRA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE OXIDO SOLIDO Y UN REACTOR DE TRANSPORTE DE IONES.	H01M-008/010
PA/a/2000/008835	PURIFICACION DE GAS DE PROCESO Y SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	B01D-053/022
PA/A/2002/012342	RECUPERACION DE AGUA EN EL LADO DEL ANODO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES.	H01M8/04
PA/A/2002/012343	RECUPERACION DE AGUA, PRINCIPALMENTE EN EL LADO DEL CATODO, DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES.	H01M8/04
9703140	REGULADOR DE PRESION DE COMBUSTIBLE GASEOSO, DE BAJA PRESION PARA MOTORES DE COMBUSTIBLE GASEOSO TURBOCARGADOS.	F02M-063/000
PA/A/2002/006573	RESERVORIO DE COMBUSTIBLE LIQUIDO PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE.	B65G3/00
PA/a/2000/002738	SELLO ELECTRICAMENTE CONDUCTOR PARA ELEMENTOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/002 H01M-008/024
9402727	SEPARADOR DE CAIDA DE PRESION REDUCIDA PARA GRUPOS DE BARRAS DE COMBUSTIBLE DE REACTOR DE AGUA HIRVIENTE.	G21C-001/000
PA/A/2004/003542	SISTEMA ADAPTADOR DE CELDA DE COMBUSTIBLE PARA HERRAMIENTAS DE COMBUSTION.	B25C1/08
PA/a/2002/011113	SISTEMA ADAPTADOR PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE PARA HERRAMIENTAS DE COMBUSTION.	B25C1/04
PA/a/2001/004164	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE DE GAS COMPRIMIDO.	B60P-003/022
PA/a/2001/004161	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE DE GAS COMPRIMIDO, DE BAJO COSTO.	B65D8/00 B67D5/04
PA/a/2002/009375	SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE CON MANEJO DE CARGA.	B60K1/00 B60K6/00 B60L1/00 B60L9/00 H01M ...
9100653	SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE CON REFORMACION INTERNA, QUE EMPLEA UNA ALIMENTACION DE METANO.	H01M-008/000
PA/a/2001/010724	SISTEMA DE CELDAS COMBUSTIBLE TOLERANTE A LA CONGELACION Y METODO.	H01M-008/000
PA/a/2002/011076	SISTEMA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE QUE TIENE UN ELEMENTO DESGASIFICADOR REEMPLAZABLE, PARA PURIFICAR EL SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE.	B01D53/04 H01M8/04
PA/a/2002/000995	SISTEMA DE DISTRIBUCION DE ALIMENTACION VOLATIL Y SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE COMBUSTIBLE QUE INCORPORA EL MISMO.	C01B-003/022
PA/a/2003/010855	SISTEMA DE ENERGIA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.	H01M8/10 H01M8/24
PA/a/2000/003305	SISTEMA DE ENERGIA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE CON MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES.	H01M-008/010 H01M-008/024
PA/a/2003/008471	SISTEMA DE ENERGIA DE CICLO COMBINADO DE COMBUSTIBLE DE FOSILES.	F02C6/00 H01M8/06
PA/a/2003/003772	SISTEMA DE ENERGIA DE FUNCIONES MULTIPLES, QUE SE PUEDEN OPERAR COMO UNA CELDA DE COMBUSTIBLE, REFORMADOR O PLANTA TERMICA.	H01M000/00000
PA/a/2003/006226	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	F02B33/44 F28C3/08
PA/a/2003/008963	SISTEMA DE ENSAMBLE DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	F28D5/00 H01M8/04

Solicitudes de patentes de Diciembre de 1991 a Octubre de 2005: 157. Fuente IMPI.
(continuación)

