



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTAN:**

**ERNESTO ANGUERA ROMERO**

**BRUNO ISSAC MENDOZA ISASMENDI**

**ASESOR: M. EN I. JUAN CONTRERAS ESPINOSA**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

201



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
P R E S E N T E

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos  
comunicar a usted que revisamos la Tesis :

Hidrógeno como combustible alternativo

que presenta el pasante: Ernesto Anguera Romero  
con número de cuenta: 40600002-4 para obtener el título de :  
Ingeniero mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en  
el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 19 de ENERO de 2010

PRESIDENTE

M.I. José Juan Contreras Espinoza

VOCAL

Ing. Jorge de la Cruz Trejo

SECRETARIO

M.I. Ramón Ceasar Galicia

PRIMER SUPLENTE

Ing. Luis Emil Flores Coronel

SEGUNDO SUPLENTE

M.E.M. Carlos Roberto Ledezma



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN



SECRETARÍA DE

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis ;  
Hidrógeno como Combustible Alterno

que presenta el pasante: Ignacio Mendoza Izasmendi  
 con número de cuenta: 406017150 para obtener el título de :  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izca'li, Méx. a 19 de Enero de 2010

PRESIDENTE	M.I. José Juan Contreras Izasmendi	
VOCAL	Ing. Jorge de la Cruz Trejo	
SECRETARIO	M.I. Ramón Osorio Galicia	
PRIMER SUPLENTE	Ing. Luis Raúl Flores Coronel	
SEGUNDO SUPLENTE	M.I. Carlos Utopiano Legorreta	

## **Agradecimientos de Ernesto Anguera Romero**

Dedico esta tesis a la impulsora de mis sueños y la maestra de mis éxitos, mi madre Silvia Romero Rico que ah estado conmigo tanto en mis fracasos como en mis logros, que con palabras de aliento me animo a poner siempre un pie delante del otro. Al que fue el gerente de este proyecto Ernesto Anguera Viñes, mi padre, que me compartió su conocimiento, experiencia y sistematización, para conducir con honradez y orgullo las decisiones que se toman, con todos sus riesgos, jamás ver lo ya pisado y nunca arrepentirme, aceptando las consecuencias siempre con la frente en alto.

Pero si de algo puedo estar agradecido fue y será siempre el haber estudiado en la máxima casa de estudios la Universidad Autónoma de México, a la cual debo no solo un título, si no el sentimiento de identidad y compromiso con mi país.

## **Agradecimientos de Bruno Issac Mendoza Isasmendi**

Dedico este proyecto a mi familia y amistades las cuales me ayudaron con su apoyo incondicional al ampliar mis conocimientos y horizontes para acercarme a mis más deseadas metas. Esto fue posible por la infinita ayuda e inspiración que el *Señor* me ha otorgado y de la cual estoy profundamente agradecido.

Gracias a mis grandes maestros que me llevaron siempre a dar más y lo mejor de mí. Hago especial mención al Maestro Juan Contreras Espinosa que por su invaluable ayuda se ha concretado exitosamente este proyecto.

Y gracias a la Universidad que me enseñó no solo lo que debe saber un ingeniero si no también como debe actuar y conducir su vida.

# ÍNDICE

---

<b>OBJETIVO</b> .....	9
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	10
I.1 El cambio climático global.....	11
I.2 Sistema eléctrico mexicano.....	16
I.3 Emisiones del sector eléctrico.....	19
I.4 La alternativa: máquinas de combustión interna a hidrógeno.....	21
I.5 El hidrógeno como combustible.....	23
I.6 Cambio de combustibles fósiles por hidrógeno.....	25
I.7 El transporte de energía a largas distancias por gasoductos.....	28
I.8 Transformación de los sistemas eléctricos con la introducción de un sistema energético basado en el hidrógeno.....	31
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>LOS COMBUSTIBLES EN EL MUNDO</b> .....	32
1.1 Combustibles fósiles a nivel mundial.....	33
1.2 Gasolina.....	39
1.3 Diesel.....	42
1.4 Gas natural.....	44
1.5 Etanol.....	46
1.6 Combustibles fósiles en México.....	50
1.7 Protocolo de Kyoto.....	54
1.8 Energías renovables.....	56
1.9 Energía eólica.....	58

1.10 Hidrógeno.....	60
---------------------	----

## **CAPÍTULO 2**

HISTORIA DEL HIDRÓGENO.....	64
2.1 Generalidades.....	65
2.2 Propiedades del hidrógeno en estado gaseoso (H <sub>2</sub> G).....	69
2.3 Contenido energético del hidrógeno.....	72
2.4 Seguridad.....	74
2.5 Economía del hidrógeno.....	78
2.6 Usos del hidrógeno.....	82
2.7 Aspectos económicos del hidrógeno.....	83
2.8 Costos del hidrógeno.....	87
2.9 El primer autobús de hidrógeno fabricado en España circula ya por Madrid ....	88
2.10 Emisiones cero.....	89
2.11 Europa prueba 34 unidades.....	92

## **CAPÍTULO 3**

PROCESOS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO .....	93
3.1 Producción de hidrógeno.....	94
3.2 Métodos biológicos de obtención de hidrógeno.....	95
3.3 Preparación de hidrógeno en el laboratorio.....	99
3.4 Método del gas de agua.....	101
3.5 Método de vapor-hidrocarburo.....	102
3.6 Método por Electrólisis.....	103
3.7 Electrolizadores Industriales.....	105
3.8 Sistemas auxiliares.....	108
3.9 Análisis técnico.....	111

3.10 Almacenamiento.....	112
3.11 Compresión.....	117
3.12 Transporte.....	120

## **CAPÍTULO 4**

<b>APLICACIONES DEL HIDRÓGENO.....</b>	<b>121</b>
4.1 Celdas de combustible para la producción de energía eléctrica.....	122
4.2 Funcionamiento de las celdas de combustible.....	129
4.3 Tipos de celdas de combustible.....	130
4.4 Celdas ácido fosfórico (CCAF).....	131
4.5 Celdas de polímero sólido o membrana de intercambio protónico.....	134
4.6 Celdas de carbonato fundido (CCCF).....	138
4.7 Celdas de óxido sólido (CCOS).....	142
4.8 Celdas alcalinas.....	146
4.9 Observaciones finales.....	147
4.10 Mejoras al motor de explosión.....	150
4.11 Autos con celdas de combustible.....	152
4.12 El automóvil crítico foco de transporte.....	154
4.13 Reconsideración de la propulsión automotriz.....	155
4.14 Renovación del diseño de vehículos.....	159
4.15 Reconstrucción de la infraestructura.....	166
4.16 Problemáticas actuales con el hidrógeno.....	169
4.18 Oxígeno + hidrógeno = electricidad.....	175
4.19 Vehículos híbridos.....	177
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>182</b>



**BIBLIOGRAFÍA..... 185**

# OBJETIVOS

---

- Presentar un panorama general sobre el potencial del hidrógeno como combustible alternativo. Aumentando el interés en el hidrógeno y la tecnología de las celdas de combustible, indicando al hidrógeno como alternativa energética.
- Introducir el tema de la economía del hidrógeno como un cambio revolucionario en el mundo que conocemos hoy. Mostrando los beneficios a largo plazo y las realidades del hidrógeno y los sistemas de celdas de combustible.
- Plantear una alternativa de propulsión para los vehículos impulsados por combustibles fósiles, así como resultados arrojados por prototipos en otros países que ya cuentan con estas tecnologías.
- Proponer sistemas de integración y manejo del hidrógeno, así como señalar los posibles costos actuales y futuros que podría implicar la modernización del sistema energético.
- Indicar las tecnologías actuales con las que se cuentan para la extracción y separación del hidrogeno así como sus costos.

# INTRODUCCIÓN

---

Nuestro ambiente está cambiando considerablemente, la percepción que se tiene es que las estaciones no se comportan de forma regular, podemos advertir que hace más calor en temporada de verano y se siente más frío en invierno y si se preguntara que es lo que está sucediendo, se tendría que pensar en las actividades que realizamos y como cada una de ellas requiere de cierto grado de consumo de energía, ya sea, para la preparación de alimentos, el transportarse a algún sitio, etcétera. Esta energía no es gratuita ni en el sentido económico ni en el ambiental puesto que para obtener recursos energéticos hay que extraerlos desde donde se encuentren y esto conlleva consumo de energía para lograrlo, sin embargo, los combustibles y otras formas de energía están disponibles hoy, hasta cierto punto, de forma barata y abundante lo que ha contribuido a que su consumo se dispare, aumenten las emisiones asociadas a esto y se impacte negativamente la composición de los gases de la atmósfera.

Los vectores energéticos dominantes en la segunda mitad del siglo XXI serán el hidrógeno y la electricidad, mutuamente complementarios. A partir del primero se puede obtener la segunda y viceversa. La electricidad se puede conseguir a partir del hidrógeno en generadores de combustión interna, turbinas y celdas de combustible, y de la misma forma, el hidrógeno se puede obtener a partir de la electricidad mediante la electrólisis del agua. Este conjunto cumple las dos condiciones necesarias de un sistema energético sostenible, un esquema de almacenamiento de energía y un producto energético que puede transportarse a largas distancias.

Otra utilización ventajosa es la producción de hidrógeno como sistema de gestión de la demanda eléctrica, de manera que en los períodos en que esta es inferior a la producción, los excedentes se utilicen para producir hidrógeno que pueda ser utilizado como combustible en períodos de demanda alta.

Desde el punto de vista ambiental, la ventaja de la electricidad y del hidrógeno frente al uso de los hidrocarburos es la limpieza de su empleo en los puntos de consumo. La electricidad no produce emisiones peligrosas y el hidrógeno solo produce agua como

subproducto. Adicionalmente, ambos productos son totalmente renovables. La electricidad vista como una separación de cargas eléctricas, regresa a un estado eléctricamente neutro después de ser usada. El hidrógeno se convierte en agua. Desde un punto de vista estratégico, lo que hace más interesante a esta combinación es la diversidad de fuentes a partir de las cuales puede producirse.

En el caso de la electricidad, aparte de las cinco fuentes tradicionales –carbón, nuclear, petróleo, gas y energía hidráulica – es razonable que se pueda obtener económicamente con las nuevas fuentes de energía – solar, biomasa, eólica, hidrógeno, etc. En el caso del hidrógeno, su producción actual se basa, principalmente, en el reformado de gas natural o de otros hidrocarburos. Sin embargo, el hidrógeno puede obtenerse de una gran variedad de fuentes.

# I.1 El cambio climático global

---

Los aumentos en la concentración de los llamados gases de efecto invernadero reducen la eficiencia con la cual la tierra vuelve a emitir la energía recibida al espacio. Parte de la radiación saliente de onda larga emitida por la Tierra al espacio es re-emitida a la superficie por la presencia de esos gases. Así la temperatura de superficie se elevará para emitir más energía, y aunque parte de ella quede “atrapada”, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance radiactivo que mantiene relativamente estable el clima. Es claro, si las concentraciones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, la temperatura de superficie del planeta mantendrá una tendencia positiva. Aún si las emisiones de estos gases se estabilizan, los efectos del calentamiento perduraran mucho tiempo, pues los gases de este tipo tienden a permanecer por muchos años en la atmósfera.

## Las evidencias observadas

Los trabajos realizados hasta finales del siglo XX dan cuenta de cambios en diferentes variables que caracterizan el clima. Hoy en día no queda duda de que la temperatura global del planeta está aumentando y de que los regímenes de lluvia están cambiando. Si bien es cierto que en escalas de tiempo de miles o millones de años las concentraciones de gases de efecto invernadero cambiaron considerablemente de manera natural, produciendo sustanciales variaciones en la temperatura, estas se produjeron en muchos millones de años. Incluso los ciclos de las glaciaciones (salir de períodos glaciales) en el planeta requieren de miles de años. Nunca como ahora, cambios tan drásticos en el clima se produjeron en escalas tan cortas de tiempo (décadas). De mediados del siglo XIX a la fecha, la actividad humana ha resultado en aumentos globales de la temperatura del orden de 0.6°C.

El bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ha sido un componente muy importante de nuestra atmósfera de hace miles de millones de años, cuando la gran actividad volcánica del

planeta lo lanzaba a la atmósfera. La atmósfera primitiva era más rica en bióxido de carbono aproximadamente una concentración de 3% contra 0.036% en la actualidad – y e vitaba l a salida d e r adiación, produciendo, j unto c on el va por d e a gua, u n calentamiento global en el planeta. La importancia del CO<sub>2</sub> y el vapor de agua en la atmosfera para la regulación de la temperatura del planeta es tal que sin su presencia la temperatura promedio actual del planeta seria aproximadamente 33°C más fría y, por lo tanto, el planeta estaría congelado.

Otro componente natural del ciclo del carbono lo constituye el metano (CH<sub>4</sub>). Este gas es, después del bióxido de carbono, el compuesto de carbono más abundante en la atmósfera. Se pr oduce por l a fermentación de l a m ateria or gánica e n c ondiciones anaeróbicas, tal como ocurre, por ejemplo, en los humedales, los sedimentos lacustres y en el aparato digestivo de los rumiantes y las termitas. La concentración de metano en nuestras variaciones latitudinales, es mayor en el hemisferio Norte en que el Sur y fuertes oscilaciones con las estaciones del año. Tiene una capacidad de absorción de radiación infrarroja 20 veces mayor por molécula que el bióxido de carbono, por lo que el a umento d e la concentración de este gas en la tropósfera tiene también el potencial para contribuir de manera significativa a un cambio climático global.

El aumento en las concentraciones de bióxido de carbono y de metano en la parte baja de la a tmósfera ( tropósfera), está b ien d ocumentado. L as m ediciones r ealizadas en Mauna Loa, Hawái, desde 1957, así como las mediciones indirectas (Ej. Con núcleos de hielo); han mostrado a umento d e l a c oncentración a tmosférica de CO<sub>2</sub> de 2800 partes por millón (ppm) en 1750 a 3670 ppm en 1999. Esto significa un incremento de 31% en c asi 200 años. A unque s e h an d ocumentado c oncentraciones s imilares a la actual e n el registro geológico, esta constituye el nivel más alto alcanzado e n los últimos 420 mil años, y l a velocidad de cambio n o parece tener precedentes en los últimos 20 mil años. La concentración de metano en la atmósfera, que es mucho más baja que la de CO<sub>2</sub>, aumentó cerca de 700 partes por billón (ppb) en 1750 a 1745 ppb en 1998, l o que representó u n aumento d el 150%. Esta c oncentración n o ha sido excedida en los últimos 420 mil años. Las causas del incremento de la concentración de gases de carbono en la atmósfera están b ien identificadas. En el caso del CO<sub>2</sub> son el u so i ndustrial y dom éstico d e combustibles que contienen carbono ( petróleo,

carbón, gas natural y leña), la deforestación que provoca la descomposición de la materia orgánica y la quema de la biomasa vegetal. En el caso del metano son la agricultura (ej. Cultivo de arroz), el uso de gas natural, los rellenos sanitarios, el aumento del hato ganadero y la quema de la biomasa vegetal. Sin embargo, es el uso indiscriminado e ineficiente de los combustibles fósiles el principal generador de la tendencia actual.

## **El contexto de México**

México es el país de Latinoamérica con las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> y contribuye con cerca del 1.0% de las emisiones mundiales.

Las principales causas de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera son la quema de combustibles fósiles para generar electricidad y asociada al transporte, la producción de cemento y la quema de biomasa debida a la deforestación y al cambio de uso del suelo. Los otros gases de invernadero, aunque emitidos en menor cantidad, son importantes debido a su efecto combinado de retención de calor y tiempo de permanencia en la atmósfera. Estos y otros contaminantes son ya un problema en ciertas regiones del país como la del Valle de México y en ciudades como Guadalajara o Monterrey, donde se conjuga una suerte de condiciones geográficas que impiden que se limpien los contaminantes de la atmósfera, una densidad poblacional alta y un consumo alto de energía proveniente de hidrocarburos. Por lo que es necesario emplear combustibles alternativos como el hidrógeno que contaminan menos en el proceso de su utilización.

Entre 1994 y 1998 se incrementaron en el país las emisiones de casi todos los gases de invernadero, resaltando por su importancia en volumen las de CO<sub>2</sub>, que aumentaron un 12.3% y las de CH<sub>4</sub> con un 22.2%. Las emisiones de CO y compuestos orgánicos volátiles se redujeron en más del 20% en el mismo período.

El sector de generación de electricidad en México es responsable de emitir al ambiente más del 40% del bióxido de carbono emitido por la quema de combustibles

fósiles para generar electricidad, puesto que más del 72% de la electricidad que se generó tan solo en el 2004 se produjo quemando combustibles fósiles.

Se tiene planeado satisfacer la mayor parte de la demanda futura de electricidad a corto y mediano plazo con la construcción de plantas que quemen combustibles fósiles con consecuente aumento de emisiones de gases de efecto invernadero.



## I.2 Sistema eléctrico mexicano

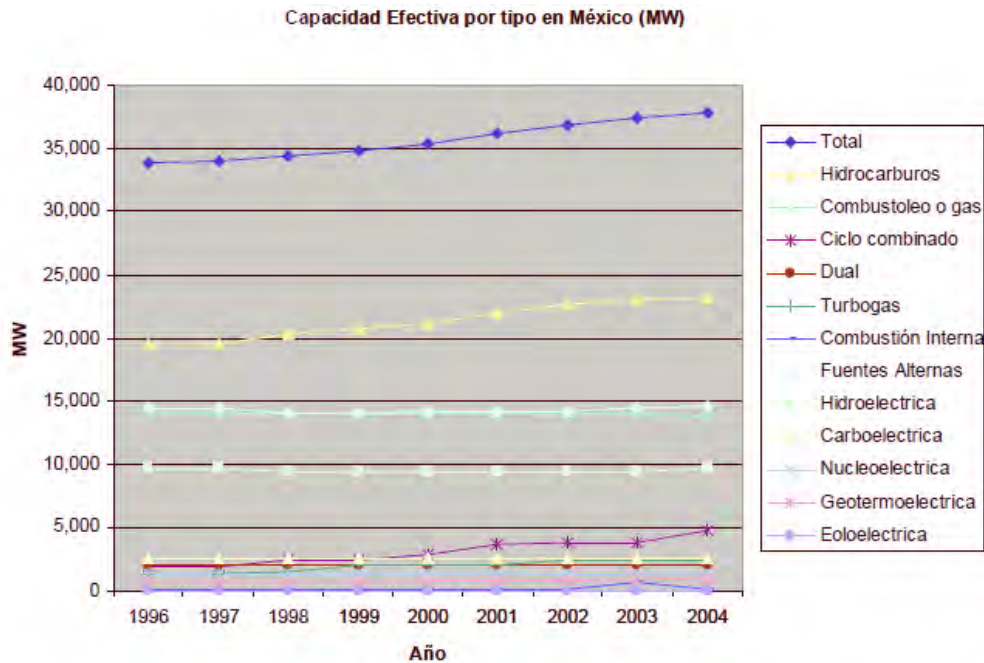
---

El sistema eléctrico mexicano es un sistema que opera así en su totalidad con grandes centrales que alimentan a una red nacional. Estas son centrales que llegan a tener capacidades de 2 millones de Kw

La diversificación energética es una necesidad estratégica. De la misma manera que no es recomendable concentrar capacidad en unas cuantas plantas mayores, tampoco lo es el depender de una variedad limitada de fuentes de energía. México actualmente depende de combustibles fósiles para el 75% de su generación de electricidad y lo único que está haciendo en la actualidad es pasar de una dependencia del petróleo a una dependencia del gas natural.

### **Capacidad efectiva de generación en México**

La capacidad efectiva de generación de electricidad se concentra en centrales impulsadas por hidrocarburos cuya capacidad ha crecido de 1996 al 2004 en poco más del 19% ; sin contar que los productores independientes de energía que a l 2004 contaban con 7,264.9 MW de capacidad efectiva, mientras que las centrales de fuentes alternas han aumentado su capacidad en el mismo período en poco más de 1%, es decir, casi 16 veces menos que las centrales de hidrocarburos, como se observa en la gráfica.

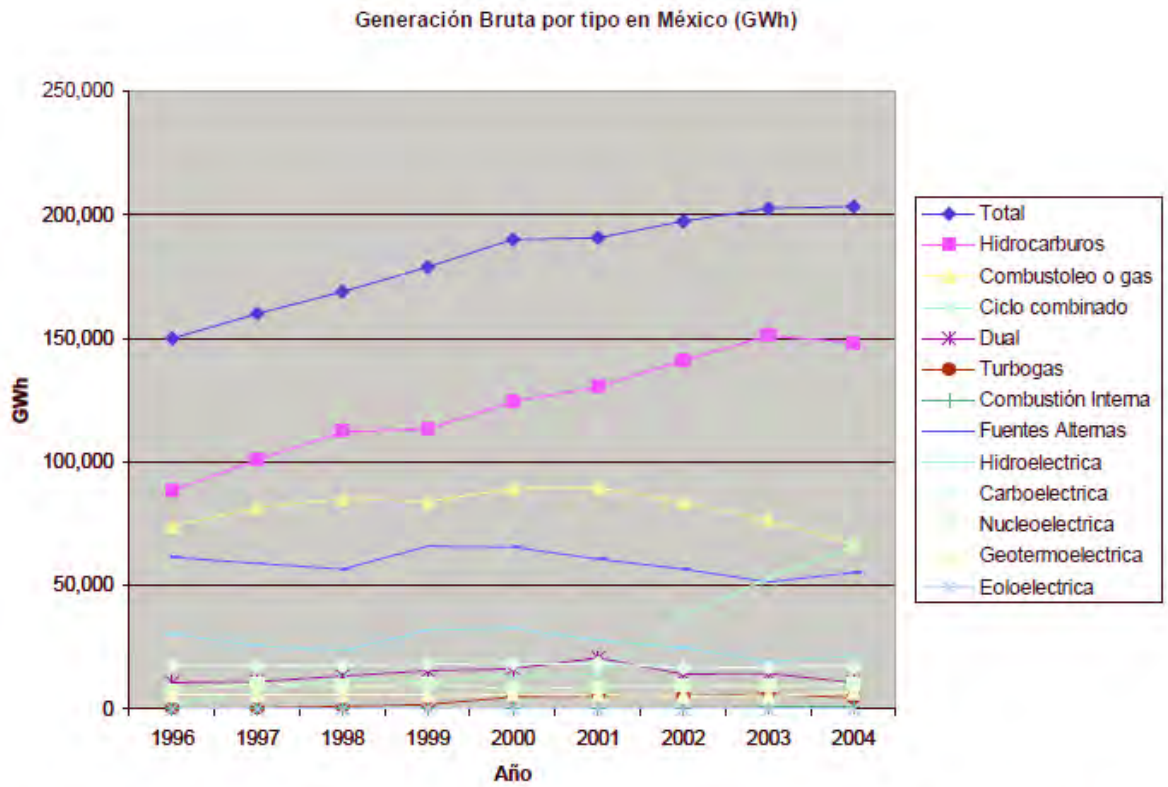


**Gráfica I.1 Capacidad efectiva de generación de tecnología en México, datos de informes de labores de CFE**

## Generación bruta de electricidad

La generación de energía en México se ha hecho con plantas más eficientes en los últimos años, como las de ciclo combinado cuya eficiencia está en un rango entre 51.01% y 51.82%, que ha sustituido a plantas generadoras térmicas convencionales cuya eficiencia está en un rango entre 30.62% y 37.56%, disminuyendo así el consumo de combustóleo y sus emisiones asociadas.