EXPEDIENTE	TÍTULO	CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL
PA/a/2000/000878	SISTEMA DE MANEJO DE CELDA DE COMBUSTIBLE DE GAS.	H01M-008/004
PA/a/1999/0011547	SISTEMA DE REFRIGERANTE DE MOTOR Y METODO CON CAMARA DE EXPANSION CONTROLADO POR TEMPERATURA.	F01P-007/002
PA/A/2004/006981	SISTEMA DE REMOCIÓN DE OXÍGENO DE CELDA DE COMBUSTIBLE Y ACONDICIONAMIENTO PREVIO.	H01M8/00 H01M8/04 H01M8/06
PA/A/2003/010674	SISTEMA ELECTRICO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE, METODO PARA DISTRIBUIR ENERGIS Y METODO PARA OPERR UN SISTEMA ELECTRICO DE CELDAS COMBUSTIBLE.	H01M16/00 H01M8/04 H01M8/10 H01M8/24 H02 ...
9902588	SISTEMA PARA SUMINISTRO DE ENERGIA PARA CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/004
9200262	SISTEMA SUPERVISOR DE LA ESCALA DE POTENCIA DE OSCILACION Y METODO PARA REACTORES NUCLEARES.	G21C-017/012
PA/a/2002/005247	SISTEMA Y METODO PARA EVITAR LA FORMACION DE DENDRITAS EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE METAL/ARIE, BATERIA O APARATO DE RECUPERACION DE METAL.	C25C1/16 C25C7/00 H01M10/28 H01M10/42 H0 ...
PA/a/2002/005386	SISTEMA Y METODO PARA LA DETECCION TEMPRANA DE CONTAMINANTES EN UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/006
PA/A/2004/002267	SISTEMAS INTEGRADOS PARA USO CON CELDAS DE COMBUSTIBLE, Y MÉTODOS.	H01M8/00
PA/a/2001/012269	SISTEMAS Y METODOS DE ENERGIA DE CELDA DE COMBUSTIBLE PARA CONTROLAR UN SISTEMA DE ENERGIA DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M8/04
PA/A/2004/012562	SUSPENSIONES PARA EL USO COMO COMBUSTIBLE PARA CELDAS ELECTROQUIMICAS DE COMBUSTIBLE.	H01M000/00000
9802166	TANQUE DE COMBUSTIBLE PARA ALMACENAR Y SURTIR GASES HIDROGENO Y OXIGENO A UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.	B60P-003/022
PA/A/2005/001493	TELAS DE GRAFITO CON BASE DE FIBRA NATURAL Y FIELTROS AGUJADOS PARA CAPAS DE SUBSTRATO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE DIFUSION DE GAS Y COMPUESTOS REFORZADOS DE ALTA CONDUCTIVIDAD.	D01F9/155 D01G1/08 D04H1/46 D04H1/52
9700986	TURBINA DE ULTRA-ALTA EFICIENCIA Y COMBUSTION DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/004
PA/a/2000/009944	TURBINA DE ULTRA-ALTA EFICIENCIA Y COMBUSTION DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/004
9202707	UN METODO PARA FABRICAR ARTICULOS DE METAL A PARTIR DE IMAGENES IMPRESAS.	B41M-005/000
PA/a/2000/006397	UNIDAD DE CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/000
PA/a/2000/010143	UNIDAD DE ELECTRODO DE MEMBRANA PARA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.	H01M-008/002 H01M-008/010
9200275	UNIDAD DE REFORMACION PARA CELDAS COMBUSTIBLES ARREGLADAS EN UNA PILA	B01J-008/000 C10G-035/000
9305751	UNIDAD ELECTROLITICA SUPRESORA DE CONTAMINANTES.	F01N-003/000
PA/A/2001/008915	VALVULA DE MEDICION EXTERNA PARA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.	B67B5/00

Diseños Industriales de Septiembre de 1976 a Septiembre de 2005: Cero. Fuente: IMPI