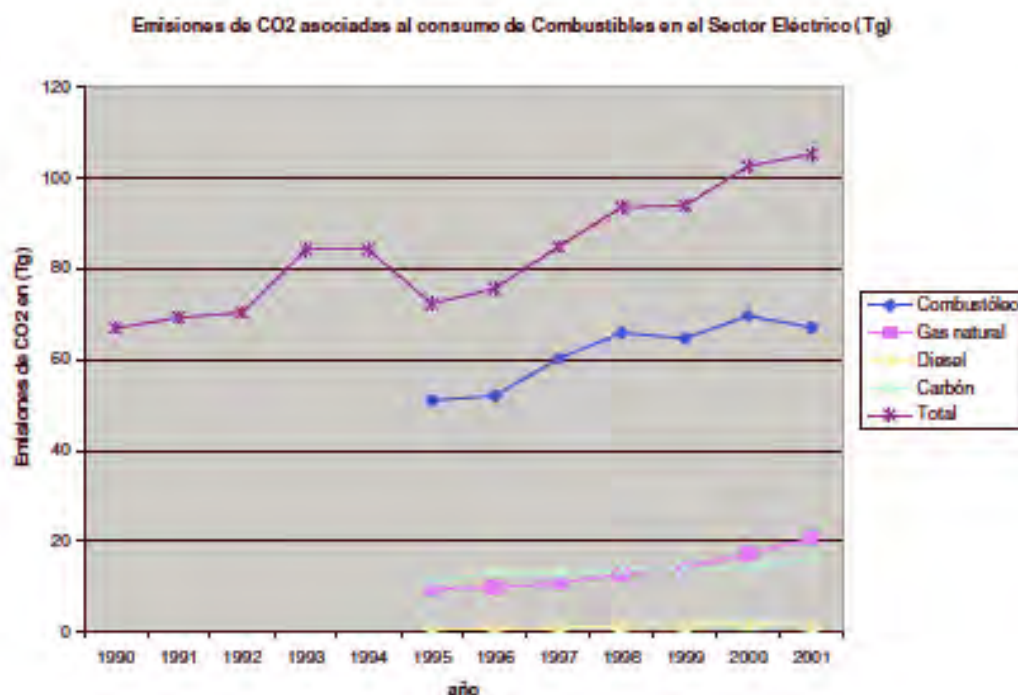
Por su parte la generación bruta de electricidad en México ha crecido de 1996 al 2004 en poco más del 67% en centrales de hidrocarburos mientras que las centrales de fuentes alternas han disminuido su generación en el mismo período en más de 10% como se muestra en la siguiente gráfica.



**Gráfica I.2 Generación bruta por tipo en México (MWh), elaborada con datos de la CFE**

## I.3 Emisiones del sector eléctrico

Así mismo las emisiones vinculadas a este sector, por ejemplo las de bióxido de carbono, han aumentado de 1990 al 2001 en más del 57%. Existen 15 países que contribuyen con 71.4% de las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales por quema de combustibles fósiles; entre ellos se encuentra México en la posición 12, con 98 millones de toneladas de carbono, que representa 1.54%. Al considerar a México en el contexto de América Latina y el Caribe, nuestro país contribuye con 27.3% de las emisiones, con un índice de 1.1 toneladas de carbono por habitante por año.



**Gráfica I.3 Emisiones de bióxido de carbono en teragramos asociadas al consumo de combustibles fósiles en el sector eléctrico mexicano.**

Este crecimiento de las plantas de generación de electricidad que utilizan hidrocarburos y particularmente las plantas de ciclo combinado que utilizan gas natural, han sido seleccionadas por CFE, tomando como mayor factor de decisión el menor costo de producción de electricidad, criterio que en su momento se apoyó en el

hecho de que el gas natural registraba un precio bajo, mismo que hoy día se ha incrementado sensiblemente hasta el punto que el precio de referencia del gas natural importado (US \$ 6.31 /MMBTU) para el 2006 es de 37.5% más alto, en el mejor de los casos, al planeado por CFE (US \$ 4.59 /MMBTU). Los datos publicados por la Agencia Internacional de Energía, que deben provenir de México, dice lo contrario: es más barato el kilovatio-hora generado por combustóleo con alto contenido de azufre que el generado con gas natural. Y considerando que hay varios medios técnicos para evitar las emisiones de compuestos de azufre, con cuyo costo sigue siendo más barato que generar con combustóleo.

En el año 2005 el subsidio que el gobierno federal transfirió a CFE y L y FC sumó 6 mil millones de dólares y este año evita que los usuarios de energía eléctrica del país paguen tarifas más altas, el gobierno federal entregará un subsidio equivalente a 10 mil millones de dólares, el más alto de la historia del país. Los planes de crecimiento de ambas paraestatales se mantienen relativamente estables en términos de la adición de nuevos clientes, lo que sugiere que el mayor subsidio no obedece al crecimiento de la base de usuarios o por mayor cobertura del servicio.

La inestabilidad del mercado petrolero internacional en 2005 afectó el desempeño de las paraestatales debido al encarecimiento de los combustibles que emplean para generar electricidad, gas natural, el carbón y el diesel.

## I.4 La alternativa: máquinas de combustión interna a hidrógeno

---

Ante este panorama existe la alternativa de utilizar el hidrógeno, un combustible más limpio cuya combustión produce mucho menos emisiones contaminantes y que con ciertas adaptaciones en los sistemas de generación de electricidad impulsados por combustibles fósiles puede ser empleado para generar electricidad, de forma segura, confiable y limpia. Es por ello que es importante realizar una revisión de los actuales motores de combustión interna y su adaptación a la quema de hidrógeno dentro del bloque de estos motores.

### **La Contaminación por combustión en motores**

La combustión es una reacción química en la que un elemento combustible se combina con otro (generalmente oxígeno en forma de  $O_2$  gaseoso), desprendiendo calor y produciendo un óxido. Los tipos más frecuentes de combustible son los materiales orgánicos que contienen carbono e hidrógeno. El producto de esas reacciones puede incluir monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua ( $H_2O$ ) y cenizas.

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. Los combustibles más conocidos se componen principalmente de: Hidrógeno y Carbono. Reciben el nombre de combustibles hidrocarburos y se denotan por la fórmula general  $C_mH_n$ . Ejemplos de estas son:

- Carbón: el principal constituyente es el carbón; el cual también contiene cantidades variables de oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, azufre, humedad y ceniza.
- Gasolina: es una mezcla de numerosos hidrocarburos y se obtiene del petróleo crudo. (Octano  $C_8H_{18}$ ).

- Gas natural: está compuesto principalmente de metano, pero también contiene pequeñas cantidades de etano, propano, hidrógeno, helio, dióxido de carbono, nitrógeno, sulfato hidrógeno y vapor de agua.

A la reacción química durante la cual un combustible se oxida y se libera una gran cantidad de energía se le conoce como: combustión. La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

La contaminación que producen los motores es debida al tipo de combustible que emplean, y no depende sólo de las características del motor; pero entre más eficiente sea un motor requerirá menor cantidad de combustible por unidad de potencia entregada.

## 1.5 El hidrógeno como combustible.

---

Entre las características del hidrógeno como combustible, destaca que se quema al aire libre cuando hay concentraciones entre el 4 y 75% de volumen (el gas natural lo hace entre 5.4 y 15%). La temperatura por combustión espontánea es de 584.85 °C, mientras que para el gas natural es de 539.85° C. El gas natural es mucho más explosivo (lo hace en concentraciones de 6.3% a 14%) que el hidrógeno el cual necesita concentraciones entre el 13% y el 64%.

El hidrógeno requiere una importante fuente de energía para su extracción en forma energéticamente aprovechable. A diferencia del petróleo, del gas natural o del isótopo radioactivo que se consideran fuentes de energía, el hidrógeno es un portador de energía que permite producir otra manifestación de energía (por ejemplo, electricidad y con ella obtener energía luminosa, calorífica, etcétera)

La densidad respecto al volumen de hidrógeno (2.53 kWh/1), es cuatro veces más baja que la de la gasolina (8.76 kWh/1), sin embargo la cantidad de energía en relación con el peso, la del hidrógeno es más alta. Un kilo de hidrógeno genera la misma energía que 2.1 Kg de gas natural o 2.8 Kg de gasolina. Si lo comparamos con el gas natural menos de la mitad, es decir, entre 13.90 kWh/kg y 39.41 kWh/kg, mientras que el gas natural menos de la mitad, es decir, entre 13.90 kWh/kg y 15.42 kWh/kg.

Un sistema de energía basado en hidrógeno se advierte como una opción viable y ventajosa para producir energía de alta calidad para aplicarse en una amplia gama de usos; de una manera eficiente, limpia y segura; mientras que por otro lado se resuelven los objetivos de sustentabilidad. El hidrógeno también proporciona un complemento ideal a la electricidad. Ambos son portadores de energía de alta calidad, no contiene carbón y generan poco o nada de emisiones contaminantes. La electricidad, sin embargo, está en desventaja cuando se requiere almacenarla; mientras que el hidrógeno puede satisfacer muy bien este aspecto.

Además la tecnología del hidrógeno plantea un fuerte vínculo con las energías renovables, puesto que puede ser obtenido por electrólisis, la cual puede realizarse mediante el uso



electrolizadores que operen con fuentes renovables de energía como el viento, celdas solares, biomasa, etc.

Por lo que es conveniente analizar técnicamente el comportamiento de las actuales fuentes de potencia, como son las máquinas de combustión interna: Motores Otto, Motores Diesel, Motores Rotatorios y Turbinas, utilizando mezclas de combustibles fósiles con hidrógeno o utilizando el hidrógeno como combustible, para determinar qué tan compatible es ese combustible con la tecnología actual e identificar qué cambios se deben realizar para continuar utilizando estas máquinas en mediano o largo plazo.

Esta propuesta servirá como un período de aprendizaje en el manejo y uso del hidrógeno, y una fase de transición a tecnologías más eficientes como la celda de combustible, en la cual, se enfocan muchos esfuerzos pero que no ha alcanzado la madurez necesaria para ser utilizada en forma masiva ni en corto plazo.

# I.6 Cambio de combustibles fósiles por hidrógeno

---

La humanidad dispone ya de los recursos y de las tecnologías que se necesitan para transitar hacia un futuro energético sustentable.

Hay una solución definitiva para lograr ese sistema energético sustentable, eliminando los impactos actuales sobre el medio ambiente debido al uso de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y de la energía nuclear de fusión (contaminación radiactiva). Esa solución consiste en establecer un sistema energético sin carbono basado en el hidrógeno obtenido mediante el aprovechamiento de las energías renovables.

Que en una de sus anticipaciones geniales Julio Verne en "La isla misteriosa", escrita 1874, hace decir a uno de sus personajes: *"¿Qué se quemará en lugar del carbón? El agua, pero descompuesta en sus elementos constitutivos y descompuesta sin duda por la electricidad que se habrá convertido para entonces en una fuerza poderosa y manejable"*.

Actualmente, a principios del siglo XXI, podemos ampliar la pregunta para incluir a todos los combustibles fósiles: el petróleo y el gas natural además del carbón. El interés por lo que se llamó "la economía del hidrógeno" aparece a finales del siglo XX, motivado en gran parte por las crisis petroleras que caracterizaron esa época.

Se celebraron dos importantes congresos internacionales sobre ese tema en 1974 y 1976 en Estados Unidos y una reunión europea ese mismo año de 1976. Con la caída de los precios del petróleo mediados de los años ochenta, resultado de una oferta abundante de hidrocarburos que hace olvidar la preocupación por su agotamiento en un tiempo relativamente corto, el interés sobre la producción y utilización del hidrógeno disminuyó, lo cual se debe también al predominio de las políticas económicas neoliberales que se guían por las señales del mercado y por lo tanto de los costos y precios a corto plazo.

Sin embargo a principios del siglo XXI el interés por el hidrógeno como energético reaparece, debido a la preocupación por el aumento de la temperatura en la superficie de la

tierra y el consecuente cambio climático global. Para reducir ese fenómeno hay que disminuir el uso de combustibles fósiles e incluso a largo plazo, suprimirlo. Esto implica que la producción de su posible sustituto, el hidrógeno, debe obtenerse por el uso de fuentes energéticas que no incluyan carbono, principalmente por el aprovechamiento directo e indirecto de la energía solar.

Como lo señala el Dr. Klaus Fostner, director del proyecto de la primera planta experimental de hidrógeno solar, instalada en Alemania a principios de la última década del siglo XX, la radiación solar que llega a nuestro planeta cada 30 minutos de insolación es igual a la demanda anual mundial de energía primaria.

El problema es cómo aprovechar esa energía difusa e intermitente. El tiempo de insolación aprovechable a plena carga es en promedio de 1000 horas en las zonas templadas de la tierra y de unas 2000 horas en las zonas más soleadas. Por otra parte la potencia solar con la máxima insolación es del orden de  $1 \text{ KW/m}^2$ . Las eficiencias de conversión de esa energía solar en electricidad son actualmente alrededor del 10% usando celdas fotovoltaicas, que podrían aumentar en el futuro a un 20%. Todo esto significa que con la tecnología disponible, que es costosa, solo se aprovecha una fracción pequeña de la energía solar incidente.

Las investigaciones en curso pretenden ampliar el aprovechamiento y disminuir los costos de conversión.

La intermitencia de la energía solar obliga a desarrollar medios de almacenamiento para poder adaptar la oferta variable de energía solar a las características de la demanda de los consumidores de energía, lo que añade un costo adicional a su aprovechamiento.

Uno de los procedimientos para lograr ese almacenamiento es la producción de hidrógeno mediante la descomposición electrolítica del agua, utilizando electricidad producida por el aprovechamiento directo o indirecto de energía solar.

El hidrógeno, utilizado como medio de almacenamiento de energía y como energético secundario completando o sustituyendo al gas natural, presenta importantes ventajas: no causa ningún impacto negativo sobre el medio ambiente en su producción, si se obtiene por descomposición electrolítica del agua mediante la electricidad producida a partir de la energía

solar, ni en su utilización ya que su combustión produce agua; solo si se quema a muy alta temperatura pueden producirse óxidos de nitrógeno por oxidación del nitrógeno del aire.

El hidrógeno no es tóxico y puede transportarse y almacenarse utilizando la infraestructura desarrollada para el gas natural. Puede introducirse gradualmente inicialmente mezclado con el gas natural, y puede convertirse a otras formas de energía: térmica, mecánica y eléctrica.

La eficiencia en su producción electrolítica, tomando en cuenta la eficiencia de electrolizador y las pérdidas por almacenamiento, es del orden del 75%. Su conversión a calor es muy eficiente ya que la eficiencia de las calderas (generadores de vapor) es de alrededor del 90%. La conversión en energía mecánica mediante motores de combustión interna o turbinas de combustión se hace con eficiencias de un 30%. La conversión en energía eléctrica mediante celdas de combustible puede alcanzar una eficiencia del 60%, que aumenta a 85% si se aprovecha el calor producido por la celda de combustible.

En cuanto a costos de la energía obtenida de un sistema de hidrógeno solar, estos son todavía muy altos. En los años noventa del siglo pasado se estimó que 0.35 m<sup>3</sup> de hidrógeno almacenado, que equivalen a un kWh, costarían 30 veces más que la misma cantidad de energía almacenada en forma de gas natural.

En la planta experimental de hidrógeno solar, instalada en Alemania por Siemens y otras empresas, se utiliza un sistema fotovoltaico para obtener la electricidad utilizada en la descomposición electrolítica del agua y se investigan todas las etapas del proceso, incluyendo la producción y almacenamiento del hidrógeno, sus diferentes aplicaciones como un vector de energía, pero se estudian también sistemas híbridos, que utilizan gas natural e hidrógeno y que pueden dar lugar aplicaciones prácticas a más corto plazo.

## I.7 El transporte de energía a largas distancias por gasoductos

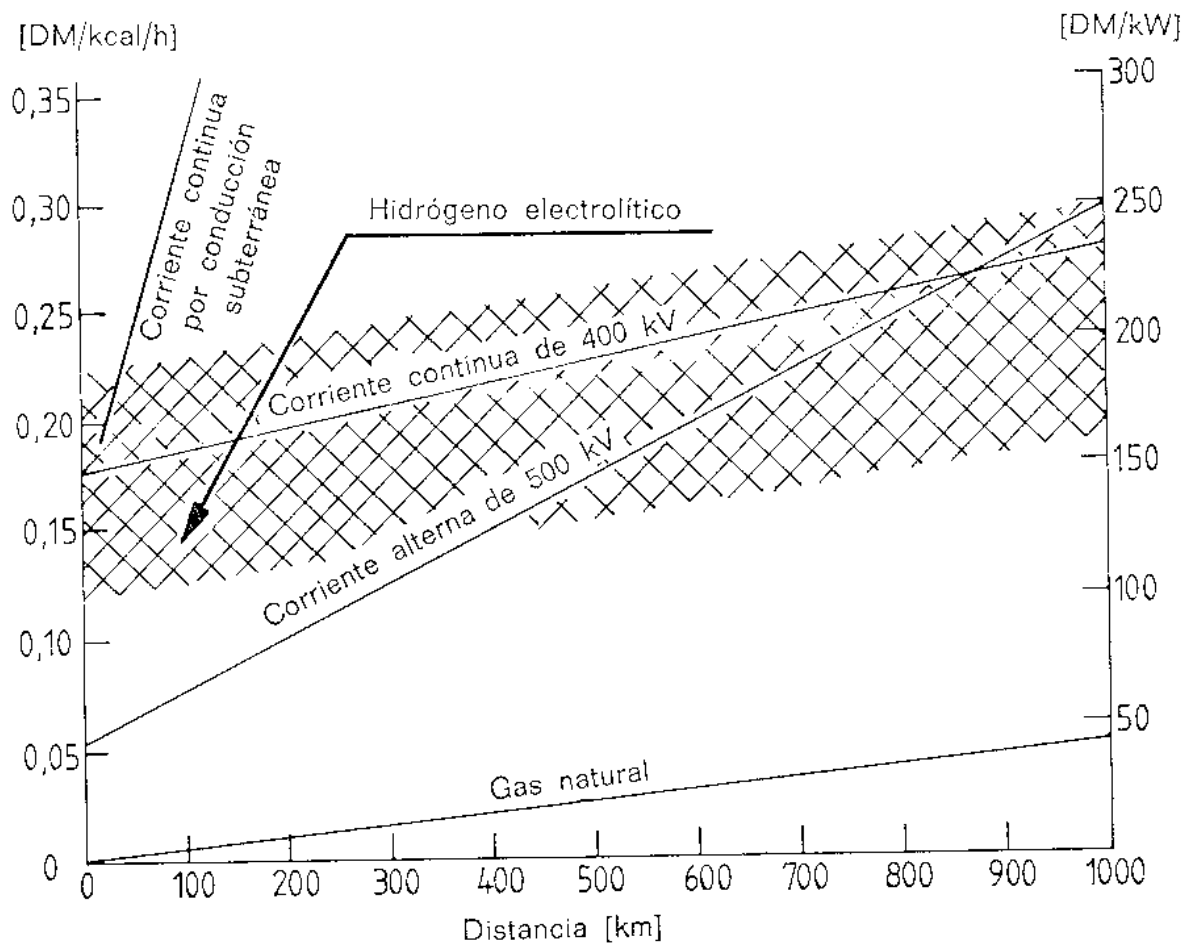
---

En el análisis sobre la construcción de centrales termoeléctricas se ha concluido que, independientemente de que el tipo de combustible fósil utilizado sea carbón, petróleo o gas natural, o de que se trate de centrales nucleares en donde se origine el calor a partir de la desintegración o nuclear, existe una tendencia centrífuga según la cual se evita su localización dentro de las aglomeraciones de población o industriales por razones de seguridad, para trasladarlas lejos, si es posible a lugares poco poblados o a aguas costeras en donde existan suficientes medios de refrigeración. Naturalmente, el fallo principal de esta localización es que causa un encarecimiento del transporte de energía desde los centros productores de corriente eléctrica a los centros de consumo.

El transporte de la corriente mediante líneas de alta tensión a distancias de 1000 km es demasiado caro. ¿Pero existe una alternativa más económica para el transporte de energía a larga distancia? El "ejemplo crucial" nos lo proporciona la ciudad más grande de Estados Unidos que derrocha más energía: Nueva York. La fuente principal de energía primaria para Nueva York es el gas natural de Texas, que a través de gasoductos de casi 2000 km de longitud fluye de sur a norte. De este gas, tal como es norma en los Estados Unidos de América (E.U.A.), se transforma en electricidad en el lugar de producción sólo el estrictamente necesario a proximadamente 20% y el otro 80% restante ya no sufre las pérdidas que origina su transformación en corriente y su transporte por las líneas de alta tensión, sino que se transporta con bajos costos de inversión y mantenimiento hasta el consumidor a través de conducciones de acero a alta presión.

De estos costos existen datos de la "American Gas Association" que comparan los gasoductos y las líneas eléctricas en función de la distancia. En la gráfica I.4, en las abscisas se representan las distancias del transporte de 0 a 1000 km, en las ordenadas de la derecha la inversión necesaria en €/Kw y en las ordenadas de la izquierda se da el mismo dato en €/Kcal/h, para una mejor comprensión. Las diferencias que se observan son notables; la inversión necesaria para una distancia de 1000 km es de 20.46€/Kw para el gas natural y

127.82 €/kV para una línea eléctrica de 500 kW, precio este último que ya se alcanza para el transporte a 100 km mediante cable subterráneo



**Gráfica I.4 Comparación de los costos de transporte en DM/ Kcal/ h (ordenada de la izquierda) o en DM/Kw (ordenada de la derecha) en función de la distancia de transporte en km (abscisa). Se comparan, gas natural (recta inferior, CH<sub>4</sub>)' corriente alterna de 500 kV (recta central), corriente continua de 400 kV. Y corriente continúa por cable subterráneo (las dos rectas superiores). La zona cuadriculada corresponde al transporte de H<sub>2</sub> electrolítico a través de tuberías de acero de alta presión (al igual que el gas natural), en el que se incluyen los costos de electrólisis, los cuales determinan la anchura de esta banda. A partir de 380 km, el transporte de energía por gasoducto de H<sub>2</sub> puede ser más barato que por líneas de alta tensión. Donde DM corresponde a Marcos Alemanes y su equivalencia actual en 1 €= 1.95583 DM.**

En el diagrama de la gráfica I.4 que relaciona la inversión con la distancia de transporte, los costos de l t transporte d e hidrógeno e lectrolítico se encuentran en la zona cuadriculada. El borde superior de esta zona corresponde al precio actual del H<sub>2</sub> comercial y el borde inferior al pr ecio pr evisto para el a ño 2 000. S egún sea e ste pr ecio del hidrógeno, e l punto de intersección con las demás rectas se produce a distancias distintas; la recta para la línea de

tensión alterna de 500 kV corta a la recta superior del transporte a 960 km de distancia y la recta inferior de H<sub>2</sub> a 400 km.

Esto significa que hoy en día el transporte de energía a distancias superiores a 960 km es más económico con H<sub>2</sub> que con líneas de 500 kV y que a distancias inferiores a los 960 km es al revés. Con mejoras en la electrólisis del H<sub>2</sub> esta distancia se reduce a 400 km. Otras experiencias han mostrado que a distancias muy elevadas el transporte del H<sub>2</sub> llega a ser hasta ocho veces más económico que el de corriente eléctrica a 500 kV.

Ya se sabe que las líneas de alta tensión alterna a grandes distancias no funcionan bien. De tal modo que para grandes distancias sólo debe tomarse en cuenta la transmisión de corriente continua a alta tensión, en la cual se investiga desde hace años, que ha sido probada a distancias del orden de 1000 Km y que, en lo que hace referencia a simplicidad y seguridad de funcionamiento, no supera al sistema de gasoducto.

## I.8 Transformación de los sistemas eléctricos con un sistema energético basado en el hidrógeno

---

En un sistema eléctrico basado en el hidrógeno la función de la electricidad quedaría limitada a la producción de hidrógeno por la descomposición electrolítica del agua utilizando energía solar y a la utilización de energía eléctrica producida en celdas de combustible alimentadas con hidrógeno solar y con el oxígeno del aire y con pilas de combustible y generadores eléctricos impulsados por microturbinas, alimentadas con hidrógeno; se sustituiría así la generación en grandes centrales eléctricas por una generación distribuida. La red eléctrica de transmisión e interconexión de alta tensión sería sustituida por una red de ductos que permitieran transportar y almacenar el hidrógeno.

Parece evidente que esta transformación radical del sistema energético, vital para la supervivencia de la especie humana en nuestro planeta, no puede depender solamente de las fuerzas del mercado. Se requiere una voluntad de cambio ejercida por la sociedad. En este sentido y para iniciar el cambio en nuestro país, la Comisión Federal de Electricidad debería convertirse en la Comisión Federal de la Electricidad e Hidrógeno y crearse sus subsidiarias regionales, con participación privada, que impulsaran la generación distribuida.

El Centro Nacional de Control de Energía controlaría la red de ductos para transporte y almacenamiento del hidrógeno que sustituiría gradualmente a la red eléctrica de alta tensión. El Instituto de Investigaciones Eléctricas orientaría sus investigaciones a las de un sistema de hidrógeno solar, de manera que se pueda analizar la factibilidad de las distintas tecnologías y los costos correspondientes.



# **CAPÍTULO 1**

## **LOS COMBUSTIBLES EN EL MUNDO**

# 1.1 Combustibles fósiles a nivel mundial

---

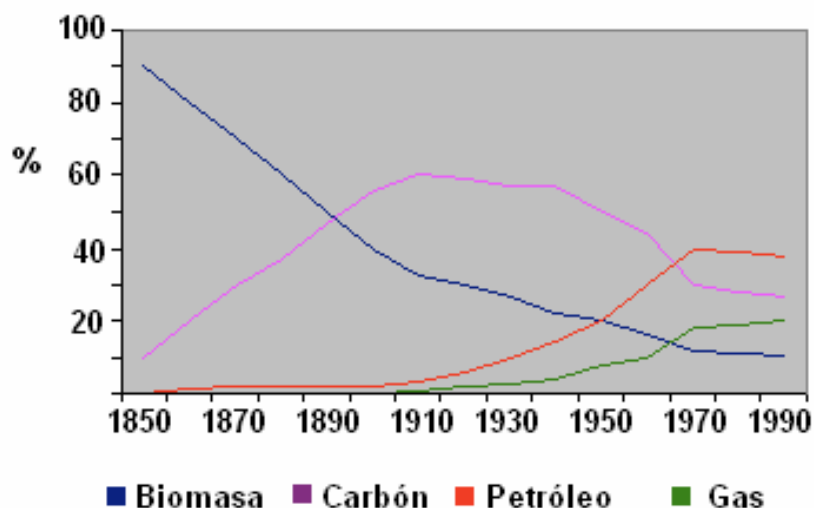
Quizá el momento más decisivo para la humanidad haya sido el descubrimiento del fuego, y gracias a él, la humanidad comenzó a ser capaz de controlar y modificar muchos procesos que hasta ese momento dependían únicamente de la naturaleza. Desde entonces la energía ha sido un elemento indispensable en la satisfacción de las necesidades cotidianas de todas las formas de organización social.

Durante la mayor parte de la historia humana, el sistema energético dependió de los flujos naturales de energía, de la fuerza animal y humana para proveer los servicios requeridos en la forma de calor, luz y trabajo. La única forma de transformación conocida era de energía química a energía calorífica y luminosa, mediante la quema de leña o de velas. Fue a partir de la revolución industrial cuando el sistema energético mundial pasó por dos transiciones significativas: la primera fue la máquina de vapor alimentada por carbón, con la que se realizó la primera conversión de recursos energéticos fósiles en trabajo útil.

La segunda gran transición fue la diversificación de las fuentes de abastecimiento de energía; la llegada de la electricidad fue tal vez el factor más importante para que esta transición ocurriera. Una segunda innovación fue el motor de combustión interna que revolucionó los patrones de transporte individual y colectivo. Sin embargo, junto con esto se dio una creciente dependencia del petróleo como el energético primario que cubriría las necesidades cada vez mayores de combustibles para generación eléctrica y transporte.

El uso de carbón como energético predominante, se dio a principios del siglo XX, fue decayendo gradualmente para dar paso al petróleo como fuente energética principal y a la aparición de diversas fuentes de energía como el gas natural. Sin embargo, a pesar del surgimiento de otras fuentes energéticas, continuamos viviendo una era donde el patrón de

energía está dominado por los recursos fósiles. Principalmente por el petróleo. La figura 1.1 muestra el panorama energético mundial a partir de 1850, donde se puede ver claramente la sustitución paulatina de la biomasa tradicional por los combustibles fósiles.



**Figura 1.1 Evolución de las fuentes de energía a nivel mundial**

La mayoría de los países del mundo han basado su crecimiento económico en los combustibles fósiles como si fueran inagotables o como si las futuras transiciones energéticas fueran tarea de las próximas generaciones, y no de las presentes. En este sentido es necesario considerar que la actual era del petróleo, junto con todos sus beneficios, también ha traído numerosas consecuencias no siempre positivas.

En primer lugar, destaca la división entre países vendedores y compradores, cuya correlación de fuerzas ha sufrido diversos cambios desde principios del siglo XX. El control total del mercado internacional, terminó con la creación de la OPEP en 1960 y a partir de entonces el mercado fue controlado por los vendedores, situación que alcanzó su punto más crítico con el embargo petrolero de 1973, revelando la gran dependencia del mercado mundial respecto a los suministros del Medio Oriente.

El hecho de que el petróleo no es un recurso renovable, y que los países con la mayor reserva-producción están concentrados en la región del Medio Oriente, genera una gran incertidumbre en el panorama global por los riesgos políticos que esto implica para las principales potencias mundiales. Entre Estados Unidos y Europa occidental se consume casi la mitad del petróleo mundial. Los países del Golfo Pérsico que sólo consumen el 4.5% mundial producen en cambio el 26%.

**Tabla 1.1**

<b>Reservas mundiales probadas de petróleo 1998 = 1,052.9 miles de millones de barriles.</b>	
Área geográfica	
Norteamérica (incluye México)	8.0%
Centro y Sudamérica	8.5%
Anterior Unión Soviética	6.3%
Medio Oriente	64.0%
África	7.0%
Asia Pacífico	4.2%
Europa	2.0%

Esta diferencia se agravará en el futuro porque la mayor parte de las nuevas reservas se están descubriendo en los países menos consumidores. Así, se calcula que Estados Unidos tiene reservas para 10 años y Europa para 13, mientras que los países del Golfo acumulan el 57% de las reservas mundiales conocidas.

En segundo lugar, se cuenta con una infraestructura agrícola mundial basada en combustibles fósiles, tanto en su elaboración como en su transporte, cuyo efecto a corto plazo de aumentar la producción alimenticia, ha permitido multiplicar tanto la población humana total como el número de personas que viven en las zonas urbanas.

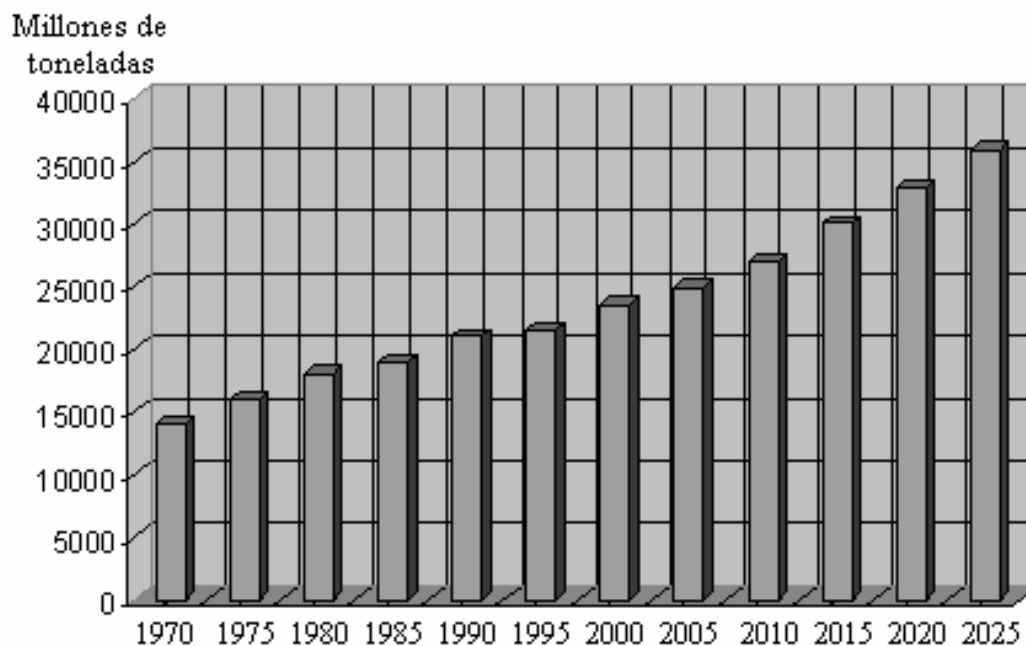
En la actualidad, el 4% de toda la energía consumida en Estados Unidos se destina a la producción de alimentos. Aproximadamente entre un 10 y un 13% del consumo total de Norteamérica se dedica al transporte, procesamiento y distribución de los mismos en los supermercados. Eso significa que más del 17% de la energía de EU se destina a la industria alimenticia.

Este aspecto es muy importante, ya que en la actualidad se cuenta con la tecnología necesaria para generación eléctrica y transportación automotriz sin el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, no es el caso para la agricultura, ya que requiere de la utilización de fertilizantes elaborados con subproductos del petróleo como materia prima. Es decir, por cada litro de petróleo quemado en transporte hoy, hay un litro menos en el futuro que podría ser destinado a la producción agrícola. Esto debe tomarse en cuenta por las políticas mundiales ya que existen países que tienen un rezago alarmante en materia alimenticia.

Finalmente, pero no menos importante es el aspecto ecológico, que ha cobrado gran relevancia a nivel mundial, debido a las afectaciones que el uso de recursos energéticos fósiles generan sobre el ambiente y la salud humana.

La combustión del carbón, petróleo y gas natural es el origen de buena parte de los contaminantes atmosféricos. Más del 80% del dióxido de azufre, 50% de los óxidos de nitrógeno, y de 30% a 40% de las partículas en suspensión emitidos a la atmósfera, proceden de las centrales eléctricas y calderas industriales que queman combustibles fósiles. El 80% del monóxido de carbono y el 40% de los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos emitidos, provienen de la combustión en los motores de los automóviles. Otras importantes fuentes de contaminación son la siderurgia, acereras, fundidoras, refinerías, fábricas de cemento y las fábricas de ácido nítrico y sulfúrico.

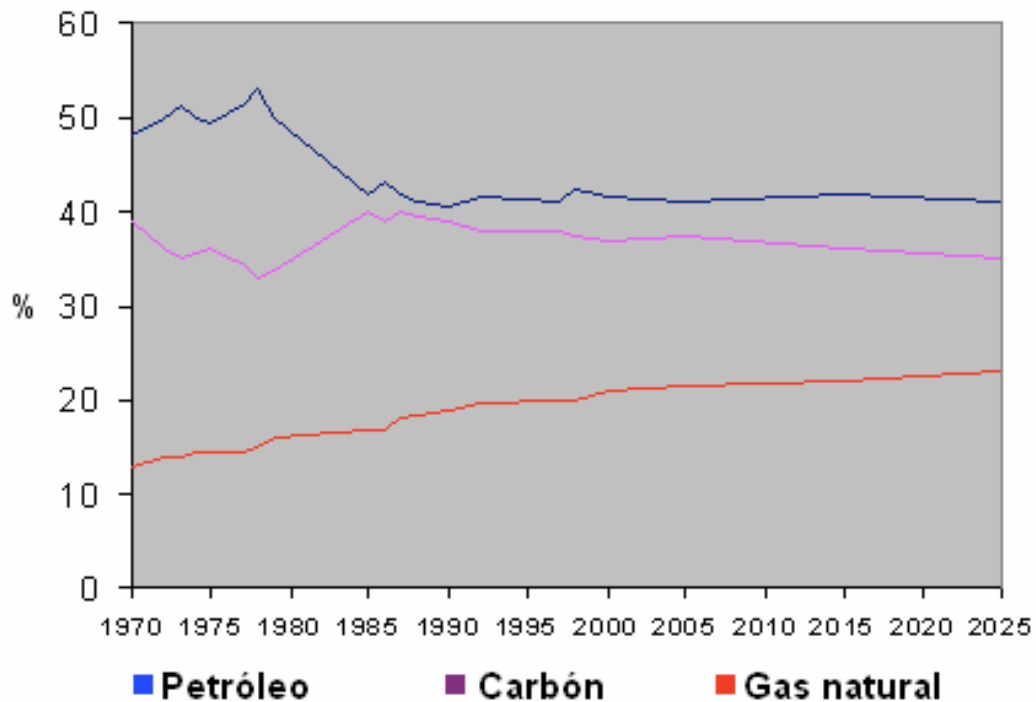
La gravedad de esta situación queda manifiesta si se analizan las emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el principal gas generador del efecto invernadero, ocasionadas por la producción y uso de energía fósil y cuyo volumen se muestra en la figura 1.2.



**Figura 1.2 Emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial**

Como puede observarse, entre 1970 y el año 2000, las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> crecieron en 1.7% anual, mientras que se prevé que entre 2000 y 2025 la tasa de crecimiento sea de 1.8% anual.

Otro aspecto importante que se debe considerar es el de las emisiones de CO<sub>2</sub> por tipo de combustible fósil, de acuerdo con la figura 1.3 el petróleo y el carbón seguirán siendo los combustibles con mayor participación en el volumen total de emisiones.



**Figura 1.3 Emisiones de CO<sub>2</sub> por combustibles fósiles 1970-2025**

Las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la quema de gas natural muestran una tendencia ascendente en su participación porcentual debido a que emite una menor cantidad de CO<sub>2</sub> por unidad utilizada, y al surgimiento de nuevas tecnologías de generación eléctrica más eficientes, económicas y más adaptables a los procesos de apertura del sector eléctrico a nivel mundial.

Se espera un incremento superior al 50% en la demanda mundial de gas natural entre la actualidad y el 2020, solamente la demanda de gas natural para electricidad se triplicará durante este período.

# 1.2 Gasolina

---

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos derivada del petróleo que se utiliza como combustible en motores de combustión interna con encendido a chispa.

Tiene una densidad de 720 g/L (un 15% menos que el gasóleo, que tiene 850 g/L). Un litro de gasolina tiene una energía de 34,78 megajulios, aproximadamente un 10% menos que el gasóleo, que posee una energía de 38,65 megajulios por litro de carburante. Sin embargo, en términos de masa, la gasolina tiene una energía de 48,31 MJ/Kg frente a los 45,47 MJ/Kg del gasóleo.

## Componentes

La gasolina se obtiene del petróleo en una refinería. En general se obtiene a partir de la nafta de destilación directa, que es la fracción líquida más ligera del petróleo (exceptuando los gases). La nafta también se obtiene a partir de la conversión de fracciones pesadas del petróleo (gasoil de vacío) en unidades de proceso denominadas FCC (craqueo catalítico fluidizado) o hidrocráquer. La gasolina es una mezcla de cientos de hidrocarburos individuales desde C<sub>4</sub> (butanos y butenos) hasta C<sub>11</sub> como, por ejemplo, el metilnaftaleno.

## Características

Deben cumplirse una serie de especificaciones requeridas para que el motor funcione bien y otras de tipo ambiental, ambas reguladas por ley en la mayoría de los países. La especificación más característica es el índice de octano ( MON, "*motor octane number*", RON "*research octane number*" o el promedio de los anteriores), que indica su resistencia que presenta el combustible a detonar.



## Índice de Pentano

El octanaje indica la presión y temperatura a que puede ser sometido un combustible carburado (mezclado con aire) antes de auto-detonarse al alcanzar su temperatura de autoignición debido a la ley de los gases ideales. Hay distintos tipos de gasolinas comerciales, clasificadas en función de su número de octano.

## Composiciones químicas

Normalmente se considera nafta a la fracción del petróleo cuyo punto de ebullición se encuentra aproximadamente entre 28 y 177 °C (umbral que varía en función de las necesidades comerciales de la refinería). A su vez, este subproducto se subdivide en nafta ligera (hasta unos 100 °C) y nafta pesada (el resto). La nafta ligera es uno de los componentes de la gasolina, con unos números de octano en torno a 70. La nafta pesada no tiene la calidad suficiente como para ser utilizada para ese fin, y su destino es la transformación mediante reformado catalítico, proceso químico por el cual se obtiene también hidrógeno, a la vez que se aumenta el octanaje de dicha nafta.

Además de la nafta reformada y la nafta ligera, otros componentes que se usan en la formulación de una gasolina comercial son la nafta de FCC, la nafta ligera isomerizada, la gasolina de pirólisis desbencenizada, butano, butenos, MTBE, ETBE, alquilato y etanol. Las fórmulas de cada refinería suelen ser distintas (incluso perteneciendo a las mismas compañías), en función de las unidades de proceso de que dispongan y según sea verano o invierno.

La nafta se obtiene por un proceso llamado *fluid catalytic cracking FCC* (a veces denominada gasolina de FCC) de gasoil pesado. Si no está refinada puede tener hasta 1000 ppm de azufre. Tiene alrededor de un 40% de aromáticos y 20% de olefinas. Sus números de octano (MON/RON) están en torno a 80/93.

La nafta ligera isomerizada (isomerato) se obtiene a partir de la nafta ligera de destilación directa, mediante un proceso que usa catalizadores sólidos en base platino/aluminio o zeolíticos. Es un componente libre de azufre, benceno, aromáticos y olefinas, con unos números de octano (MON/RON) en torno a 87/89.

La gasolina de pirólisis desbencenizada se obtiene como subproducto de la fabricación de etileno a partir de nafta ligera. Está compuesta aproximadamente por un 50% de aromáticos (tolueno y xilenos) y un 50% de olefinas (isobuteno, hexenos). Tiene en torno a 200 ppm de azufre. El benceno que contiene en origen suele ser purificado y vendido como materia prima petroquímica. Sus números de octano (MON/RON) están en torno a 85/105.

El alquilato se obtiene a partir de isobutano y butenos, mediante un proceso que usa catalizadores ácidos (bien ácido sulfúrico bien ácido fluorhídrico). Tampoco tiene azufre, benceno, aromáticos ni olefinas. Sus números de octano (MON/RON) están en torno a 94/95.

# 1.3 Diesel

---

El gasóleo, también denominado gasoil o diesel, es un líquido de color blancuzco o verdoso y de densidad sobre  $850 \text{ kg/m}^3$  ( $0,850 \text{ g/cm}^3$ ), compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en motores diesel y en calefacción.

Es más sencillo de refinar que la gasolina y suele costar menos, pero tiene mayores cantidades de compuestos minerales y de azufre. El gasóleo tiene aproximadamente un 18% más energía por unidad de volumen que la gasolina, lo que le da mayor eficiencia a los motores con ciclo diesel y contribuye a un rendimiento mucho mayor.

Un aspecto negativo es las altas emisiones en NOx. Muchos países requieren de expandir sus redes de estaciones de servicio. Por otra parte en países desarrollados existen normas que regulan la reducción de azufre y esto da pie al desarrollo de motores aún más eficientes que además permiten el uso de catalizadores para reducir las emisiones de NOx.

## **Obtención**

Es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  a presión atmosférica. El gasóleo es más sencillo de refinar que la gasolina y suele costar menos. Por el contrario, tiene mayores cantidades de compuestos minerales y de azufre.

Se consigue de la fracción destilada del petróleo denominada gasóleo. Tiene propiedades diferentes a la gasolina pues ésta contiene hidrocarburos más livianos. El combustible diesel

es más pesado y aceitoso, a veces se le denomina aceite diesel, se evapora más lentamente y su punto de ebullición es más alto, incluso supera al del agua.

## Variaciones del producto

- Gasóleo - un poco menos refinado que el que se usa en automoción.
- MDO (*Marine Diesel Oil*) - un gasóleo intermedio.
- IFO (*Intermediate Fuel Oil*) - un producto a mitad de camino entre el fuel y el gasóleo.
- MFO (*Medium Fuel Oil*) - una mezcla de HFO y MDO.
- HFO (*Heavy Fuel Oil*) - sustancia pastosa, marrón oscuro y viscosa que a temperatura ambiente no fluye, por lo que hay que precalentarlo antes de quemarlo.

## 1.4 Gas natural

---

El gas natural es una fuente de energía no renovable formada por una mezcla de gases que se encuentra frecuentemente en yacimientos de petróleo, no-asociado (solo), disuelto o asociado con el (acompañando al) petróleo o en depósitos de carbón.

Aunque su composición varía en función del yacimiento del que se extrae, está compuesto principalmente por metano en cantidades que comúnmente pueden superar el 90 ó 95%, y suele contener otros gases como nitrógeno,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , helio y mercaptanos. Como ejemplo de contaminantes cabe mencionar el gas no-asociado de Kapuni (NZ) que contiene hasta 49% de  $\text{CO}_2$ . Como fuentes adicionales de este recurso natural, se están investigando los yacimientos de hidratos de metano que, según estimaciones, pueden suponer una reserva energética muy superiores a las actuales de gas natural.

Algunos de los gases que forman parte del gas natural extraído se separan de la mezcla porque no tienen capacidad energética (nitrógeno o  $\text{CO}_2$ ) o porque pueden depositarse en las tuberías usadas para su distribución debido a su alto punto de ebullición. Si el gas fuese criogénicamente licuado para su almacenamiento, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) solidificaría interfiriendo con el proceso criogénico.

El propano, butano e hidrocarburos más pesados en comparación con el gas natural son extraídos, puesto que su presencia puede causar accidentes durante la combustión del gas natural. El vapor de agua también se elimina por estos motivos y porque a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente y presiones altas forma hidratos de metano que pueden obstruir los gasoductos. Los compuestos de azufre son eliminados hasta niveles muy bajos para evitar corrosión y olores perniciosos, así como para reducir las emisiones de compuestos causantes de lluvia ácida.

Para uso doméstico, al igual que al butano, se le añaden trazas de compuestos de la familia de los mercaptanos entre ellos el metil-mercaptano, para que sea fácil detectar una fuga de gas y evitar su ignición espontánea.

## **Generación de CO<sub>2</sub>**

El gas natural produce mucho menos CO<sub>2</sub> que otros combustibles como los derivados del petróleo, y sobre todo el carbón. Además es un combustible que se quema más limpia y eficazmente.

La razón por la cual produce poco CO<sub>2</sub> es que el principal componente, metano, contiene cuatro átomos de hidrógeno y uno de carbono, produciendo 2 moléculas de agua por cada una de CO<sub>2</sub>, mientras que los hidrocarburos de cadena larga (líquidos) producen sólo 1 molécula de agua por cada 1 de CO<sub>2</sub> (recordemos que el calor de formación del agua es muy alto).

Como ventaja añadida es un combustible más versátil, que puede utilizar en sistemas de generación más eficientes como el ciclo combinado o la pila de combustible y su obtención es más sencilla en comparación con otros combustibles. Sin embargo, su contenido energético por unidad de volumen es bajo en comparación con otros combustibles.

El 87% de todas las formas de energía que usamos corresponde a hidrocarburos. El carbón, junto al petróleo genera 64%, el gas genera el 23% (equivalente a unos 50 millones de barriles de petróleo al día). Un 12% es generado con hidroeléctricas y plantas nucleares. Todas las demás formas de energía eólica, solar, geotérmica, etc. representan solo el 1%. El gas natural es un hidrocarburo fósil atrapado bajo la tierra en depósitos que alcanzan enormes dimensiones. Como todo hidrocarburo, el gas natural, compuesto de carbono e hidrógeno, es un combustible con alto contenido de energía.

# 1.5 Etanol

---

El etanol es un compuesto químico que puede utilizarse como combustible, bien solo, o bien mezclado en cantidades variadas con gasolina, y su uso se ha extendido principalmente para reemplazar el consumo de derivados del petróleo. El combustible resultante de la mezcla de etanol y gasolina se conoce como gasohol oalconafta. Dos mezclas comunes son E10 y E85, con contenidos de etanol del 10% y 85%, respectivamente.