BIBLIOGRAFÍA

- “4.5MW Fuel Cell Development Program”. Electric Power Research Institute, 1984.
- “Acciones de la Secretaría de Energía para la Promoción de las Energías Renovables para Electrificación Rural en Zonas Aisladas”, SENER, 2004.
- “Annual Energy Outlook 2006 with Projections to 2030” Office of Integrated Analysis and Forecasting, EIA / DOE, 2006.
- “Basic Research Needs for the Hydrogen Economy”, DOE, 2003.
- “Ciencia, tecnología e innovación: el desarrollo sustentable alrededor de oportunidades basadas en el conocimiento”. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, 2008.
- “Direct-Hydrogen-Fueled Proton-Exchange-Membrane Fuel Cell System for Transportation Applications, Hydrogen Safety”, Directed Technologies, Inc. / Ford Motor Company / DOE, 1997.
- “Energy Efficiency Policy Recommendations, Worldwide Implementation Now”, IEA, 2008.
- “Estrategia nacional para la transición energética y el aprovechamiento sustentable de la energía”, SENER, 2011.
- “FCE Case Study 1-31-07: Hotel Sheraton”, FuelCell Energy, 2008.
- “Fuel cell vehicle world survey 2003” Breakthrough Technologies Institute (BTI) / DOE, 2004.
- “Fuel cells at the crossroads: Attitudes regarding the investment climate for the US fuel cell industry and a projection of industry job creation potential” BTI, 2003.
- “Fuel Cells for Distributed Generation” DOE–Quadrennial Technology Review, Clean Electricity Focus Group, 2011.
- “Fuel Cells for Mobility”, US Fuel Cell Council, 2005.
- “Fuel Cells Sub-Program Overview. Cap. IV. Introduction section on Fuel Cells Sub-Program Overview” DOE Hydrogen Program FY2004 Progress Report, 2004.
- “Hydrogen Research for Transportation”, USCAR, 2009.
- “Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan”, DOE, 2005.
- “International Energy Outlook 2005”, DOE / EIA, 2005.

“Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990–2002”, Instituto Nacional de Ecología (INE), 2006.

“Las energías renovables en México y el mundo” Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), 2004.

“Las reservas de hidrocarburos al 1 de enero de 2009”, PEMEX, 2009.

“México ante la crisis que cambió al mundo. Competitividad Internacional”, IMCO, 2009.

“Potencial de mitigación de gases de efecto invernadero en México al 2020 en el contexto de la cooperación internacional”, INE, 2010.

“Previsiones demográficas mundiales, revisión de 2006”, División de población ONU, 2007

“Programa de investigación y desarrollo tecnológico del sector energía 2002-2006”. SENER, 2002.

“Propuesta para ampliar la mitigación de gases de efecto invernadero en el sector eléctrico de México”. ENTE. Marzo 2009.

“Prospectiva del mercado de gas natural 2005-2014”, SENER, 2005.

“Prospectiva del Sector Eléctrico 2005-2014”, SENER, 2005.

“Prospectiva sobre la utilización de las energías renovables en México. Una visión al año 2030”. SENER, 2005.

“Renewable Energy Trends 2003 with preliminary data for 2003” EIA / DOE, 2004.

“Reporte de Seguridad de Vehículos a H₂: Sistema de Celda de combustible de Membrana de Intercambio de Protones a H₂ para Aplicaciones en el Transporte” Directed Technologies, Inc., 1997.

“Situación de la competitividad de México 2006: Punto de inflexión”, IMCO, 2007.

“State Activities that Promote Fuel Cells and Hydrogen Infrastructure Development”, BTI, 2006.

“The 2011 Fuel Cell Patent Review”, Fuel Cell Today, 2011.

“The benefits and costs of the Clean Air Act 1990 to 2010”. EPA, 2003.

“The Business Case for Fuel Cells: Why Top Companies are Purchasing Fuel Cells Today”, Fuel Cells 2000, BTI / DOE, 2010.

“The Global Competitiveness Report 2011-2012”, World Economic Forum, 2011.

“The Hydrogen Revolution: An evaluation of patent trends in the fuel cell industry”. Thomson Scientific Ltd, 2004.

“Towards Green Growth: Monitoring Progress: OECD Indicators”, OECD Publishing, 2011.

“Una visión al 2030 de la utilización de las energías renovables en México”. UAM, Encargado por SENER y el Banco Mundial, 2005.

“Well-to-Wheels Greenhouse Gas Emissions and Petroleum Use for Mid-Size Light-Duty Vehicles”, DOE, 2010.

“Well-to-Wheels Greenhouse Gas Emissions and Petroleum Use for Mid-Size Light-Duty Vehicles”, DOE, 2010.

“Worldwide Fuel Cell Industry Survey 2004” U.S. Fuel Cell Council, 2004.

Abraham, S. Discurso durante la reunión de la Asociación Nacional del H₂ de E.U., (2003).