El etanol también se utiliza cada vez más como añadido para oxigenar la gasolina estándar, reemplazando al éter metil tert-butílico (MTBE). También puede utilizarse como combustible en las celdas de combustible. Para la producción de etanol en el mundo se utiliza mayormente como fuente biomasa. Este etanol es denominado, por su origen, bioetanol.

## **Fuentes y proceso de fabricación**

El etanol puede producirse de dos formas. La mayor parte de la producción mundial se obtiene del procesamiento de materia biológica, en particular ciertas plantas con azúcares. El etanol así producido se conoce como bioetanol. Por otra parte, también puede obtenerse etanol mediante la modificación química del etileno, por hidratación.

## **Bioetanol**

El etanol puede producirse a partir de un gran número de plantas, con una variación, según el producto agrícola, del rendimiento entre el combustible consumido y el generado en dicho proceso. Este etanol, conocido como bioetanol, está sujeto a una fuerte polémica: para unos se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede

ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles, mientras que para otros es el responsable de grandes deforestaciones y del aumento del precio de los alimentos, al suplantar selvas y terrenos agrícolas para su producción, dudando además de su rentabilidad energética.

El etanol se obtiene fácilmente del azúcar o del almidón en cosechas de maíz y caña de azúcar, entre otros. Sin embargo, los actuales métodos de producción de bioetanol utilizan una cantidad significativa de energía en comparación con la energía obtenida del combustible producido. Por esta razón, no es posible sustituir enteramente el consumo actual de combustibles fósiles por bioetanol.

## Proceso de obtención por Fermentación

Desde la antigüedad se obtiene el etanol por fermentación anaeróbica de azúcares con levadura en solución acuosa y posterior destilación. La aplicación principal tradicional ha sido la producción de bebidas alcohólicas.

Hoy en día se utilizan varios tipos de materias primas para la producción a gran escala de etanol de origen biológico (*bioetanol*):

Sustancias con alto contenido de sacarosa:

- Caña de azúcar
- Remolacha
- Melazas
- Sorgo dulce

Sustancias con alto contenido de almidón:

- Maíz



- Patata
- Yuca

Sustancias con alto contenido de celulosa:

- Madera
- Residuos agrícolas (incluyendo los residuos de los cítricos).

El proceso a partir de almidón es más complejo que a partir de sacarosa, pues el almidón debe ser hidrolizado previamente para convertirlo en azúcares. Para ello se mezcla el vegetal triturado con agua y con una enzima (o en su lugar con ácido), y se calienta la papilla obtenida a 120 - 150°C. Posteriormente se cuela la masa, en un proceso llamado escarificación, y se envía a los reactores de fermentación.

A partir de celulosa es aun más complejo, ya que primero hay que pre-tratar la materia vegetal para que la celulosa pueda ser luego atacada por las enzimas hidrolizantes. El pre-tratamiento puede consistir en una combinación de trituración, pirólisis y ataque con ácidos y otras sustancias. Esto es uno de los factores que explican por qué los rendimientos en etanol son altos para la caña de azúcar, mediocres para el maíz y bajos para la madera.

La fermentación de los azúcares es llevada a cabo por microorganismos (levaduras o bacterias) y produce etanol, así como grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Además produce otros compuestos oxigenados indeseables como el metanol, alcoholes superiores, ácidos y aldehídos. Típicamente la fermentación requiere unas 48 horas.

En la actualidad tres países han desarrollado programas significativos para la fabricación de bioetanol como combustible: Estados Unidos (a partir de maíz), Brasil y Colombia (ambos a partir de caña de azúcar). El etanol se puede producir a partir de otros tipos de cultivos,

como remolachas, zahína, mijo perenne, cebada, cáñamo, kenaf, patatas, mandioca y girasol. También puede extraerse de múltiples tipos de celulosa "no útil". Esta producción a gran escala de alcohol agrícola para utilizarlo como combustible requiere importantes cantidades de tierra cultivable con agua y suelos fértiles.

Se pueden obtener cantidades más reducidas de alcohol combustible de los tallos, de elementos reciclados, de la paja, de las mazorcas de maíz, y de productos sobrantes de las granjas que ahora se utilizan para hacer piensos, fertilizantes, o que se utilizan como combustibles de plantas de energía eléctrica. De hecho, EEUU podría conseguir todo el etanol que necesita usando una mezcla de, por ejemplo, los tallos (parte no aprovechada) del maíz y de la planta de maíz, sin roturar más tierras de labrantío (sin embargo, habría que cultivar más tierra para substituir ese material, usado por muchos granjeros como fuente barata, confiable y limpia de piensos o fertilizantes).

## **Mezclas de etanol con otros combustibles**

Generalmente, cuanto mayor es el contenido de etanol en una mezcla de gasohol, más baja es su conveniencia para los motores corrientes de automóvil. El etanol puro reacciona o se disuelve con ciertos materiales de goma y plásticos y no debe utilizarse en motores sin modificar. Además, el etanol puro tiene un octanaje mucho más alto (116 AKI, 129 RON) que la gasolina común (86/87 AKI, 91/92 RON), requiriendo por tanto cambiar el cociente de compresión o la sincronización de la chispa para obtener el rendimiento máximo. Cambiar un coche que utilice gasolina pura como combustible a un coche que utilice etanol puro como combustible, necesita carburadores y caudales más grandes (un aumento de área de cerca del 30-40%). El metanol requiere un aumento uniforme más grande de área, aproximadamente 50% más grande.

El término E85 se utiliza para la mezcla de un 15% de gasolina (por volumen) y de un 85% de etanol. Esta mezcla tiene un octanaje de cerca del 105. Lo cual es sensiblemente más bajo

que el etanol puro, pero mucho mayor que el de la gasolina normal. La adición de una pequeña cantidad de gasolina ayuda a un motor convencional a arrancar al estar el motor (y el combustible) frío. El E85 no contiene siempre exactamente un 85% de etanol. En invierno, especialmente en climas más fríos, donde las temperaturas llegan a bajar de 11°C, se agrega una mayor proporción de gasolina con el fin de facilitar el arranque en frío,<sup>5</sup> siendo sustituido el E85 por E70 en Estados Unidos y E75 en Suecia. Normalmente el E85 ha tenido un costo similar a la gasolina, pero con las grandes subidas del precio del petróleo de 2005 ha llegado a ser común ver E85 vendido hasta por 0.18USD menos por litro que la gasolina, haciéndolo altamente atractivo al pequeño pero creciente número de usuarios con coches capaces de quemarlo.

Desde que apareció el modelo de 1999, va en aumento el número de vehículos en el mundo que se fabrican con motores capaces de funcionar con cualquier gasolina a partir del etanol: desde cero hasta 85% de etanol sin modificación. Muchos coches comerciales ligeros (una clase que contiene monovolúmenes, todo terreno y furgonetas) se diseñan como vehículos flexibles para utilizar varias combinaciones de combustible, pues pueden detectar automáticamente el tipo de combustible y cambiar el comportamiento del motor, principalmente la sincronización de la ignición y la relación de compresión para compensar los diversos octanajes del combustible en los cilindros del motor.

## 1.6 Combustibles fósiles en México

---

La información confiable sobre las fuentes energéticas utilizadas históricamente en México no se remonta más allá del año 1965, por lo que no es posible establecer con precisión los períodos en los que ocurrieron las primeras transiciones energéticas. Sin embargo, los datos disponibles permiten obtener conclusiones importantes acerca de la situación energética actual en el país. Así, la figura 1.4 ilustra la evolución de la oferta energética durante los últimos cuarenta años.

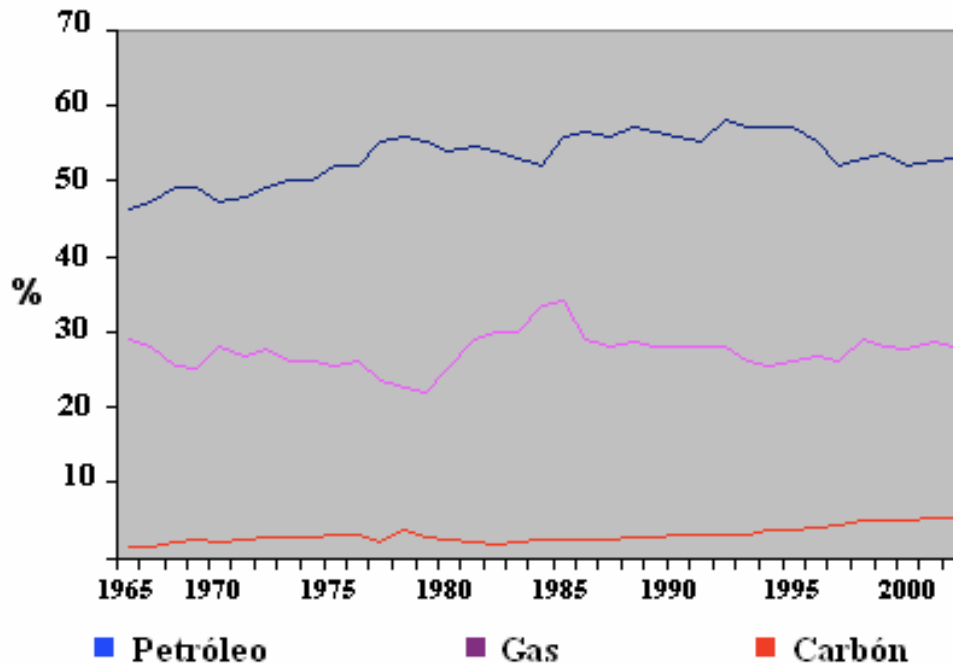


Figura 1.4 Evolución de la oferta de energía en México, 1965-2000

Cabe destacar la escasa demanda que tiene el carbón en el país, al abarcar menos del 10% de la oferta interna bruta. Esta situación se debe esencialmente a los escasos yacimientos de carbón que existen en México.

Por otra parte, el petróleo es el energético predominante en la oferta, con una participación de alrededor del 50% a lo largo del período, la cual, sin embargo, ha tendido a decrecer en la última década. Esta elevada participación es resultado de la situación de México como país productor de petróleo, lo que representa una alta disponibilidad de este energético, y por la política de desarrollo industrial mantenida desde la expropiación petrolera hasta principios de la década de los ochenta, la cual consistió en una utilización masiva de energéticos como el combustóleo, la mayoría de las veces en procesos poco eficientes y sin ningún cuidado al ambiente.

Al cierre del mes de marzo de 2006, la CFE contó con una capacidad efectiva instalada para generar energía eléctrica de 45,651 MW, de los cuales: 8,245.9 MW son de productores independientes (termoeléctricas); 10,284.98 MW son de hidroeléctricas; 22,194.33 MW corresponden a las termoeléctricas de CFE; 2,600 MW a carboeléctricas; 959.50 MW a geotermoeléctricas; 1,364.88 MW a la nucleoeléctrica, y 2.18 MW a la eoloeléctrica.

En la actualidad, el porcentaje correspondiente a generación eólica en cuanto a capacidad total instalada en el país es de 0.005%, como lo indica la figura 1.5.

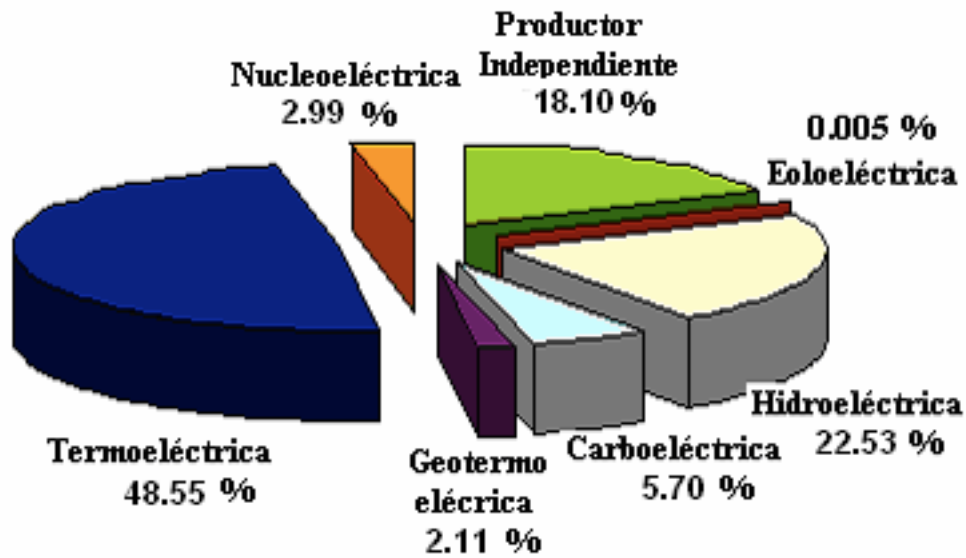


Figura 1.5 Capacidad efectiva instalada para generar electricidad

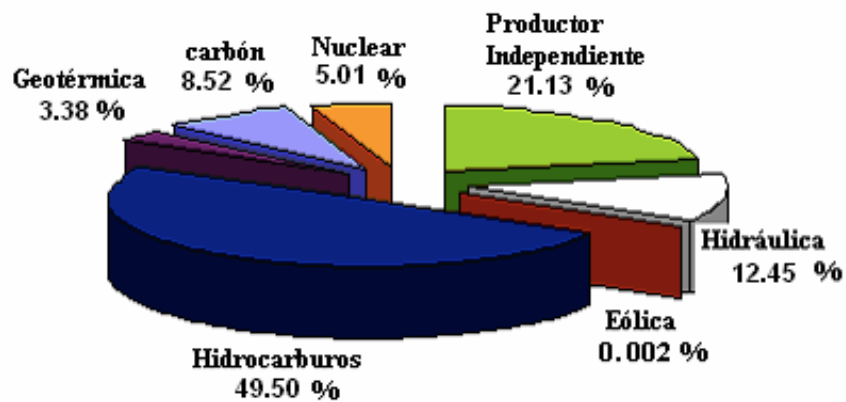


Figura 1.6 Generación eléctrica por fuente de energía

El gas natural es hoy por hoy una de las mejores opciones posibles para su uso como fuente energética primaria en México. Sin embargo, no es una solución perfecta, ya que solo disminuye la cantidad de CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida, y si a eso se añade que el gas natural, al igual que el petróleo y el carbón es un recurso no renovable, será necesario

buscar otras formas de enfrentar la problemática que surge de la necesidad de contar con fuentes energéticas capaces de satisfacer la demanda que requieren las sociedades actuales sin comprometer el desarrollo de las generaciones futuras.

De acuerdo con esto, es fundamental que los gobiernos comiencen a visualizar de manera objetiva los años que le quedan a la era de los combustibles fósiles como una transición hacia otras formas de energía, y en este contexto las fuentes renovables pueden ser un instrumento idóneo. Diversos países, en su mayoría países desarrollados, han empezado a tomar medidas para reducir el uso de hidrocarburos mediante acuerdos internacionales en los que se comprometen a disminuir sus emisiones contaminantes por medio de planes ambientales de índole político económico que les permitan alcanzar estas metas.

# 1.7 Protocolo de Kyoto

---

En esencia, el protocolo de Kyoto convoca a una reducción de las emisiones de los gases de invernadero (CO<sub>2</sub>, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre) a los países desarrollados y a algunos países con economías en transición. Esta iniciativa, surgida en diciembre de 1997 bajo la Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas, podría tener en el futuro, profundos efectos sobre el uso de combustibles sobre países que lo ratifiquen. Cabe señalar que México firmó su adhesión a este protocolo como país miembro del Anexo II el 9 de junio de 1998 y la ratificó el 7 de septiembre de 2000.

Bajo los términos del Protocolo de Kyoto, los países se agrupan en dos anexos. El Anexo I incluye a la mayoría de los países industrializados, mientras que el Anexo II incluye a los países en vías de desarrollo. De esta forma, para el período de 2008 a 2012, los países del anexo I se comprometerán a reducir sus emisiones totales de gases de invernadero en al menos 5% respecto a los niveles de 1990. Las metas cuantificadas de emisión son establecidas para cada país de manera diferenciada.

Para alcanzar estas metas de reducción, los países del anexo I pueden implementar medidas internas de reducción de emisiones a los llamados “mecanismos flexibles”, diseñados para ayudar a los países a alcanzar sus metas de reducción de la manera más eficiente, a través del mercado. Estos mecanismos consisten en lo siguiente:

- *Comercio internacional de emisiones*: Este mecanismo permite que a partir del 2008 los países del Anexo I siempre y cuando hayan reducido sus emisiones de gases de efecto invernadero en 10 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> más allá de su meta establecida puede vender este excedente de emisiones reducidas a otros países del Anexo I que no hayan cubierto su cuota de reducción.



- *Implementación conjunta*: Permite a los países del Anexo I invertir, a través de sus gobiernos u otras instituciones legales en proyectos de reducción de emisiones en otros países del Anexo I, conservando el país inversionista sus créditos que le podrán ayudar a alcanzar sus metas internas.

- *Mecanismos de desarrollo limpio*: Es similar al de la implementación conjunta, con la diferencia de que los países destinatarios de la inversión no pertenecen al Anexo I, lo que abre la posibilidad de que este tipo de proyectos beneficie a economías en desarrollo. Al estar las energías renovables fuertemente vinculadas con el uso de fuentes limpias, este mecanismo representa una gran oportunidad para impulsar su desarrollo en México.

En lo que respecta a este último mecanismo, cabe el ejemplo de la construcción un parque eólico de 200 MW llamado “Bii Nee Stipa (Viento que trae energía)” en la Ventosa, Oaxaca por parte de Gamesa eólica de España, la cual ha sido presentada ante la ONU para ser registrada dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio para la obtención de créditos de carbono (CO<sub>2</sub>). Las autoridades nacionales designadas en España y México, aprobaron su participación como países receptor y emisor respectivamente, de los créditos de carbono que sean generados por el parque eólico.

## 1.8 Energías renovables

---

El progreso científico y tecnológico ha determinado la aparición en el mapa energético de nuevas formas de aprovechamiento de energías renovables que un siglo atrás hubieran resultado impensables, como las celdas solares, los sistemas eólicos o los biocombustibles, por mencionar solo algunos. Esto, aunado a ciertos nichos económicos favorables para su utilización, a la identificación de regiones con un alto potencial de aprovechamiento y a la creciente aceptación de la opinión pública de sus ventajas ambientales sobre las energías convencionales, le ha conferido a las energías renovables una importancia creciente.

La figura 1.7 muestra la tasa anual de crecimiento mundial de las energías renovables durante las últimas tres décadas. Se aprecia que mientras las fuentes renovables tradicionales muestran un crecimiento moderado, las nuevas renovables (caracterizadas por el uso de tecnología avanzada) crecieron en promedio 9.4% cada año.

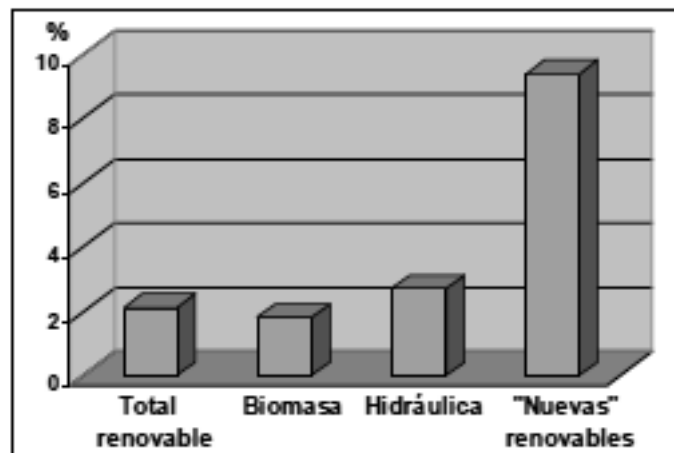
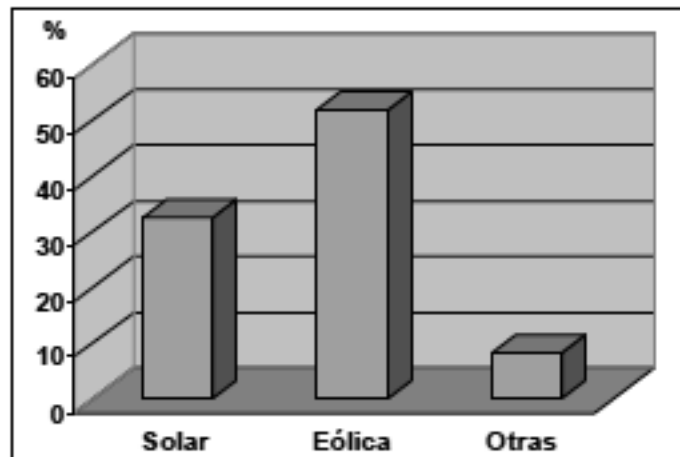


Figura 1.7 Crecimiento anual de la oferta renovable en el mundo, 1971 - 2000

Pero si se analiza por separado cada una de estas “nuevas” fuentes, se observa que la energía solar y la energía eólica tienen un crecimiento de 32.6% y 52.1% anual, respectivamente. Tal como lo indica la figura 1.8. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que treinta años atrás estas dos fuentes tenían un nivel de desarrollo incipiente.



**Figura 1.8 Crecimiento anual (1970-2000) de la oferta de las “nuevas” energías renovables**

Es evidente la gran aceptación que ha tenido la energía eólica en los últimos treinta años; principalmente como fuente de generación de electricidad. La apertura que los países desarrollados han dado a la utilización de la energía de los vientos ha ido en aumento debido a que hoy por hoy, el viento es la fuente renovable de energía con una mejor relación costo-eficiencia. Según la Asociación Americana de la Energía Eólica, el precio del kW/h de energía generada a partir del viento ha caído de 40 centavos de dólar a comienzos de los años ochenta hasta menos de 5 centavos de dólar en la actualidad.

# 1.9 Energía eólica

---

El calentamiento no uniforme de la atmósfera y de la superficie terrestre debido a la radiación solar, resulta de una distribución desigual de presión en la atmósfera, lo que genera el movimiento de masas de aire, es decir el viento.

Debido a la dependencia de la radiación solar y a las diferencias de presión a lo largo de todo el planeta, el viento es intermitente y tiene dos patrones principales: el estacional y el diario. El patrón estacional describe la intensidad del viento a lo largo del año, mostrando los meses de menor, media o máxima intensidad. Los patrones diarios de viento, típicos de cada estación, nos muestran los posibles períodos horarios de déficit o exceso de generación de acuerdo al patrón de demanda eléctrica estacional o diaria respectivamente.

En la actualidad las mediciones de velocidad y dirección del viento se obtienen por medio de sensores electrónicos y por satélite, dichas mediciones son almacenadas en bases de datos y procesadas por paquetes de cómputo especializados que realizan diversos cálculos que describen el comportamiento del viento.

## **Impacto ambiental y socioeconómico**

Se ha demostrado que la generación eoloeléctrica se está integrando a los sectores eléctricos de diversos países en un contexto de diversificación energética. La experiencia adquirida a través de los años muestra que esta generación renovable es una alternativa viable que complementa a la generación de tipo convencional.

El empleo de la generación eólica ofrece diversas ventajas ambientales como lo es una importante mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, precursores de lluvias y de ozono. Se estima que la operación de 10 000 MW de origen eólico evitaría la emisión de 20 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año, lo que a su vez representaría un ahorro de 3 500 millones de dólares por la no quema de combustibles fósiles.

Representa una actividad que tiene un importante potencial para la creación de nuevas fuentes de empleo, sobre todo en la empresa mediana y pequeña. Para finales de 1996, la Asociación Europea de Energía eólica estimó que en Europa ya existían más de 20,000 personas trabajando en la industria eolieléctrica.

En cuanto a la fabricación e instalación de aerogeneradores, el indicador para la creación de fuentes de empleo es de 6 personas por año por nuevo MW. Para la operación y mantenimiento se habla de un potencial de generación de empleo de 100 a 450 personas por año por cada TWh generado.

Se estima que por cada puesto de trabajo en la fabricación, instalación, operación y mantenimiento de aerogeneradores se crea al menos otro puesto de trabajo en sectores asociados tales como asesorías, investigación, finanzas, etc. Conjuntamente con este impacto en términos de creación de empleos, la disponibilidad del recurso eólico abre la posibilidad de establecer una industria eólica con importantes beneficios económicos y ambientales, que puede ser el catalizador de un desarrollo regional o local.

Por lo contrario, los impactos negativos que se atribuyen a la generación eólica son principalmente, la emisión de ruido acústico que puede llegar a ser un inconveniente cuando los sistemas eolieléctricos se instalan cerca de lugares habitados. Esto ha llegado a representar una limitante en países que tienen poca extensión territorial. Sin embargo, para no ocasionar esta molestia, algunos países han emitido normas ambientales que limitan su cercanía a lugares habitados.

Otro impacto es el visual, en tanto que se argumenta que estos sistemas dañan el paisaje. Este impacto al igual que en el caso de ruido, depende en gran medida de la cercanía de los sistemas eoloeléctricos con las poblaciones y de la percepción de las personas. Otro impacto es el que se tiene sobre las aves al chocar contra los rotores y las estructuras de los aerogeneradores.

Analizando estos factores es importante realizar una evaluación comparativa entre los beneficios y los posibles efectos negativos asociados a la generación eólica. Es evidente que a lo largo de la historia del desarrollo industrial de la humanidad, se han satisfecho las necesidades energéticas en aras del progreso a costa de causar un importante cambio al ecosistema y los recursos naturales, es prácticamente imposible que este proceso se realice sin alterar en cierta medida el entorno que nos rodea. Sin embargo, las condiciones actuales en las que nos encontramos como sociedad nos exigen buscar alternativas que nos permitan que esas alteraciones causen el menor impacto negativo posible.

# 1.10 Hidrógeno

---

Es sabido por muchos especialistas que las reservas petroleras de diversos países han llegado a un punto de inflexión, si se considera su explotación como una curva de campana, donde comienza el descenso en la producción mundial de petróleo. Al estar los combustibles fósiles totalmente ligados a la explotación de esta fuente energética, y, con la certeza de que el gas natural, como fuente no renovable y “sustituto” actual del petróleo, alcanzará también este punto de declive en su explotación, se llega a la conclusión de que es necesario ampliar las opciones en materia de combustibles.

Como consecuencia de lo anterior, diversos países, a través de la investigación, se han dado a la tarea de encontrar combustibles libres de contaminantes que les permitan diversificar sus opciones energéticas. Los resultados obtenidos apuntan hacia el hidrógeno como el vector energético que permita la diversificación y gradual sustitución de las fuentes de energía no renovables.

La obtención y perfeccionamiento de tecnologías del hidrógeno ha recibido gran atención en los últimos tiempos y se le está dedicando a nivel mundial gran cantidad de recursos tanto a la investigación como a su desarrollo.

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo. Constituye el 90% de la masa del universo, es la más ligera e inmaterial de todas las formas de energía y la más eficiente cuando es quemada. Se encuentra tanto en el agua como en los combustibles fósiles y en todos los seres vivos.

El hidrógeno que hay en el agua y los organismos constituye el 70% de la superficie de la Tierra. Sin embargo, raramente se halla en estado libre y aislado, como sucede con el carbón, el petróleo y el gas natural; al quemarse solo produce energía y agua, por lo que es el combustible más limpio que existe. Sin embargo, no se utiliza como tal, por el contrario tiene multiplicidad de usos no

energéticos en la industria y se emplea de esta manera en grandes cantidades. El uso no energético de hidrógeno que se consume actualmente es alrededor de la quinta parte del consumo actual de gas natural mundial y se le obtiene a partir de la reformación de hidrocarburos fósiles.

Desafortunadamente, en la actualidad casi la mitad del hidrógeno que se produce en el mundo es extraído del gas natural por medio de un proceso de reformación con vapor de agua. El método consiste en provocar una reacción entre el gas natural y el vapor, obteniendo hidrógeno molecular, dejando como residuo dióxido de carbono. También se puede reformar el carbón para producir hidrógeno por medio de un proceso de gasificación, pero resulta más caro que hacerlo con gas natural. Se puede obtener también a partir del petróleo o de la biomasa gasificada.

Aunque el uso de vapor para reformar el gas natural ha demostrado ser la forma más barata de producir hidrógeno en la actualidad con fines comerciales, se sigue basando en hidrocarburos con emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso. Es cuestionable que los esfuerzos no estén mayoritariamente enfocados a la obtención de hidrógeno a partir de nuevas fuentes renovables de energía.

Existe otra forma de producir hidrógeno sin utilizar combustibles fósiles en el proceso. Se trata de un proceso conocido desde hace 100 años: La electrólisis. Se basa en el uso de la electricidad para descomponer la molécula del agua H<sub>2</sub>O en átomos de hidrógeno y oxígeno. Desafortunadamente solo el 4% del hidrógeno que se produce actualmente procede de la electrólisis del agua, ya que los costos actuales de la electricidad empleada en el proceso hacen que no resulte competitiva en relación con la reformación del gas natural. Los precios de la electricidad pueden llegar a ser 3 o 4 veces superior al de los materiales empleados para obtener hidrógeno a partir del gas natural.

Sin embargo, la producción de hidrógeno por medio de la electrólisis puede ser justificable si la electricidad que requiere el proceso se obtiene de fuentes renovables, contando así con el potencial suficiente para formar un sistema energético sin emisiones contaminantes. Es verdad que a la fecha el costo de dichas formas renovables de energía deberá bajar considerablemente antes de que el proceso resulte competitivo frente a la reformación del gas natural con vapor.



Los precios de los electrolizadores basados en energía solar o eólica son todavía altos, aunque se prevé que se reduzcan a la mitad durante la próxima década, ya que a lo largo de la historia se ha comprobado que en sus inicios, las fuentes de energía resultan caras, resultando en una disminución en sus costos a medida que las tecnologías de explotación se hacen más baratas, sofisticadas y de uso masivo.

El paso a una diversificación energética a partir de energías renovables podría aminorar, y en el largo plazo eliminar la excesiva dependencia del mundo respecto del petróleo, causando un gran impacto principalmente en los sectores eléctrico y de transporte tal y como hace un siglo lo hizo el petróleo. La experiencia adquirida del funcionamiento de sistemas a base de energías renovables de los países que los han implementado en una escala importante, muestra que dichos sistemas se adaptan mejor a un sistema sustentable de producción de energía, debido a sus ventajas ambientales, sociales, de impulso al crecimiento económico regional y local, desarrollo científico, tecnológico e industrial.

# CAPÍTULO 2

## HISTORIA DEL HIDRÓGENO

## 2.1 Generalidades

---

El hidrógeno es un elemento químico representado por el símbolo H y con un número atómico de 1. En condiciones normales de presión y temperatura, es un gas diatómico ( $H_2$ ) incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Con una masa atómica de 1,00794(7) u, el hidrógeno es el elemento químico más ligero y es, también, el elemento más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo.

En su ciclo principal, las estrellas están compuestas por hidrógeno en estado de plasma. El hidrógeno elemental es muy escaso en la Tierra y es producido industrialmente a partir de hidrocarburos como, por ejemplo, el metano. La mayor parte del hidrógeno elemental se obtiene "in situ", es decir, en el lugar y en el momento en el que se necesita. El hidrógeno puede obtenerse a partir del agua por un proceso de electrólisis, pero resulta un método mucho más caro que la obtención a partir del gas natural.

Sus principales aplicaciones industriales son el refinado de combustibles fósiles (por ejemplo, el hidrocracking) y la producción de amoníaco (usado principalmente para fertilizantes).

El isótopo del hidrógeno más común en la naturaleza, conocido como protio (término muy poco usado), tiene un solo protón y ningún neutrón. En los compuestos iónicos, el hidrógeno puede adquirir carga positiva (convirtiéndose en un catión compuesto únicamente por el protón) o negativa (convirtiéndose en un anión conocido como hidruro).

El hidrógeno puede formar compuestos con la mayoría de los elementos y está presente en el agua y en la mayoría de los compuestos orgánicos. Desempeña un papel particularmente importante en la química ácido-base, en la que muchas reacciones conllevan el intercambio de protones entre moléculas solubles. Puesto que

es el único átomo neutro para el cual la ecuación de Schrödinger puede ser resuelta analíticamente, el estudio de la energía y del enlace del átomo de hidrógeno ha sido fundamental para el desarrollo de la mecánica cuántica.

El gas hidrógeno será la energía transportable del futuro cercano por sus características de:

- 1) Renovabilidad
- 2) Limpieza de su combustión, ya que no produce gases de efecto invernadero, generando agua como desecho
- 3) Enorme relación energía a peso (39.4 kW-h por kg de H<sub>2</sub>)
- 4) Simplicidad de su conversión a energía eléctrica

A partir de estas características se le define con diversos adjetivos, según sea el ámbito de la discusión: energía limpia o también renovable y/o sustentable.

## **Descubrimiento del hidrógeno**

El hidrógeno diatómico gaseoso, H<sub>2</sub>, fue formalmente descrito por primera vez por T. Von Hohenheim ( más conocido como Paracelso, 1493 -1541) que lo obtuvo artificialmente mezclando metales con ácidos fuertes. Paracelso no era consciente de que el gas inflamable generado en estas reacciones químicas estaba compuesto por un nuevo elemento químico. En 1671, Robert Boyle redescubrió y describió la reacción que se producía entre limaduras de hierro y ácidos diluidos, y que generaba hidrógeno gaseoso.

En 1766, Henry Cavendish fue el primero en reconocer el hidrógeno gaseoso como una sustancia discreta, identificando el gas producido en la reacción metal - ácido como "aire inflamable" y descubriendo que la combustión del gas generaba agua. Cavendish tropezó con el hidrógeno cuando experimentaba con ácidos y mercurio. Aunque asumió erróneamente que el hidrógeno era un componente liberado por el mercurio y no por el ácido, fue capaz de describir con precisión varias propiedades

fundamentales del hidrógeno. Tradicionalmente, se considera a Cavendish el descubridor de este elemento.

En 1783, Antoine Lavoisier dio al elemento el nombre de hidrógeno (en francés *Hydrogène*, del griego *υδρογόνο*, *νερό*, "agua" y *γεννήτρια*, "generador") cuando comprobó (junto a Laplace) el descubrimiento de Cavendish de que la combustión del gas generaba agua.

## Abundancia

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, suponiendo más del 75% en masa y más del 90% en número de átomos. Este elemento se encuentra en abundancia en las estrellas y los planetas gaseosos gigantes. Las nubes moleculares de H<sub>2</sub> están asociadas a la formación de las estrellas. El hidrógeno también juega un papel fundamental como combustible de las estrellas por medio de las reacciones de fusión nuclear entre protones.

En el universo, el hidrógeno se encuentra principalmente en su forma atómica y en estado de plasma, cuyas propiedades son bastante diferentes a las del hidrógeno molecular. Como plasma, el electrón y el protón del hidrógeno no se encuentran ligados, por lo que presenta una alta conductividad eléctrica y una gran emisividad (origen de la luz emitida por el Sol y otras estrellas). Las partículas cargadas están fuertemente influenciadas por los campos eléctricos y magnéticos. Por ejemplo, en los vientos solares las partículas interactúan con la magnetosfera terrestre generando corrientes de Birkeland y el fenómeno de la aurora.

Bajo condiciones ordinarias en la Tierra, el hidrógeno existe como gas diatómico, H<sub>2</sub>. Sin embargo, el hidrógeno gaseoso es extremadamente poco abundante en la atmósfera de la Tierra (1 ppm en volumen), debido a su pequeña masa que le permite escapar al influjo de la gravedad terrestre más fácilmente que otros gases más pesados. Aunque los átomos de hidrógeno y las moléculas diatómicas de hidrógeno abundan en el espacio interestelar, son difíciles de generar, concentrar y purificar en

la Tierra. El hidrógeno es el decimoquinto elemento más abundante en la superficie terrestre. La mayor parte del hidrógeno terrestre se encuentra formando parte de compuestos químicos tales como los hidrocarburos o el agua. El hidrógeno gaseoso es producido por algunas bacterias y algas, y es un componente natural de las flatulencias. El metano es una fuente de enorme importancia para la obtención del hidrógeno.

**Tabla 2.1**

Información general	
Nombre, símbolo, número	Hidrógeno, H, 1
Serie química	No metales
Grupo, período, bloque	1, 1, s
Densidad	0,089 9 kg/m <sup>3</sup>
Apariencia	Incoloro

Propiedades atómicas	
Densidad	u
Radio medio	25 pm
Radio atómico (calc)	53 pm (Radio de Bohr)
Radio covalente	37 pm
Radio de van der Waals	120 pm
Configuración electrónica	1s <sup>1</sup>
Electrones por nivel de energía	1
Estado(s) de oxidación	1, -1
Óxido	Anfótero
Estructura cristalina	hexagonal

Propiedades físicas	
Estado ordinario	Gas
Punto de fusión	14,025 K
Punto de ebullición	20,268 K
Punto de inflamabilidad	255 K
Entalpía de vaporización	0,44936 kJ/mol
Entalpía de fusión	0,05868 kJ/mol
Presión de vapor	209 Pa a 23 K
Temperatura crítica	23,97 K
Presión crítica	1,293·10 <sup>6</sup> Pa
Volumen molar	22,42×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /mol

## 2.2 Propiedades del hidrógeno en estado gaseoso (H<sub>2</sub>G)

---

El hidrógeno es más ligero que el aire y se disipa rápidamente (3.8 veces más rápido que el gas natural) aproximadamente a 20 m/s. Sin embargo, es recomendable que las instalaciones donde se maneje tengan cuartos ventilados y techos a dos aguas para disipar posibles fugas.

Es inodoro, incoloro e insípido, los sentidos humanos no pueden detectar una fuga de hidrógeno. En la práctica industrial y durante 40 años de uso, se han empleado sensores electrónicos que actúan mucho más rápido y de mejor manera ante una fuga. Las flamas que llega a producir son de poca intensidad luminosa, casi invisibles al ojo humano, su combustión solo produce calor en bajos niveles y agua, solo la flama está caliente no su alrededor, por lo que el riesgo de producir fuegos secundarios es menor.

### **Explosión**

Para que una explosión por hidrógeno se presente, se debe encontrar en presencia de un oxidante como el oxígeno puro en concentraciones de al menos 10 %, o 41% de aire. El hidrógeno es explosivo en concentraciones de 18.3-59% mientras que el riesgo de explosión de la gasolina se da en concentraciones mucho más pequeñas 1.1-3.3%. El H<sub>2</sub> requiere de una temperatura mayor que la requerida por combustibles comunes para su ignición.

## Toxicidad

El hidrógeno no es tóxico ni venenoso no contamina el agua, los mantos freáticos, ni el aire. Bajo condiciones atmosféricas estándar (20 °C y 1 atm), se presenta en estado gaseoso. (Sin embargo, las condiciones normales son llamadas NTP y se consideran a 0°C y 1 atmósfera).

## Propagación

Se debe realizar una distinción entre velocidad de empuje y velocidad de dispersión de un gas. El empuje responde a la velocidad de una nube de gas que permanece cohesionada. La dispersión describe la velocidad a la cual las moléculas individuales penetran en el volumen de otro gas. Ambos parámetros son necesarios para explicar la velocidad con la que la nube de hidrogeno se dispersa en el aire.

Velocidad de dispersión en el aire a NTP: la velocidad a la cual un combustible gaseoso se dispersa en el aire.

Velocidad ascensional en el aire NTP: la velocidad a la cual el combustible gaseoso se eleva en el aire por las fuerzas de empuje.

Energía térmica radiada: energía emitida por radiación desde la zona de combustión hacia sus proximidades.

Distancia de inducción a la detonación a NTP: la distancia necesaria para que una deflagración ( Deflagrar: A rder repentinamente c on llama y s in explosión.) se convierta en una detonación, en una mezcla aire/hidrógeno.

Limitación de oxígeno: concentración mínima de oxígeno necesaria para la propagación de la llama en una mezcla con concentraciones desconocidas de



combustible, aire y nitrógeno. Si esta mezcla contiene menos de un 5% en volumen de oxígeno la llama no podrá propagarse.

Máxima distancia experimental de seguridad (MESG) en el aire a NTP: la combustión depende en gran medida de que el proceso ocurra en una zona total o parcialmente confinada, o bien en espacios abiertos dado que la sobrepresión puede provocar una situación de accidente.

## 2.3 Contenido energético del hidrógeno

---

Todo combustible es capaz de liberar una cantidad determinada de energía cuando reacciona con el oxígeno. El valor calorífico representa la cantidad de energía disponible de cada combustible por unidad de masa.

Combustible	Valor Calórico Máximo (kJ/g)	Valor Calórico Mínimo (kJ/g)
<b>Hidrógeno</b>	141.86	119.93
<b>Metano</b>	55.53	50.02
<b>Gasolina</b>	47.5	44.5
<b>Diesel</b>	44.8	42.5

**Tabla 2.2 Contenido energético por unidad de masa para diversos combustibles**

Aunque los términos valor calorífico máximo y mínimo solo se aplican a combustibles, es interesante mencionar que el contenido energético por unidad de masa de una batería ácida es aproximadamente 0.108 kJ/g. Otra medida para cuantificar el contenido energético de los combustibles es la densidad de energía, que representa la cantidad de energía existente (en Joules o BTU's) para un volumen dado de combustible. Así, la densidad de energía es producto del valor calorífico por la densidad del combustible respectivo.

Combustible	Densidad de energía (kJ/m <sup>3</sup> )
Hidrógeno	10,50 : gas a 1 atm y 15°C
	1,825,000 : gas a 3,000 psig y 15°C
	4,500,000 : gas a 10,000 psig y 15°C
	8,401,000 : líquido
Metano	32,560 : gas a 1 atm y 15°C
	6,860,300 : gas a 3,000 psig y 15°C
	20,920,400 : líquido
Gasolina	31,150,000 : líquido
Diesel	31,435,800 : líquido

**Tabla 2.3 Valores comparativos de densidad de energía de distintos combustibles**

La densidad de energía del hidrógeno es baja, lo que implica que para almacenar grandes volúmenes de hidrógeno se necesitan tanques de mayor tamaño en comparación con los que necesitan otros combustibles para almacenar la misma energía. Sin embargo, su contenido energético por unidad de masa es mucho mayor que cualquier otro combustible ya que es muy ligero, es por esta razón que se utiliza como combustible para vuelos espaciales. Como dato complementario, se tiene que las baterías ácidas poseen una densidad de energía de 324,000 kJ/m<sup>3</sup>. A continuación, se muestra una tabla de propiedades físicas y químicas del H<sub>2</sub> en estado gaseoso.

Temperatura de auto ignición	858 K	Energía de explosión	2 kg TNT/m <sup>3</sup>
Mínima energía para la ignición	0.02 mJ	Velocidad ascensional NTP	1.2-9 cm/s
Límites de inflamabilidad en el aire	4.1-75 (vol.%)	Velocidad de difusión en el aire a NTP	≈2 cm/s
Límites de detonabilidad en el aire	18.3-59 (vol.%)	Coefficiente de difusión a NTP	0.61 cm <sup>3</sup> /s
Temperatura de la llama	2318 K	Flujo de calor emitido	1.53 x 10 <sup>-2</sup> kJ/cm <sup>2</sup> s
Velocidad de detonación	1.48-2.15 km/s	Limitación de oxígeno	5 vol. %
Sobrepresión de la detonación	1470 kPa	Viscosidad del gas a NTP	8.9 x 10 <sup>-5</sup> g/cm s
Calor de combustión inferior	120 kJ/g	Densidad del gas	0.0838 kg/m <sup>3</sup>
Calor de combustión superior	142 kJ/g	Peso Molecular	2.02 g/mol
Velocidad de combustión a NTP	265-325 cm/s	Punto de ebullición	20.3 K
Porcentaje de energía térmica radiada	≈21%	Toxicidad	No es toxico

**Tabla 2.4 Propiedades del hidrógeno gaseoso**

## 2.4 Seguridad

---

Desde hace 40 años la industria ha utilizado hidrógeno en grandes cantidades, desde materia prima para procesos químicos industriales hasta su uso como combustible para la exploración espacial. En todo este tiempo, la industria ha desarrollado la infraestructura para producir, almacenar, transportar y utilizar el hidrógeno de manera segura.

El hidrógeno no es más o menos peligroso que otros combustibles inflamables como la gasolina o el gas natural, de hecho posee algunas características que lo hacen más seguro comparado con estos.

Sin embargo, el diseño y construcción de instalaciones fiables y seguras requiere del conocimiento de sus propiedades, así como de su comportamiento frente a riesgos intrínsecos que posee cualquier instalación de combustibles.

El gas LP y la gasolina son más pesados que el aire, por lo que tienden a permanecer a nivel del suelo ya que se dispersan lentamente, la dispersión rápida del hidrógeno representa una potencial ventaja en este aspecto.

Conocer los principios generales de seguridad en el manejo de hidrógeno y los riesgos que implica el diseño de instalaciones y proyectos es muy importante, sobre todo en lo referente a los nuevos usos del hidrógeno. El conocimiento de las variables relacionadas a la contribución de posibles contingencias potenciales es el punto de partida en la seguridad, en el manejo y uso del hidrógeno en cualquier instalación.

## Pruebas de seguridad

A continuación se muestra y se describe una prueba de seguridad, extraída de un artículo de divulgación científica, realizada para comparar las propiedades de ignición entre el hidrógeno y la gasolina convencional.



**Figura 2.1 Comparación real entre hidrógeno y gasolina**

*Auto a hidrógeno (izq), Auto a gasolina (der). Foto de un video que compara el fuego provocado intencionalmente en un auto a hidrógeno y uno a gasolina. Se produjo una fuga a sus tanques de combustible y se les expuso a una flama.*

Sesenta segundos después de la ignición (fotografía), la flama de hidrógeno comenzó a disminuir, mientras que el fuego debido a la gasolina se intensificó. Después de 100 segundos, la flama de hidrógeno desapareció sin dañar el interior del auto. (La temperatura máxima en la parte interior del parabrisas posterior fue solo de 19.4 °C). El auto de gasolina continuó incendiándose por varios minutos y fue completamente destruido.

## **Hidrógeno líquido (H<sub>2</sub>L)**

Cualquier líquido criogénico (el hidrógeno se licua por debajo de los -252 °C) puede causar graves quemaduras si entra en contacto con la piel. Por tal motivo, el manejo de hidrógeno criogénico requiere el uso de tanques extra-reforzados y perfectamente aislados de doble pared, donde en situaciones de fuga, la primera reacción que sufre el hidrógeno es gaseificarse, lo cual disminuye, en cierta medida, las lesiones por contacto. En la práctica se utilizan sistemas redundantes de seguridad con el fin de evitar el contacto con el ser humano.

## **Normas para el manejo del hidrógeno**

En México no se han desarrollado normas en materia de hidrógeno y no se ha oficializado el uso de ninguna norma internacional, sin embargo en la práctica, las empresas que manejan hidrógeno en México utilizan normas internacionales.

Las normas dictan los lineamientos a seguir para el diseño y construcción de instalaciones seguras. Actualmente, el Comité de Hidrógeno de ISO trabaja con el fin de desarrollar normas referentes a sistemas y dispositivos de producción, almacenaje, transporte, medida y manejo del hidrógeno. Este comité es reconocido mundialmente como una entidad responsable del desarrollo de normas, códigos y guías generales en el campo de las tecnologías del hidrógeno.