Anaya, R. “Los problemas de la comunicación pública de la ciencia, la tecnología y la innovación y sus posibles soluciones” Sección: Columna Invitada. Gaceta Innovación, Foro Consultivo Científico y Tecnológico A.C. Julio 2009.

Ayres, R. “Barriers and breakthroughs: an ‘expanding frontiers’ model of the technology-industry life cycle” *Technovation*, 1988.

Balducci, J., Roop, M., Schienbein, A., DeSteele, G., Weimar, R. “Electrical Power Interruption Cost Estimates for Individual Industries, Sectors, and U.S. Economy”, Battelle / Pacific Northwest National Laboratory / DOE, 2002.

Blomen L., Mugerwa M., “Fuel cell systems”. Plenum, 1993.

Bockris, M. “The origin of ideas on a Hydrogen Economy and its solution to the decay of the environment”, *Journal of Hydrogen Energy* 27, 2002.

Busquin, C. “Thinking, debating and shaping the future: foresight for Europe”, 2002.

Cajiga, F. “El concepto de responsabilidad social empresarial”, Centro Mexicano para la Filantropía, 2009.

Calderón, F. Discurso durante la “Ceremonia Conmemorativa del LXIX Aniversario de la Expropiación de la Industria Petrolera”, Ixhuatlán del Sureste, Veracruz, 18 marzo 2007.

Camacho, A. “Explotando el poder de la información de patentes: el uso de la información en los documentos de patentes en diversos campos de la tecnología”. Taller internacional sobre la importancia económica de las patentes, Diciembre 2005.

Cano, U. "Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica". Boletín IIE. Septiembre–Octubre 1999.

Cano, U., Rejón, L., Ojeda, M. "Infraestructura de uso de H₂ y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso". Boletín IIE. Julio–Agosto 2000.

Cárdenas, R. "Invención, innovación y patentes", Albedrío/Instituto de Ingeniería, UNAM, 1999.
Dodgson, M. "The Management of Technological Innovation: An International and Strategic Approach", Oxford University Press, 2000.

Dunn, S. "Hydrogen futures toward a sustainable energy system." *World Watch Paper 157*, World Watch Institute, 2001.

Elliott, D., "Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca", N.R.E.L., 2004.

Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, "Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad", Cap. 6: América Latina, OMM/PNUMA, 2000.

Hamachi, K., Eto, J. "Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.

Huntington, H. "The Economic Consequences of Higher Crude Oil Prices", Stanford, 2005.

"IPCC, 2007: Resumen para Responsables de Políticas. En, Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido"

Jiménez-Rodríguez R., Sánchez M. "Oil Price Shocks and Real GDP Growth: Empirical Evidence for Some OECD Countries," *Applied Economics*, Vol. 37, No. 2 (2005), pp. 201-228.

Johnston B., Mayo M., Anshuman, K., "Hydrogen: the energy source for the 21st century", *Technovation*, 2005.

Jollie, D. "Fuel Cell Market Survey: Portable Applications", Fuel Cell Today, 2004.

Jollie, D. "The Current Situation and Expectation of the US and European Fuel Cell Market", Fuel Cell Today, 2005.

Kamaruzzaman S., Wan W. "Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells", *Renewable Energy 31*, 2006.

Kuhn, T., La estructura de las revoluciones científicas. Fondo de Cultura Económica de España, 2005.

Leire R. E. “El futuro de la energía: Hidrógeno y Pilas de Combustible”, Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón, 2007.

Levitt, T. “Exploit the Product Life Cycle”, Harvard Business Review, 1965.

Mahadevan, K. “Market Opportunity Assessment of Direct Hydrogen PEM Fuel Cells in Federal and Portable Markets”, Battelle / DOE Annual Program Review, 2008.

Martin, B. “Matching societal needs and technological capabilities: Research foresight and the implications for social sciences”, SPRU / Universidad de Sussex. 2002.

Masera O., Aguillón J., Gamino B. “Estimación del Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa como Energético Renovable en México”, Anexo 2 del reporte “Una visión al 2030 de la utilización de las energías renovables en México”, 2005.