<b>ISO/DIS 13985.3</b>	Hidrógeno líquido. Tanques para vehículos terrestres.
<b>ISO/CD 1398 6</b>	Tanques de transporte multimodal para hidrógeno líquido
<b>ISO/DIS 17268</b>	Hidrógeno gaseoso. Conectores para carga de vehículos
<b>ISO/DIS 15869. 1/2/3/4/5</b>	Hidrógeno gaseoso y mezclas. Tanques de combustible

**ISO/WD 20012** Hidrógeno gaseoso. Estaciones de abastecimiento.

**ISO/CD 16110.1/2** Generadores de hidrógeno usando tecnologías de procesamiento de combustible.

**ISO/CD 22734** Generadores de hidrógeno que emplean procesos de electrólisis

**ISO/WD 16111** Dispositivos transportables para almacenamientos de gas. Absorción reversible de hidrógeno en hidruros metálicos.

**ISO/14687:1999/ AWI Amd.1** Hidrógeno combustible. Especificación del producto.

## 2.5 Economía del hidrógeno

---

La producción electroquímica de hidrógeno a partir del agua, al compararla con los otros métodos de obtención, aparece como un método sencillo y ya conocido. Los actuales electrolizadores que funcionan industrialmente se han caracterizado por su fácil mantenimiento, pero debido a su consumo de energía y al precio de la energía eléctrica, el coste del hidrógeno producido es relativamente caro. No obstante, el hidrógeno electrolítico será una auténtica alternativa comercial cuando se pueda disponer de energía eléctrica procedente de centrales solares grandes.

Para reducir el actual consumo de energía primaria en la descomposición electrolítica del agua, la tecnología de la electrólisis del agua debería ser mejorada en el diseño de su construcción, en los materiales para electrodos o, dado el caso, en los catalizadores; también deberían optimizarse los parámetros de trabajo. Los trabajos en el desarrollo de procesos cíclicos termoquímicos deben continuar, pero en las primeras instalaciones de prueba deberá comprobarse hasta qué punto será posible realizar a gran escala industrial estos procesos de varios pasos.

Una economía de hidrógeno es un modelo económico futurible en el cual la energía, para los usos móviles y oscilación de carga, se almacena como hidrógeno ( $H_2$ ). El hidrógeno se ha propuesto como reemplazo para la gasolina y combustibles diésel utilizados actualmente en automóviles.

La producción del hidrógeno es un sector industrial considerable, y es cada vez mayor. En 2004 se produjeron unas 50 millones de toneladas métricas de hidrógeno, conteniendo 200 gigavatios de energía; la tasa de crecimiento es de alrededor de un 10% por año. Debido a que el almacenaje y transporte de hidrógeno es caro, la mayor parte del hidrógeno que se produce en la actualidad se hace localmente, y es utilizado inmediatamente, generalmente por la misma compañía productora. En 2005, el valor económico de todo el hidrógeno producido fue de aprox. 135 mil millones de USD por año.



Hoy hay dos principales aplicaciones para el hidrógeno. Casi la mitad se emplea para producir amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) mediante el proceso de Haber, el cual se utilizará sobre todo como fertilizante, directa o indirectamente. A causa de que la superpoblación mundial y la agricultura intensiva crecen, debido a esto la demanda del amoníaco (y por tanto de hidrógeno) está creciendo. La otra mitad de la producción actual del hidrógeno se utiliza para convertir cadenas largas de hidrocarburos (que son la mayoría en el petróleo sin refinar) en fracciones más ligeras, convenientes para su uso como combustibles. Este último proceso se conoce como hidrocracking. Hydrocracking representa un área incluso de mayor crecimiento que la del amoníaco, los incrementos en los precios del petróleo animan a las compañías petroleras a extraer un material más pobre, como pueden ser arenas de alquitrán y pizarra de petróleo.

Actualmente, el 48% de la producción de hidrógeno es a partir del gas natural, el 30% del petróleo, y el 18% del carbón; la electrólisis del agua representa solamente 4%. El gran mercado y el incremento también han estimulado que se cree un gran interés en buscar métodos alternativos, más baratos, para la producción de hidrógeno.

## **Fundamentos**

Las actuales preocupaciones con respecto a la disponibilidad a largo plazo de los combustibles fósiles y por el calentamiento global debido a las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) han dado lugar a una búsqueda de un combustible alternativo a los combustibles fósiles que no tenga estos problemas. Hay quien piensa que las celdas de combustible de hidrógeno son el equivalente a los viejos motores de combustión interna.

## Fuentes de hidrógeno centralizadas previstas

La economía del hidrógeno utilizaría una fuente energética no basada en combustibles fósiles (energías renovables/nuclear/fusión), utilizando varios métodos (electrólisis, ciclo del sulfuro-yodo) para producir el gas de hidrógeno para su uso en los múltiples sectores como fuente de energía almacenada. Si la energía se utiliza para producir hidrógeno, entonces el hidrógeno se podría utilizar como forma de almacenamiento de energía substituyendo el gas y el petróleo causantes de emisiones de gases de efecto invernadero.

En una economía del hidrógeno, los grandes generadores rurales de hidrógeno de alta eficacia se combinarían con un sistema de distribución (como el sistema de la distribución de gas natural pero capaz de satisfacer los desafíos adicionales del transporte del hidrógeno). En la distribución de energía el usuario intermedio y final podría utilizar las celdas de combustible para satisfacer sus necesidades, substituyendo los actuales sistemas de generación y distribución local, y los vehículos de combustión interna. Sistemas similares se utilizan actualmente con el gas natural para producir electricidad, en instalaciones urbanas con cogeneración donde además se aprovecha el calor residual.

La fuente de energía primaria para producir hidrógeno podría ser combustible nuclear, o fósil. En una economía completa del hidrógeno, incluso las fuentes eléctricas primarias como la energía hidráulica y la energía eólica se podrían utilizar para hacer el hidrógeno, en vez de distribuirla directamente en la red eléctrica (el equilibrio apropiado entre la distribución del hidrógeno y la distribución eléctrica interurbana es una de las preguntas básicas a medio resolver en la economía del hidrógeno). Los grandes generadores que produjesen hidrógeno de fuentes de energía fósiles generarían cantidades enormes de contaminación, pero centralizan las emisiones, y las ciudades quedarían limpias de polución, ya que las emisiones se podrían realizar en zonas despobladas, y los sistemas de control de emisiones serían más fáciles de examinar.

Se aduce que la quema de combustibles fósiles en centrales grandes es más eficiente

que en automóviles o pequeñas centrales, (casi el 60% en las modernas centrales de ciclo combinado frente al 40% de un motor de gasolina o un 45% de los mejores motores diesel) sin embargo, hay que tener en cuenta que la eficiencia en la obtención de hidrógeno a partir de electricidad está actualmente en un 30.4% y la eficiencia de una pila de combustible en un 60.3% con lo que quemar combustible fósil en un motor diésel tiene una eficiencia del 45%, mientras que quemar combustible fósil en una central, para generar electricidad, para generar hidrógeno, para emplearlo en una pila de combustible, tiene una eficiencia final, sin contar las pérdidas por transporte, no superior al 12%. Esto obligaría a quemar casi cuatro veces más combustibles fósiles para el mismo trabajo, lo que anularía las ventajas ambientales de centralizar las emisiones, y sin duda encarecería enormemente el precio de la energía.

Probablemente una visión más realista de las posibilidades a medio plazo del hidrógeno pase por prescindir de sus promesas de energía "limpia" (esto es: obtenida mediante electricidad, especialmente de energías renovables): Mediante descomposición química, actualmente se consigue una eficiencia del 72% generando hidrógeno a partir de gas natural, y algo menor si se obtiene del carbón. Si se solucionan los problemas de almacenamiento, será posible obtener rendimientos globales similares a los de los motores de combustión interna, con lo que la tecnología del hidrógeno permitiría en definitiva utilizar la energía del carbón (material muy abundante) para sustituir al petróleo. Sin embargo, la tecnología del hidrógeno así planteada, lejos de ser más limpia, sería mucho más contaminante, pues el carbón es más contaminante que el petróleo.

Existen aún muchas barreras tecnológicas que impiden que esta economía pueda llevarse a cabo; mientras, las investigaciones continúan.

## 2.6 Usos del hidrógeno.

---

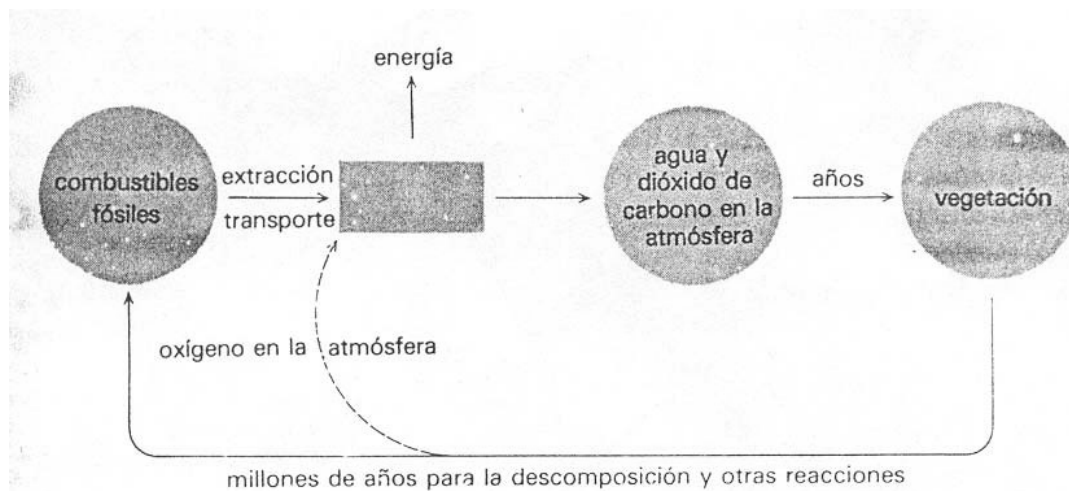
Casi el 42% del hidrógeno que se produce se usa en la fabricación de amoníaco y otro 38% en la refinación de petróleo. El otro 20% se consume en muchas industrias, siendo las aplicaciones en siderurgia y alimentos las que usan las mayores cantidades. En el futuro, una mayor refinación de petróleo, el aumento de plásticos y elastómeros (sustancias de características similares al caucho), mayor volumen de desulfurización de aceites combustibles, un aumento en la reducción de aceites comestibles, un aumento en la reducción de minerales de hierro y la hidrogenación de celdas de combustible hidrógeno-aire, así como la industria aeroespacial, producirán una tendencia de aumento de la demanda de hidrógeno. Cuando nuestras reservas de combustibles fósiles comiencen a agotarse, el hidrógeno puede llegar a convertirse en la base de la economía de combustibles.

## 2.7 Aspectos económicos del hidrógeno.

---

Puesto que la creciente demanda de energía está agotando nuestras reservas de combustibles fósiles a una velocidad alarmante (Fig. 2.2), las miras científicas se enfocan hacia la sustitución futura de la hulla y el petróleo. Desde un punto de vista mundial, las reservas de combustibles fósiles probablemente son suficientes para mantener los niveles de vida actuales hasta mediados del siglo XXI. Sin embargo, al examinar los datos de distribución de petróleo, se ve que los E.U.A. pueden tener la necesidad de desarrollar la tecnología de un nuevo sistema de energía antes de lo que era de esperarse.

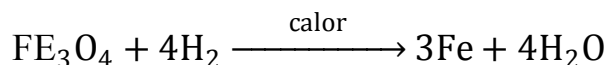
La fisión nuclear, y quizá la fusión nuclear, pueden llegar a convertirse en la principal fuente de energía del futuro. Casi todos los planes para el uso de la energía nuclear se basan en su conversión en más electricidad, a pesar de que la energía eléctrica constituye, solamente un 20% del consumo total de energía, tanto presente como anticipado. El 80% restante se consume en forma de calor. El gran problema consiste en cómo transformar la energía nuclear en energía química para poder almacenarla y transportarla. Una de las soluciones propuestas se basa en un sistema de combustibles a base de hidrógeno.



**Figura 2.2 Ciclo de los combustibles fósiles.**

La electricidad producida por los reactores nucleares podría usarse para convertir nuestro compuesto más abundante, el agua, en hidrógeno y oxígeno. A diferencia de los combustibles fósiles, el tiempo requerido para la regeneración del hidrógeno es relativamente corto. Una de las grandes ventajas del hidrógeno como combustible es su combustión libre de contaminantes por formación de agua. Los motores normales para gasolina pueden modificarse para consumir hidrógeno como combustible. Además del vapor de agua, los únicos otros productos importantes de la combustión son la pequeña cantidad de óxidos de nitrógeno que se originan del aire usado en la combustión. Los motores de hidrógeno pueden ser uno de los modelos que cumpla con los estándares de emisión del futuro.

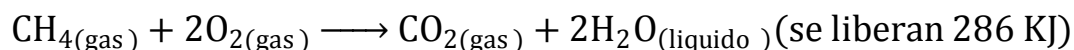
Las celdas de combustible a base de hidrógeno son otra de las posibilidades para la impulsión de vehículos de motor. Estas combinaciones de celda-batería y motores eléctricos podrían ser la fuerza motriz de camiones, automóviles, naves y trenes. El hidrógeno líquido se podía utilizar en aviones. El mineral de hierro podría reducirse económicamente con hidrógeno directamente a hierro elemental:



Puede suponerse que los gases producidos por la reducción del mineral de hierro con hidrógeno emitirán menos contaminación atmosférica que la actual reducción con coque. El inicio de la era del hidrógeno no requerirá de grandes desarrollos científicos o tecnológicos. La economía futura a base de hidrógeno podría lograrse resolviendo diversos problemas de ingeniería cuyo planteamiento es bien conocido. El advenimiento del hidrógeno en nuestros actuales sistemas de combustibles no sería muy difícil.

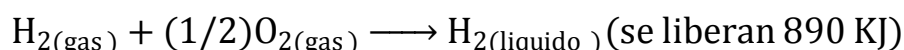
El hidrógeno se usa ya en cantidades considerables con gas natural y otros combustibles. Los gasoductos de gas natural pueden adaptarse para el transporte de hidrógeno. Una de las desventajas del transporte de grandes cantidades de hidrógeno por medio de ductos, es que el hidrógeno es más ligero y tiene un valor calorífico más bajo que el gas natural. Se debe bombear un volumen de hidrógeno tres veces mayor

para obtener el mismo contenido de energía del gas natural (considerando que el gas natural es prácticamente metano,  $\text{C H}_4$ ), tal como lo muestran las siguientes ecuaciones:



22.4L

(1 mol)



22.4L

(1 mol)

No obstante, y puesto que el hidrógeno fluye unas tres veces más rápidamente, las bombas de un gasoducto que se usarán para hidrógeno serían tres veces más eficientes. El hidrógeno tiene ciertas ventajas sobre el gas natural para propósitos de calefacción, debido a que su flama es más caliente. Esto significará aparatos más pequeños y sistemas de ventilación más simples. Para los combustibles de aviones y motores de automóviles, el requerimiento de la producción de hidrógeno en forma refrigerada a temperaturas bajas puede presentar algunos problemas de almacenamiento. Sin embargo, el hidrógeno líquido se transporta ya en camiones y barcos y la tecnología del manejo de materiales refrigerados a temperaturas muy bajas está bien establecida, en especial en la industria aeroespacial.

Una de las principales desventajas del hidrógeno como combustible se refiere a su seguridad de manejo. Por desgracia, el hidrógeno tiene una gran facilidad para fugarse por los orificios más minúsculos e incluso a través de ciertos materiales. Hace algunos años se usaba hidrógeno para inflar globos y dirigibles, pero esta costumbre fue discontinuada cuando muchas personas perdieron la vida en el incendio que se produjo en 1937 cuando el dirigible Hindenburg, lleno de hidrógeno, se aproximaba a su mástil de amarre en Lakehurst, New Jersey, en ruta desde Alemania. Este temor al poder explosivo de las mezclas de hidrógeno-oxígeno, que se magnifica en las mentes de los escépticos, se ha dado en llamar "síndrome de Hindenburg".

Ciertas mezclas hidrógeno-aire son explosivas, pero también lo son algunas mezclas metano-aire. El hidrógeno se usa en cantidades importantes con gas natural y otros combustibles. Los antiguos sistemas llamados gas de ciudad contenían 50% de hidrógeno. El poblado de Basilea, Suiza, distribuye entre sus habitantes un combustible que contiene 80% de hidrógeno, hasta ahora sin accidentes. La dilución del hidrógeno gaseoso es muy efectiva para reducir sus límites de flamabilidad. Uno de los posibles métodos para aumentar la seguridad del manejo del hidrógeno sería diluirlo con otros gases en el punto de distribución. Idealmente, el gas diluyente incrementaría el poder calorífico del combustible y no produciría materiales tóxicos durante la combustión.



## 2.8 Costos del hidrógeno

---

De acuerdo con los resultados de un proyecto de investigación de la empresa Siemens el costo corriente de la electricidad solar es aproximadamente € 1.02/Kwh. y para la venta del hidrógeno el precio es cerca de € 1.53/Kwh. Si uno asume que el costo de la electricidad solar caerá a € 0.5/Kwh. en un futuro cercano, los expertos piensan que no está muy lejos, entonces la venta de 1Kwh de hidrógeno con 0.35 m<sup>3</sup>, costará cerca de € 0.76. Esto podría ser el equivalente de € 7.66 por metro cúbico de gas natural. Así que esto es 30 veces el costo presente.

Dependiendo de los métodos de suministro, producción y distribución, el costo de un kilogramo de hidrógeno puede ser de cuatro a seis veces superior al costo de un galón de gasolina o combustible diesel. (Un kilo de hidrógeno produce la energía equivalente a un galón de combustible derivado del petróleo.) La eficiencia del hidrógeno es hasta de un 70 %. Por lo tanto, el hidrógeno se volvería comercialmente viable si su precio por kilogramo al menudeo fuera el doble que el de un galón de gasolina. Los estudios recientes indican que, con la tecnología actual, el precio es 1.3 veces mayor de lo que quisiéramos.

Pero conforme mejoren el almacenamiento de hidrógeno, el procesamiento de combustible y las tecnologías de electrólisis, y a medida que aumente la demanda de hidrógeno, su costo habrá de acercarse a lo requerido. Creemos que, a pesar de las dificultades que implica, la infraestructura para los vehículos con celda de combustible se desarrollará rápidamente.

Mientras continúan las discusiones sobre la forma de crear la infraestructura necesaria, es interesante señalar que ya existe cierta infraestructura de hidrógeno, muy en especial a lo largo de la costa del golfo de México, en EUA, y alrededor de Rotterdam, Países Bajos. El hidrógeno se produce en las industrias petroleras y químicas, así que actualmente fluye a través de ductos de cientos de kilómetros en numerosos países. La infraestructura existente produce al año alrededor de 540,000 millones de metros cúbicos de hidrógeno a partir de gas natural. En términos de energía, esto equivale a cerca de 140 millones de toneladas de petróleo al año, que es casi el 10 por ciento de los requerimientos del transporte actual. Aunque el hidrógeno que se produce actualmente tiene otros fines, lo importante es que ya se tiene experiencia en su generación y transporte.

## 2.9 El primer autobús de hidrógeno fabricado en España

---

El presidente del grupo Fiat, Humberto Agnelli, entregó el lunes 31 de marzo de 2003, al alcalde de Madrid, José María Álvarez de Manzano, las llaves del primer autobús fabricado en España que utiliza hidrógeno. El vehículo, forma parte de un programa europeo para desarrollar la aplicación del hidrógeno como combustible del transporte público, sin generar contaminación. Fiat fabricará otros tres autobuses del mismo modelo para Turín, Berlín y París.

En mayo entraron en servicio otras 30 unidades fabricadas por Mercedes Benz para diez ciudades europeas, entre ellas Madrid y Barcelona. La gran desventaja de este vehículo limpio es el enorme costo del hidrógeno (generación, manejo y almacenamiento).

El autobús presentado el lunes 31 de marzo de 2003, es un costosísimo prototipo fabricado íntegramente en España, de acuerdo a los requerimientos de la Empresa Municipal de Transporte de Madrid, que es quien va a poner a prueba el vehículo durante un año. De este prototipo ya funciona una unidad en Turín, y a partir de 2005 se entregarán otras dos destinadas a Berlín y París. La iniciativa pertenece al programa City Cell de la Unión Europea, apoyado por 5.45 millones de euros, más una contribución de 2.6 millones de euros del Ministerio de Ciencia y Tecnología, y 320,000 euros de la Comunidad de Madrid. El prototipo empezó a prestar servicio regular por las calles de Madrid a finales de abril, en las mismas condiciones que el resto de autobuses.

Este hecho ha condicionado su construcción. Dispone de autonomía para unos 300 kilómetros, el recorrido que suele hacer un autobús urbano durante doce horas, y su velocidad punta es de 75 kilómetros por hora. A parte de no contaminar, su gran ventaja, y al mismo tiempo su mayor riesgo, es que es silencioso, como cualquier vehículo eléctrico (ver figura 2.3). Ha costado tres años ponerlo a punto. No ha sido

fácil coordinar a todos los fabricantes de todos los componentes de una célula de combustible para trasladar el vehículo, según Enrico Durelli, responsable del proyecto que dirige desde Génova, Italia.



**Figura 2.3 El primer autobús de hidrógeno que circula por Madrid.**

## 2.10 Emisiones cero

---

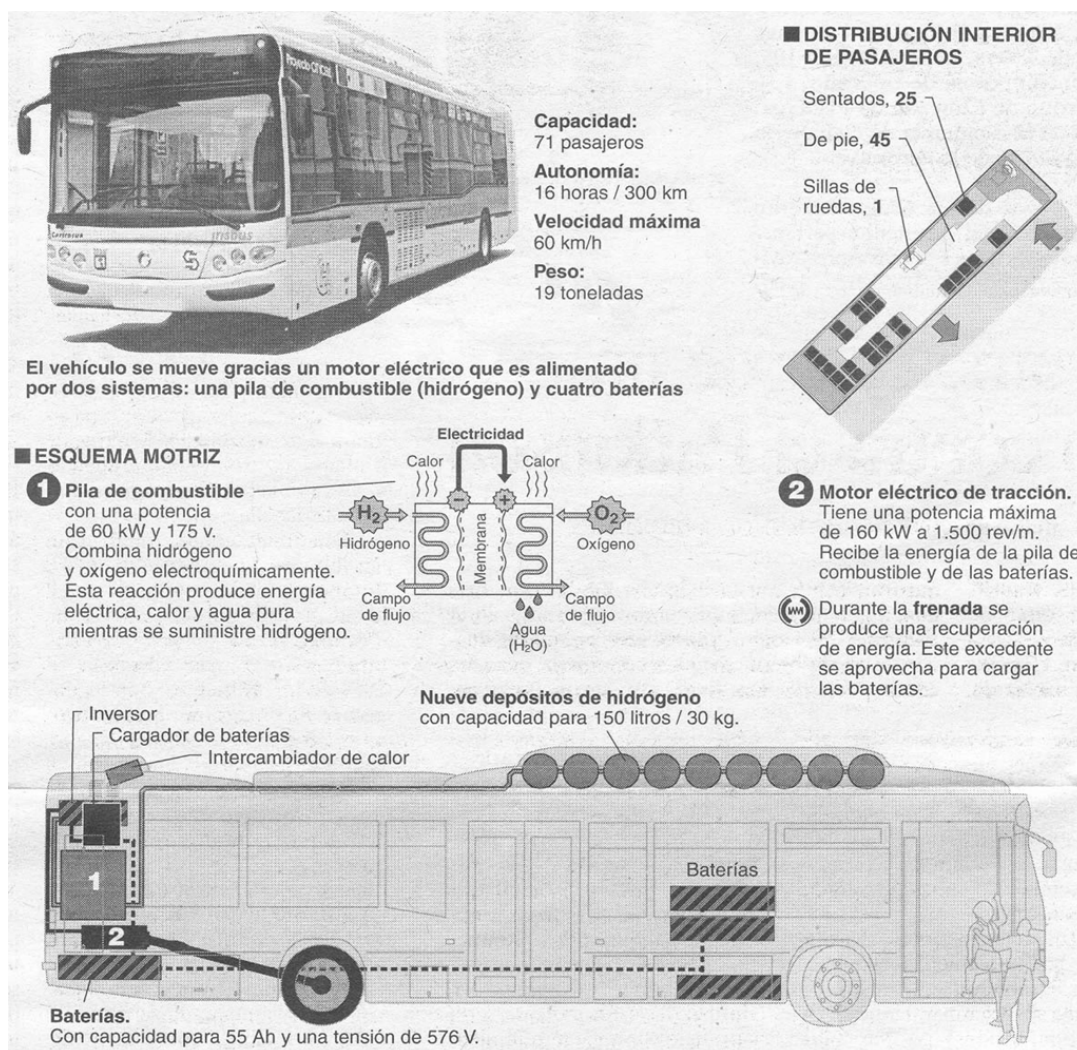
La ventaja de este prototipo sobre los que ha desarrollado Mercedes Benz es que resulta más barato, porque se requiere una celda de combustible de menor potencia. Este elemento es la clave del vehículo. Una celda de combustible, como se verá en capítulos posteriores, es como una batería que funciona mientras sea alimentada, en este caso por hidrógeno. La celda consiste en dos electrodos que revisten un electrolito. Por un electrolito entra hidrógeno y por el otro oxígeno. La reacción producida permite obtener electricidad. El proceso produce además calor y agua. De momento no existen en el mercado celdas de hidrógeno. Hay algunos fabricantes (canadienses y estadounidenses), pero no las venden: las prestan a razón de 16,000 euros por cada kilovatio de potencia (ver figura 2.4).

**Principales diseñadores de celdas  
de combustible para automóviles**  
DaimlerChrysler AG Stuttgart-Mahringen, Alemania  
Ford Motor Co. Dearborn, Michigan, EE.UU.  
General Motors Corro Detroit, Michigan, EE.UU.  
Honda Motor Company Ltd. Tokio, Japón  
PSA Peugeot Citroen ..París, Francia  
Renault.Nissan Alliance. ParísITokio  
Toyota Motor Corro .....Aichi, Japón

Figura 2.4

Las utilizadas para impulsar, un autobús rondan los 300 kilovatios de potencia instalada. La mayor parte de esta energía se consume en el arranque, mientras que para circular sólo requiere 60 kilovatios, que es la potencia de la celda del combustible del modelo Irisbus de Iveco. La energía necesaria para el arranque la obtiene de unas baterías que se recargan y mantienen en los procesos de frenado, muy frecuentes en un autobús de uso urbano. Por eso este modelo es híbrido (celda de combustible, más baterías). Los 30 que fabrica Mercedes para diez ciudades, europeas se alimentan exclusivamente por celdas de combustible.

Al menor costo, se le añade otra ventaja. Si por cualquier circunstancia la celda de combustible tuviera una avería, las baterías le proporcionarían la energía suficiente para desplazarse hasta las cocheras desde cualquier punto de la ciudad donde se encuentre. En las cocheras, precisamente se inauguró, el 29 de Abril de 2003, la estación de aprovisionamiento de hidrógeno, un proyecto desarrollado por Repsol-YPF y Air Liquide a partir del gas natural. Esta estación de hidrógeno es la tercera operativa de Europa, después de las existentes en Munich y Hamburgo, y también la tercera del mundo (tras California y Osaaka) en la que el hidrógeno se desarrolla in situ. En las cocheras de la empresa municipal de transporte de Fuenferraz, se abastecerá de combustible también a las otras tres unidades fabricadas por Mercedes, que prestarán servicio en las principales rutas de la ciudad. El autobús Irisbus/Iveco propulsado por hidrógeno no sólo no produce ningún tipo de ruido. Su misión contaminante es nula. Sólo desprende vapor de agua (ver la siguiente figura 2.5).



**Figura 2.5 El nuevo autobús híbrido.**


## 2.11 Europa prueba 34 unidades

---

Los cuatro autobuses que Irisbus/Iveco pondrá en circulación impulsados por hidrógeno no son los únicos. Simultáneamente la Unión Europea patrocinó el programa CUTE (Clean Urban Transport for Europe) en el que participa Mercedes Citaro con 30 unidades que se desplazarán por las ciudades de Ámsterdam, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Barcelona, Oporto, Estocolmo, Stuttgart y Reikiavik. En el caso de Barcelona, será BP la compañía que proporcionará hidrógeno obtenido mediante un proceso de electrólisis, alimentado por paneles solares.

A diferencia de los vehículos Irisbus/Iveco los Citaro no son híbridos. La energía de su motor eléctrico será generada exclusivamente por la pila de combustible según las especificaciones del modelo ya probado en Vancouver (Canadá), donde se encuentra la firma Ballard, uno de los escasos fabricantes en el mundo de celdas de combustibles. Madrid es la primera ciudad en estrenar el Citaro. Cada urbe tiene a prueba diferentes procedimientos de obtención de hidrógeno (electrólisis, gas, energía solar, eólica, geotérmica)

# **CAPÍTULO 3**



**PROCESOS DE  
OBTENCIÓN DEL  
HIDRÓGENO**

## 3.1 Producción de hidrógeno

---

La mayor parte del hidrógeno que se obtiene actualmente proviene del tratamiento de hidrocarburos por métodos petroquímicos: fragmentación térmica con agua, fragmentación térmica que puede ser catalítica y oxidación parcial de hidrocarburos o bien procesos de reformación catalítica sobre los mismos. Del resto de los demás procedimientos para la obtención de hidrógeno, el más importante (16 % de la producción mundial) es la gasificación de carbón o de coque en presencia de agua. Si pensamos en una tecnología futura del hidrógeno, ninguno de estos métodos es aplicable, pues consumen combustibles fósiles (carbón, gas natural o petróleo) y por lo tanto debemos pensar en otras materias primas. Los métodos electroquímicos que producen hidrógeno, son capaces de obtener este gas en cantidades industriales y tanto desde el punto de vista técnico como desde un punto de vista cualitativo ocupan una posición muy especial. Utilizan como materia prima el agua, de la cual podemos disponer en cantidades prácticamente ilimitadas y son capaces de separar de la misma hidrógeno puro y oxígeno en una sola reacción. Desde el punto de vista de construcción del reactor, de su funcionamiento y del mantenimiento, el sistema de obtención no presenta muchas dificultades. Desde el punto de vista técnico y energético, la producción de  $H_2$  por medio de ciclos cerrados de reacciones termoquímicas es una posibilidad muy interesante; la energía necesaria para crear el ciclo cerrado de reacciones lo deberían suministrar las centrales solares o centrales nucleares. También es interesante la fotólisis del agua para la obtención de  $H_2$  mediante reacciones biotécnicas; estos métodos se están estudiando intensamente.



## 3.2 Métodos biológicos de obtención de hidrógeno

---

Actualmente existe la tendencia mundial hacia la obtención de hidrógeno por vía biológica. Los primeros resultados demostraron los problemas y posibilidades de la biotecnología para el desarrollo de la industria del hidrógeno como una fuente renovable de energía, permitiendo considerarla seriamente como una posibilidad práctica (Beneman, 1996).

La producción de hidrógeno por métodos biológicos se lleva a cabo mediante 2 procesos:

1) La obtención de hidrógeno a partir de compuestos orgánicos (Das y Veziroglu, 2001):

\*Usando las bacterias fotosintéticas: algunas bacterias fotosintéticas no dependientes del azufre que realizan fotosíntesis anoxygenica, utilizan ácidos orgánicos como el succínico, láctico o butírico, para producir hidrógeno. La reacción es catalizada por nitrogenasa. La mayor eficiencia conocida la tiene el género *Rhodobacter* (6-8 %).

\*Combinando bacterias fotosintéticas y anaerobias: las bacterias anaerobias por sí solas metabolizan azúcares desprendiendo hidrógeno y producen ácidos orgánicos, que sin embargo no son capaces de seguir descomponiendo. Las bacterias fotosintéticas sí pueden seguir descomponiendo los ácidos orgánicos producidos y mejorar la producción de hidrógeno.

2) La biofotólisis del agua ( *fotodisociación*  biológica del agua): bajo ciertas condiciones algunas cianobacterias y microalgas, utilizan la energía bioquímica de la fotosíntesis, para producir hidrógeno en lugar de reducir el dióxido de carbono.

La producción biofotolítica, dista mucho aún de explotarse comercialmente, pues requiere de un significativo avance científico (cómo ocurre) y tecnológico (cómo intervenir la maquinaria bioquímica).

## **Producción de hidrógeno en dos etapas**

Se han popularizado dos alternativas tecnológicas, a un nivel solamente de laboratorio y de algunos ensayos piloto.

En la primera, la producción de oxígeno fotosintético con la consecuente acumulación de carbohidratos está separada de la producción de gas hidrógeno, tanto temporal como espacialmente. Este es un proceso de dos estados: el  $\text{CO}_2$  es primero fijado a sustratos ricos en  $\text{H}_2$ -endógeno durante fotosíntesis oxigénica normal (estado 1), seguido por generación de hidrógeno molecular cuando las microalgas son incubadas en condiciones anaeróbicas (estado 2).

Este enfoque requiere por ende de un sistema de cultivo y de otro sistema aparte para la generación de hidrógeno. La segunda alternativa está relacionada con la producción de oxígeno fotosintético y gas hidrógeno simultáneamente. En este caso los electrones son liberados de la oxidación del agua y son conducidos a la hidrogenasa sin estar mediado la fijación de  $\text{CO}_2$  ni el almacenamiento de energía como metabolitos celulares. Este mecanismo en el proceso de generación de  $\text{H}_2$  ha resultado superior al proceso de dos estados, ya que se han obtenido eficiencias de conversión de energía luminosa a gas hidrógeno de un 5 a un 10% (del orden de magnitud de la eficiencia de celdas fotovoltaicas). Sin embargo, este proceso "de un estado" tiene limitaciones principalmente por la inhibición de la hidrogenasa por el oxígeno que es producido por la disociación del agua por el Fotosistema II.

## **Hidrogenasas**

Las hidrogenasas son enzimas que catalizan de modo reversible la oxidación de hidrógeno (Freemantle, 2002). Como son catalizadores eficientes de esta sencilla reacción química, hay un gran interés en las relaciones entre su estructura y función y en sus aplicaciones en el campo de la bioenergética. Se pueden distinguir dos tipos de hidrogenasas presentes en cianobacterias y microalgas, en función de su contenido en metales: el primer grupo incluye a aquellas que contienen Fe en su estructura, el segundo grupo incluye a las que además tienen un átomo de Ni.



Se han resuelto las estructuras cristalográficas obtenidas por difracción de rayos X de varias hidrogenasas de Ni-Fe y de Fe. El análisis cristalográfico de las hidrogenasas de Ni-Fe indicó que el centro activo de la enzima, el cual es el lugar donde tiene lugar la ruptura heterolítica del hidrógeno molecular, está formado por un complejo bimetalico de Ni-Fe con dos cisteínas de la estructura proteica que hacen de ligandos puente. Otras dos cisteínas están coordinadas al Ni y al átomo de Fe se coordinan tres ligandos diatómicos (dos CN<sup>-</sup> y un CO). El centro activo de las hidrogenasas de Fe tiene bastante similitud con las de Ni-Fe. También está constituido por un complejo bimetalico, pero en este caso se trata de dos átomos de Fe, con átomos de S actuando de ligandos puente y con varios grupos CO y CN<sup>-</sup> coordinados a los átomos de Fe.

Estos ligandos diatómicos pueden ser detectados por espectroscopía infrarroja. Se han estudiado los cambios observados en los espectros de infrarrojo, al cambiar el potencial redox de la muestra en una celdilla electroquímica, identificándose los diferentes estados redox del centro activo y los equilibrios que les correlacionan. También se han estudiado por espectroscopía infrarroja, la unión de inhibidores al centro activo. El análisis cinético de la actividad catalítica de la hidrogenasas se lleva a cabo mediante diferentes técnicas. La oxidación/producción de H<sub>2</sub> se puede medir por espectrofotometría utilizando compuestos redox con propiedades ópticas como aceptores/donadores de electrones. Otro método es el acoplamiento de la actividad catalítica de la enzima a un electrodo.

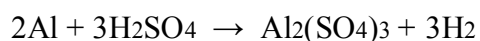
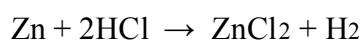
Las hidrogenasas también catalizan el intercambio isotópico del H<sub>2</sub>. Otra propiedad catalítica de las hidrogenasas es la conversión de para-H<sub>2</sub> en orto-H<sub>2</sub>, que puede medirse por cromatografía de gases, acoplada a un detector térmico. Además, se han

realizado cálculos mecanocuánticos, para obtener modelos de la estructura del centro activo, en sus diferentes estados redox del ciclo catalítico y de los procesos de activación/inactivación de las hidrogenasas.

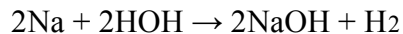
## 3.3 Preparación de hidrógeno en el laboratorio.

---

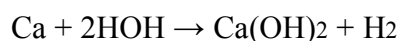
El hidrógeno suele prepararse en el laboratorio por la acción de soluciones diluidas de ácidos fuertes sobre metales moderadamente activos (véase la Fig. 3.1). Los ácidos clorhídrico y sulfúrico, son excelentes para esto; los metales de uso más frecuente son el zinc, el aluminio, el hierro y el magnesio. Las ecuaciones representativas son:



Los metales de la familia IA y de la parte baja de la familia IIA (IA, y IIA son los grupos de la tabla periódica de los elementos químicos) son tan reactivos que reaccionan con el agua para producir hidrógeno. Las reacciones típicas son:

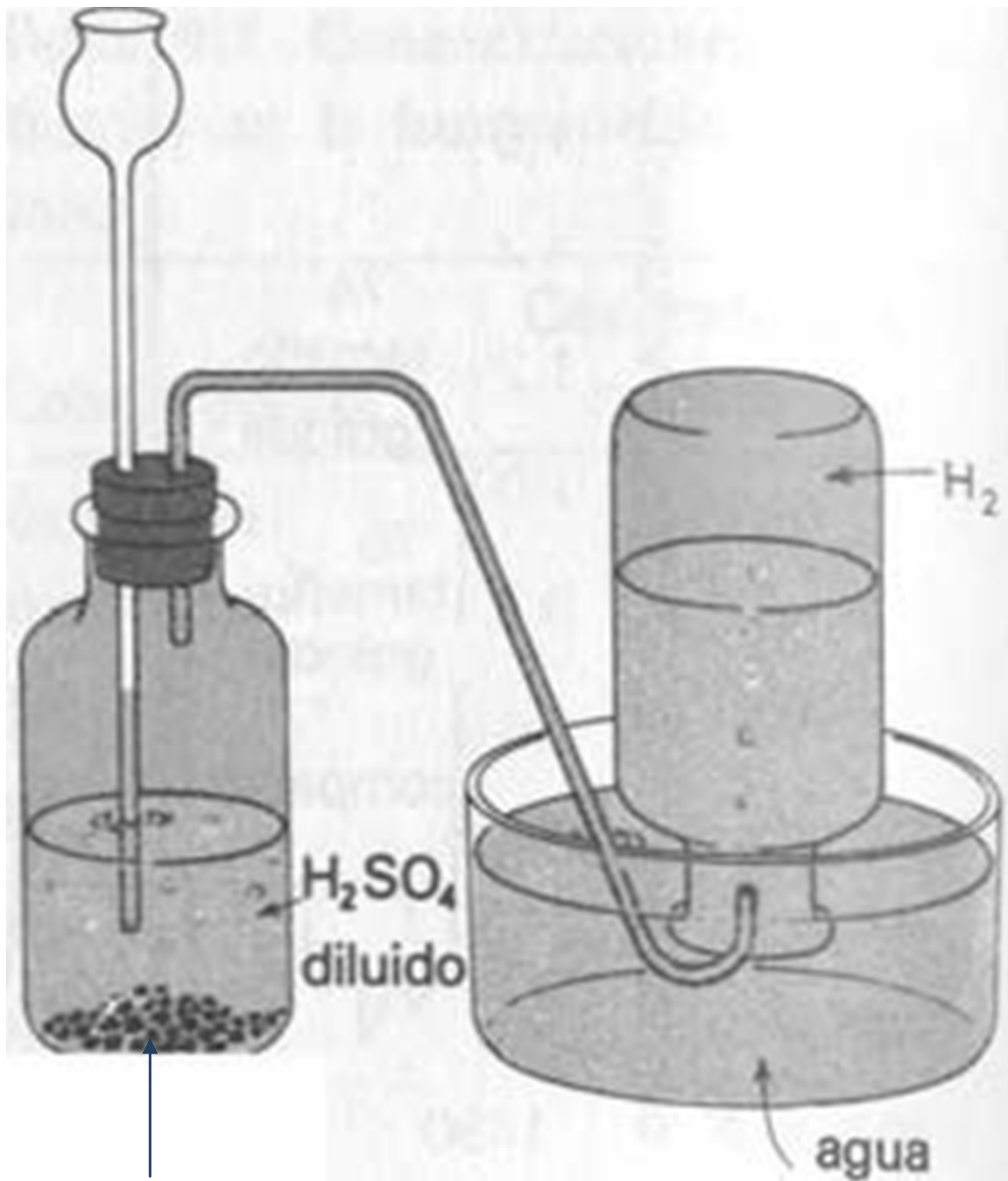


hidróxido  
de sodio



hidróxido  
de calcio

El sodio, el potasio, el rubidio y el cesio, reaccionan tan vigorosamente con el agua a temperatura ambiente que el hidrógeno puede inflamarse por el calor liberado. Estas reacciones con el agua son tan violentas que es necesario tomar grandes precauciones al llevarlas a cabo. El calcio y el litio reaccionan más lentamente con el agua.



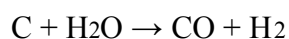
Zinc

Fig. 3.1 Preparación de hidrógeno en el laboratorio.

## 3.4 Método del gas de agua.

---

Cuando se hace pasar vapor de agua sobre coque caliente (el coque es el residuo sólido de carbón y ceniza que queda después de calentar la hulla a altas temperaturas en ausencia de aire), se forman monóxido de carbono e hidrógeno:



Esta mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, llamada gas de agua, tiene un valor considerable como combustible, pues ambas sustancias lo son. Si se desea hidrógeno puro, la mezcla se trata con vapor en presencia de un catalizador para oxidar el monóxido de carbono a dióxido de carbono:



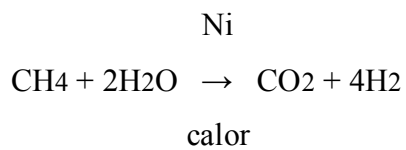
gas de agua

El dióxido de carbono se separa fácilmente haciendo pasar la mezcla de los dos gases a través de agua a presión. El dióxido de carbono se disuelve; el hidrógeno no lo hace.

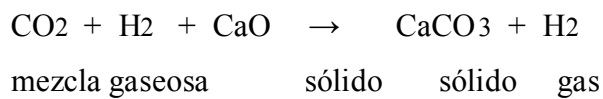
## 3.5 Método de vapor-hidrocarburo.

---

Se producen grandes cantidades de hidrógeno comercial circulando mezclas de hidrocarburo y vapor de agua sobre un catalizador de níquel a temperaturas elevadas. La ecuación para la reacción con el hidrocarburo más simple, el metano, es como sigue:



El dióxido de carbono y el hidrógeno se separan en la forma ya descrita. O bien el dióxido de carbono se elimina haciendo pasar la mezcla sobre cal (óxido de calcio):





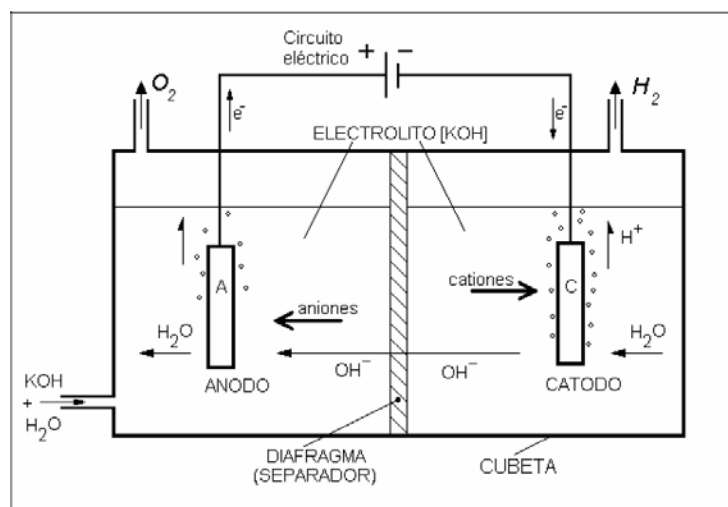
## 3.6 Método por Electrólisis

En general, se entiende por electrólisis la fragmentación o descomposición de un electrolito que se encuentra en la solución conductora mediante una corriente eléctrica, suministrada por medio de una fuente externa, a través de electrodos llamados cátodo y ánodo.

En el caso de la electrólisis del agua, el electrolito, que es generalmente una sal iónica, no se descompone sino que lo hace el solvente, o sea el agua. En el caso de electrolitos alcalinos, la reacción bruta, se puede representar por:



Para realizar el proceso de electrólisis, es necesaria una celda electrolítica que tiene como función mantener confinada y controlada a la reacción química. Los electrodos se conectan a una corriente eléctrica continua y están sumergidos en una solución acuosa, contenida dentro de la celda electrolítica. Para que el proceso se produzca a concentración constante de electrolito, se debe bombear constantemente electrolito nuevo a la celda. El cátodo y el ánodo se encuentran separados por un diafragma que es permeable a los iones, pero impermeable a los gases. Los gases que se producen se conducen para su purificación y almacenamiento fuera del espacio de los electrodos (ver figura 3.2).



**Figura 3.2 Esquema de una celda electrolítica**

## 3.7 Electrolizadores Industriales

---

Un electrolizador es un arreglo de celdas electrolíticas técnicamente optimizadas e interconectadas para obtener hidrógeno gaseoso y oxígeno a partir del agua ( $H_2O$ ) por el fenómeno de electrólisis. Los productos de salida son gases y calor, sin ningún residuo contaminante. Estos dispositivos son capaces de utilizar cualquier fuente de energía eléctrica (solar, viento, red eléctrica) para producir hidrógeno y oxígeno.

Una instalación electrolítica para la producción industrial de hidrógeno consta principalmente de:

- Una instalación rectificadora de corriente alterna para la obtención de corriente continua (1.6 a 2.2 Volts y una densidad de corriente de 1.75 a 2.1  $kA\ m^{-2}$ )
- Un bloque de celdas electrolíticas interconectadas.
- Instalaciones para purificar el agua.
- Instalaciones para preparar y bombear constantemente el electrolito.
- Instalaciones para la refrigeración y el lavado de los gases.
- Los catalizadores para purificar el  $H_2$  y el  $O_2$
- Las instalaciones de secado y almacenamiento.