Mason, J. “Electrolytic Production of Hydrogen Gas With Photovoltaic Electricity as a Replacement Fuel for Motor Gasoline in the United States: Land, Water and Photovoltaic Resource Requirements”, U.S. Hydrogen Conference, Solar Hydrogen Education Project, 2003.

Mazza P., Hammerschlag R., “Carrying the Energy Future”, Institute for Lifecycle Environmental Assessment, 2004.

Metin G., “Brainstorming, SWOT, and STEEP (V) Analisis”, KARAR Consultants Ltd. Ankara, Turquía. Sección que forma parte de “Technology Foresight for Organizers”, Training course for Black Sea Economic Countries and the Newly Independent States. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) / Scientific and Technical Research Council of Turkey, 2003.

Miles I., Keenan M. “Overview of Methods used in Foresight”. Sección que forma parte de “Technology Foresight for Organizers”, Training course for Black Sea Economic Countries and the Newly Independent States. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) / Scientific and Technical Research Council of Turkey, 2003.

Miles I., Keenan M., Kaivo-oja J. “A Handbook for Knowledge Society Foresight”, European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, Dublin, 2003.

Polli R., Cook V. “The Validity of the Product Life Cycle”. Journal of Business, 1969.

Porter, M. “Ventaja Competitiva. Creación y sostenimiento de un desempeño superior”, CECSA, 2ª Edición, 2002.

Quintero, R. “Estrategia de innovación, investigación, desarrollo y comercialización en empresas mexicanas: el caso del Instituto Mexicano del Petróleo”, Taller internacional sobre la importancia económica de las patentes, Diciembre 2005.

Ramírez-Salgado, J., Estrada-Martínez, A. “Roadmap towards a sustainable hydrogen economy in Mexico”, *Journal of Power Sources* 129, 2004.

Solorza, O. "Potencial del Hidrógeno en el Desarrollo Energético Nacional: Capacidad Técnica - Sector Académico", CINVESTAV / Sociedad Mexicana del H₂, 2003.

Suresh, B., Schlag, S., Yoneyama, M. "CEH Marketing Research Report: Hydrogen Chemical Economics Handbook", SRI Consulting, 2007.

Swain, R. "Fuel Leak Simulation", University of Miami, 2001.

Thomas, S., Zalbowitz, M. "Fuel Cells-Green power". Los Alamos National Laboratory / DOE, 1999.

Williams, I. "A history of the British gas industry," Oxford Press, 1981.

Wills, B. "The Business Case for Environmental Sustainability (Green)", HPS, 2009.

Zhijia Huang, Xu Zhang "Well-to-wheels analysis of hydrogen based fuel-cell vehicle pathways in Shanghai", *Energy* 31, 2006.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS (PÁGINAS WEB)

Alternative Fuels Data Center, 2009-2011 www.afdc.doe.gov/altfuels.html

Ballard Power Systems Inc., 2007-2012 www.ballard.com

Community Research & Development Information Service (CORDIS), 2006
<http://www.cordis.lu/>

Economic Effects of High Oil Prices, US EIA, 2007
205.254.135.24/oiaf/aeo/otheranalysis/aeo_2006analysispapers/efhop.html

Eye for Fuel Cells, 2006 www.eyeforfuelcells.com

Fuel Cell Today, 2006 www.fuelcelltoday.com

Fuel Cells 2000 Worldwide, 2006 www.worldwide.fuelcells.org

Gobierno Federal de la República Federal Alemana "Establecimiento de una Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)", 2008 www.irena.org

HyFLEET:CUTE, 2008 www.global-hydrogen-bus-platform.com

HyWeb, 2006-2008 www.hydrogen.org

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, 2005-2008 www.impi.gob.mx

Instituto Nacional de Ecología, 2008-2010 www.ine.gob.mx y cambio_climatico.ine.gob.mx

On Line Fuel Cell Information Center, 2006 www.fuelcells.org

Posgrado de Ingeniería de la UNAM, 2008-2011 ingenieria.posgrado.unam.mx

Reports of the World Economic Forum, 2012 www.weforum.org/reports

Secretaría de Energía, 2004-2011 www.energia.gob.mx

U.S. DOE, 2005-2011 www.energy.gov

US Fuel Cell Council, 2007-2009 www.usfcc.com