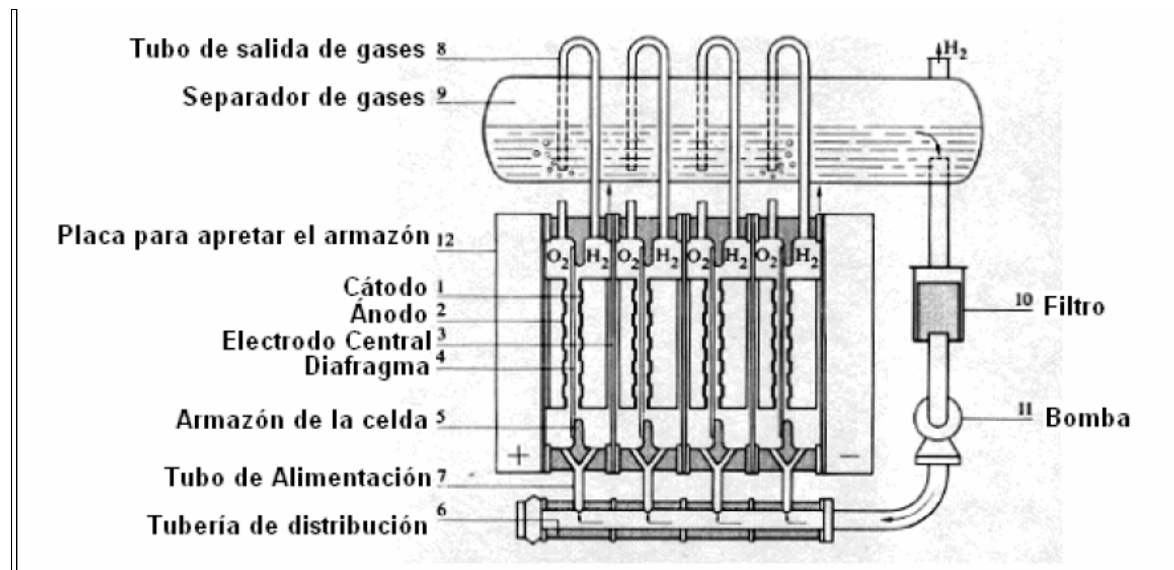
Muchos de los fabricantes de electrolizadores consideran todos estos requerimientos técnicos y los colocan en sus productos finales, ofreciendo de este modo, sistemas completos de producción de hidrógeno (Electrolizadores) en el mercado.

Actualmente se emplean tres tipos de electrolizadores industriales. Dos de los cuales requieren el uso de una solución acuosa, de dióxido de potasio (KOH), que se emplea por su alta conductividad. Este tipo de electrolizadores se conoce como electrolizadores alcalinos. Estos pueden ser monopolares o bipolares.

El electrolizador monopolar presenta una estructura parecida a la de un tanque, cuenta con varias celdas cuyos electrodos se conectan en paralelo. Se coloca una membrana

entre el ánodo y el cátodo que separa al hidrógeno y al oxígeno como gases de producto pero permite el paso de los iones formados.

En el diseño bipolar las celdas se conectan en serie, de este modo el hidrógeno se produce en un extremo de la celda y el oxígeno en el extremo opuesto, también es necesaria una membrana que separe los electrodos (ver figura 3.3).



**Figura 3.3 Electrolizador bipolar**

El tercer tipo de electrolizador es del tipo (Solid Polymer Electrolyte-SPE), o también conocido como Membrana de Intercambio Protónico (PEM), del inglés Proton Exchange Membrane. En esta unidad, el electrolito es una membrana sólida conductora de iones, a diferencia del medio acuoso que usan los electrolizadores alcalinos. La membrana sólida también permite la transferencia de iones  $H^+$  desde el ánodo hacia el cátodo que es donde se obtiene el hidrógeno, también separa a los gases de hidrógeno y oxígeno formados para poder almacenarlos por separado externamente. La electrólisis alcalina del agua es la tecnología más utilizada en la producción de grandes cantidades de hidrógeno. En un electrolizador alcalino, el hidrógeno producido tiene una pureza de casi 100% a bajas presiones. Pero si aún contiene humedad u oxígeno mezclados, estos deben ser removidos antes de almacenarlo.

## **Equipo de seguridad**

Es importante mencionar también la necesidad de sistemas auxiliares que garanticen la seguridad de la planta electrolizadora, entre ellos cabe destacar los siguientes sistemas:

- Sistema de detección de  $H_2$
- Sistema contra incendios
- Sistema de alarmas remotas
- Señalizaciones de advertencia
- Sistemas de detección de fuego

## 3.8 Sistemas auxiliares

---

### **Abastecimiento de Agua.**

No está demás mencionar que, no importando la tecnología utilizada por el electrolizador, resulta necesario un tanque de almacenamiento de agua, de manera que se asegure que el proceso no se interrumpa inesperadamente a causa de la falta de suministro de agua.

El agua empleada para el proceso de la electrólisis, debe ser destilada y desionizada; es decir, el agua que se utiliza para este fin debe ser previamente tratada antes de entrar a la celda electrolítica.

Para lograr dichos requerimientos, se debe recurrir a los procesos de filtrado y purificación pertinentes, lo cual significa que, inclusive se puede utilizar agua de mar y aguas tratadas, (que resultan más recomendadas para este proceso debido a la problemática actual que representa la escasez de agua potable a nivel mundial) para producir hidrógeno.

De modo que, se debe introducir a la celda electrolítica, agua pura necesaria para llevar a cabo la electrólisis, así como para que los electrodos tengan una mayor vida útil, al igual que la celda electrolítica. A continuación en la figura 3.4 se muestra una Planta de destilación al vacío para el tratamiento de aguas de proceso industriales con contenido de sales.



**Figura 3.4** Planta de destilación al vacío para el tratamiento de agua.

## **Instalaciones eléctricas**

Las instalaciones deben clasificarse en áreas de riesgo de acuerdo a estándares reconocidos, los dispositivos a instalar deben ser probados para trabajar en ambientes explosivos y con certificación de seguridad. Para las instalaciones, se deben seguir los lineamientos de códigos y normas correspondientes (NEC, IEC, IEE, etc.).

## Sistema de enfriamiento.

El sistema electrolítico produce una gran disipación de calor, por lo que los sistemas requieren de un sistema de enfriamiento, el cual debe proveer de agua a una presión que se encuentre entre 1 y 7 bares. En este rubro se recomienda un sistema cerrado para el agua de enfriamiento.

## Monitoreo Remoto.

Consta de una interface visual que le brinda al operador la opción de monitorear todos y cada uno de los procesos de los sistemas y subsistemas de los que consta la planta electrolizadora. La conexión remota debe ser compatible con los sistemas de interconexión y redes más comunes que existen en el mercado, así como con protocolos actuales de acceso seguro y confidencial a Internet. A continuación se muestra en la figura 3.5 un diagrama real sobre el monitoreo remoto de una planta electrolítica.

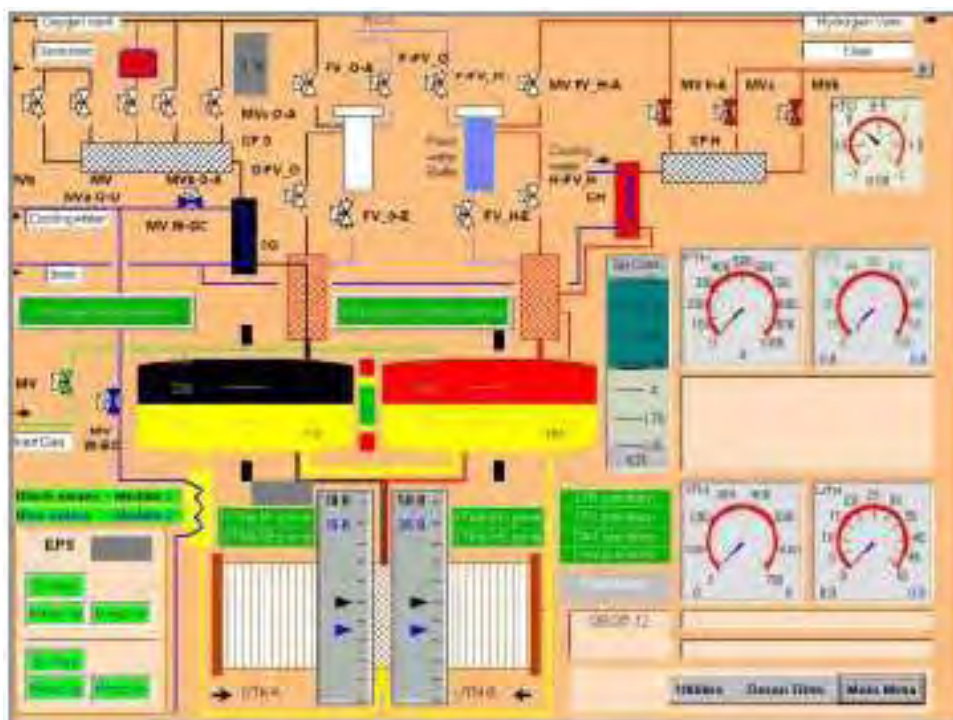


Figura 3.5 Monitoreo remoto de una planta electrolítica

## 3.9 Análisis técnico

---

En un proceso ideal, el consumo de energía que se requeriría para producir hidrógeno con un 100% de eficiencia es aproximadamente de 40 kWh/kg; sin embargo, en la práctica este consumo es muy cercano a 60 kWh/kg. Uno de los retos actuales en la producción de hidrógeno vía electrólisis es lograr que las eficiencias totales de los procesos se acerquen a un 80%, incluyendo la compresión del gas hasta al menos 6000 psig con consumos promedio de 50 kWh/kg.

El electrolizador más grande disponible actualmente en el mercado, produce únicamente 380,000 kgH<sub>2</sub>/año (la industria química mundial utiliza 0.2 billones kgH<sub>2</sub>/año), esta limitante en cuanto a capacidad de producción está ligada a la escasa demanda de hidrógeno que existe hoy en día (comparada con los combustibles fósiles), por lo que resulta necesario elevar al menos en 100 veces los limitados niveles de producción actuales por este medio, si se desea lograr una diversificación energética encaminada a la utilización de energías sustentables que permita aprovechar los recursos renovables.



**Figura 3.6 Módulo blindado de generación de hidrógeno. Hydrogenics**



## 3.10 Almacenamiento

---

### Opciones de almacenamiento

Las principales opciones para almacenar H<sub>2</sub> son: como gas comprimido y en estado líquido. Cada alternativa tiene sus ventajas y desventajas, por ejemplo, en almacenamiento líquido se tiene mayor capacidad de almacenamiento en cuanto a densidad de energía, pero requiere contenedores muy robustos e implica también una gran inversión energética en el proceso de licuefacción.

### Prevención de fugas y contención

La prevención de fugas es una consideración muy importante en cuestiones de diseño, ya que por la naturaleza del hidrógeno es posible que se presenten fugas en soldaduras de unión debido a la corrosión de los elementos y desgaste en válvulas, diafragmas, empaques. El H<sub>2</sub> se filtra a través de los elementos sólidos más rápido que otros gases combustibles, en flujos tan pequeños que no implican riesgos de seguridad. Sin embargo, con el tiempo estos flujos pueden deteriorar las propiedades mecánicas de los elementos expuestos.

### Almacenamiento de hidrógeno líquido (H<sub>2</sub>L)

El mayor reto del almacenamiento líquido es evitar el calentamiento, ya que el hidrógeno líquido debe estar a temperaturas criogénicas y cualquier calentamiento mínimo puede provocar su evaporación. Debido a esto, se debe prestar particular atención a las fuentes de calor a las que pueda quedar expuesto, que van desde procesos mecánicos hasta el propio medio ambiente.

## Almacenamiento en estado gaseoso (H<sub>2</sub>G)

El gas comprimido es la solución más simple de almacenamiento, ya que solo se requiere de un compresor y contenedores a presión. Su desventaja es la baja densidad de energía en su almacenamiento si no se cuenta con contenedores a alta presión. A mayores presiones mayor densidad de energía almacenada, lo cual implica sistemas más robustos y mayores costos de operación.

### Torres de aerogeneradores como tanque de almacenamiento.

La torre de un moderno aerogenerador de 1.5 MW tiene una altura que va de 65 a 85 metros y un diámetro de 5 a 3 metros (en la base y la parte más alta respectivamente), con paredes metálicas cuyo grosor va de 25 hasta 36 milímetros. Por lo tanto, estas torres tienen la capacidad de confinar, un volumen de 663.7 a 867.9 m<sup>3</sup>.

Asumiendo que solo es posible utilizar dos terceras partes de este volumen, de manera que quede disponible la base y la parte alta de la torre para seguir colocando los equipos eléctricos y electrónicos propios del aerogenerador, tendríamos entonces, 442.5 a 578.6 m<sup>3</sup> de volumen que podrían perfectamente ser utilizados como tanque para almacenar hidrógeno. Como lo muestra la figura 3.7.

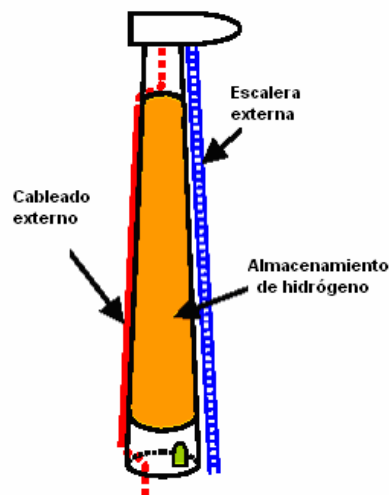


Figura 3.7 Almacenamiento de hidrógeno en torres de aerogeneradores

Dicho tanque podría, sin realizar modificaciones sustanciales a las tecnologías actuales de fabricación de torres para aerogeneradores, soportar hasta 10 atmósferas de presión, (únicamente sería necesario el uso de un revestimiento especial a la pared de la torre o la utilización de aleaciones menos sensibles a la corrosión por hidrógeno) permitiendo que la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en una torre sea aproximadamente de 4,425 hasta 5,786 Nm<sup>3</sup> (Nm<sup>3</sup> = 1 m<sup>3</sup> a presión atmosférica y 15 °C). Asumiendo que 11.1 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> son iguales a 1 kg de H<sub>2</sub>, como se dijo, en condiciones de presión y temperatura normalizadas, se pueden tener de 399 hasta 521 kg de hidrógeno almacenado en una torre.

El valor calorífico mínimo del H<sub>2</sub> es de aproximadamente 119.93 kJ/g ó 33.3 kWh/kg. Así, una torre de aerogenerador de 1.5 MW podría almacenar energía en forma de hidrógeno desde valores de 13.3 MWh hasta 17.3 MWh.

Si el electrolizador tiene una eficiencia de 80%, se requieren 49.25 kWh de la electricidad producida por el aerogenerador para convertirla en 1 kg de hidrógeno. Así que, una torre podría almacenar el equivalente de 13.1 hasta 17.1 horas de operación del aerogenerador a potencia nominal, lo cual es una gran cantidad de energía almacenada sin necesidad de invertir en otro tipo de almacenamiento para el hidrógeno.

## **Selección del tipo de almacenamiento**

La selección de método de almacenamiento depende de varios factores como son:

- La aplicación (Estado físico y presión requeridos)
- La densidad de energía requerida.
- La cantidad a producir.
- Periodo de almacenamiento
- Disponibilidad de energía para el proceso.
- Geología del área.
- Necesidades futuras de expansión.
- Requerimientos de Mantenimiento.
- Costos de Capital.

La densidad de energía del H<sub>2</sub> es una consideración importante en este aspecto. Por ejemplo, si el hidrógeno debe entregarse lejos de la fuente de producción (hasta 100 km), su estado líquido sería tal vez la mejor opción. La mayor densidad de energía como líquido implica el uso de un solo tráiler en lugar de 20 llevando gas comprimido.

## Capacidad de almacenamiento

La cantidad a ser almacenada es la consideración más importante puesto que los costos de operación por kg de H<sub>2</sub> son generalmente menores para una mayor cantidad de unidades de almacenamiento. Para HL, los niveles de evaporación por calentamiento son inversamente proporcionales al tamaño del tanque de almacenaje, por lo que los tanques mayores tendrán menores niveles de evaporación. Ver figura 3.8



**Figura 3.8 Almacenamiento de H<sub>2</sub> a gran escala**

Para pequeñas cantidades de almacenamiento es recomendable usar gas comprimido.

## **Periodo de almacenamiento**

No es recomendable el empleo de HL ni HG por largos periodos de almacenamiento debido a las perdidas y costos de operación, previamente señalados, en los que se incurre.

Es recomendable utilizar el H<sub>2</sub> generado, lo más rápidamente posible, reduciendo al máximo la necesidad de almacenarlo. En el peor de los casos, es mejor no producirlo.

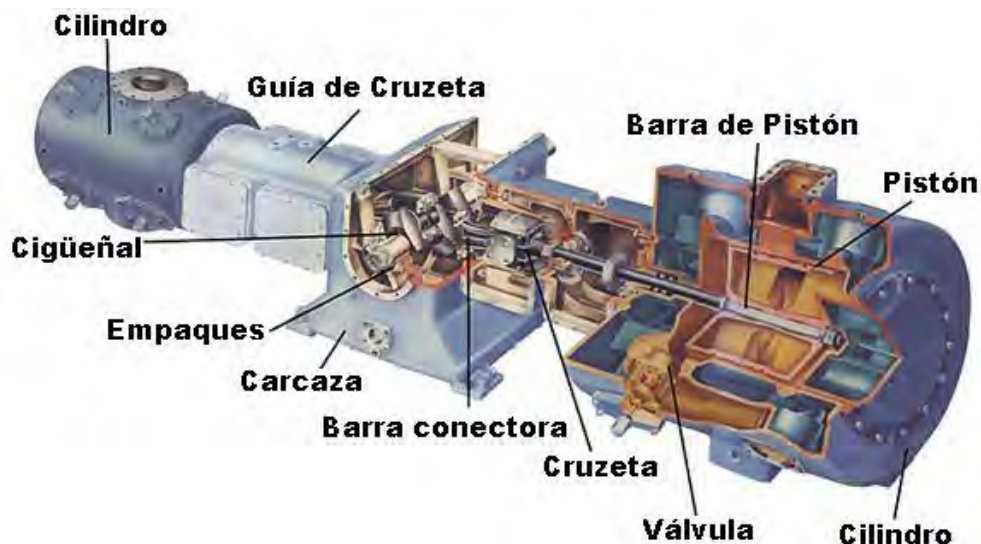
## 3.11 Compresión

---

Al comprimir un gas, este reduce su volumen de acuerdo al recipiente de almacenamiento, de este modo es posible almacenar una mayor cantidad de energía por unidad de volumen. Es decir, el proceso de compresión permite utilizar eficientemente los volúmenes de almacenaje con que se cuente, lo cual representa una ventaja, ya que se reduce el espacio necesario para el almacenamiento, aumentando a su vez la propiedad del gas en cuanto a su contenido energético lo cual da un valor agregado al producto y reduce costos de operación.

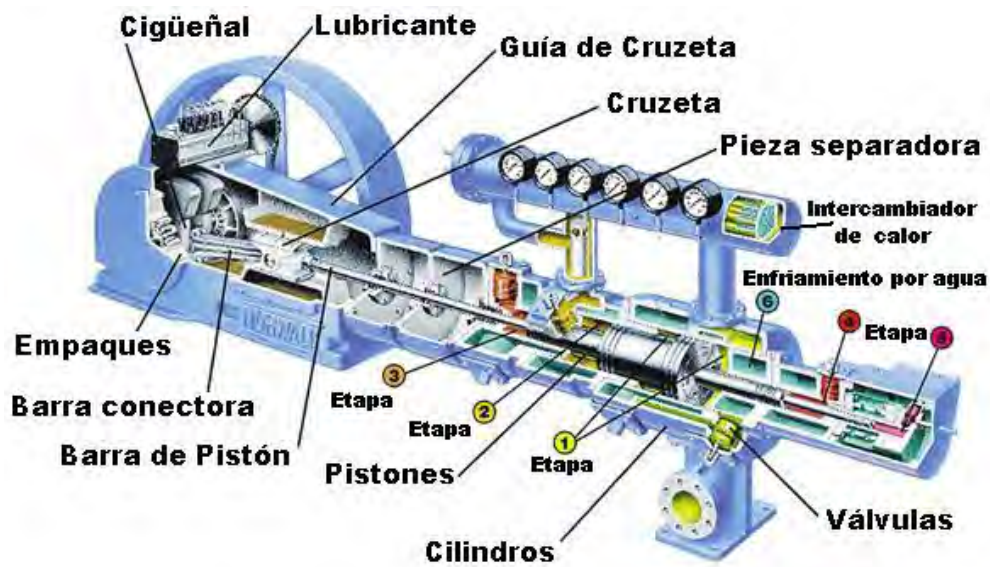
Existen compresores tipo estándar axial, radial y de pistón recíprocante, los empaques son el elemento más delicado debido a la fricción a la que son sometidos y a las propiedades ya mencionadas de dispersión del H<sub>2</sub>.

Los compresores de pistón recíprocante pueden ser de capacidades mayores a 11,200 kW (15,000 hp) y pueden manipular flujos de 890 kg/h a presiones arriba de 25 MPa (3,600 psig). Son adecuados también para flujos variables ver figura 3.9.



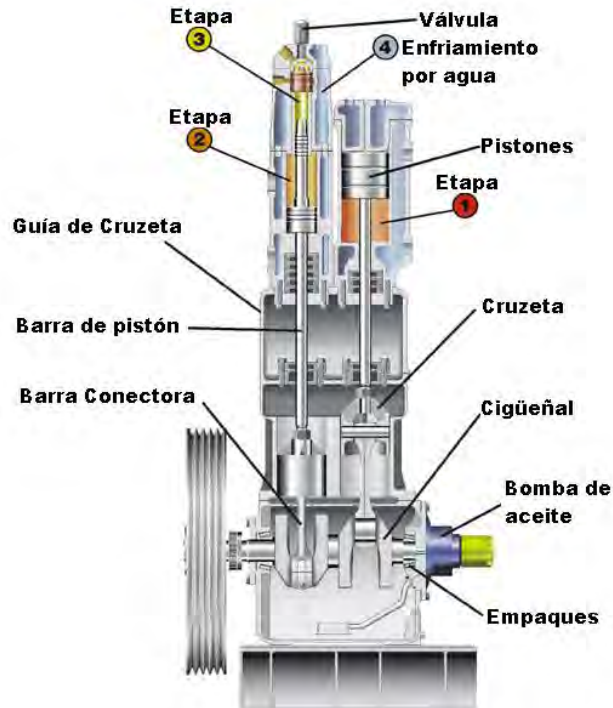
**Figura 3.9 Ilustración de un compresor de pistón recíprocante**

Los compresores radiales se utilizan para flujos de 160- 22,000 kg/h.



**Figura 3.10 Ilustración de un compresor radial**

Los compresores axiales se utilizan para 6,400-89,000 kg/h. Una ventaja de estos es que se pueden acoplar en una sola flecha mecánica, pero tienen eficiencias solo hasta del 50%.



**Figura 3.11 Ilustración de un compresor axial**

El almacenamiento de gas comprimido presenta dos riesgos intrínsecos. Primero, cualquier sustancia almacenada a altas presiones implica un riesgo, no importa si se trata de un gas inerte o hidrógeno. Segundo, si un tanque de presión presenta una fuga, el hidrógeno se esparcirá rápidamente en gran cantidad, sin embargo, la posibilidad de que se concentre en cantidad suficiente para ser peligroso es menor.



## 3.12 Transporte

---

Se puede transportar  $H_2$  como gas comprimido o como líquido criogénico. El método más barato de transporte depende de la cantidad que se entregue y la distancia requerida. Así, los métodos más usados para transportación son: tráiler, tren, barco y tubería.

### Transporte de gas comprimido

El gas comprimido se puede transportar usando cilindros de alta presión, tráiler con tanque o tuberías. Si se requiere transportar hidrógeno como gas, se debe comprimir a grandes presiones para maximizar las capacidades de los tanques de transporte. Los cilindros para gas a altas presiones son del orden de 40 MPa (5,800 psig) y pueden llevar 38 kg de hidrógeno cada uno. Sin embargo, la utilización de estos cilindros resulta cara y de difícil manejo.

Los tráileres o remolques para tanques cuentan con varios cilindros de acero montados en una estructura, los cuales pueden transportar desde 63 hasta 460 kg de hidrógeno, dependiendo de su capacidad. Las presiones de operación para este caso son: 20-60 MPa (2,900-8,700 psig). Ver figura 3.12.



**Figura 3.12 Transporte de  $H_2$  por medio de tráileres o remolques**

# **CAPÍTULO 4**

## **APLICACIONES DEL HIDRÓGENO**

# 4.1 Celdas de combustible para la producción de energía eléctrica

## Antecedentes de las Celdas de Combustible

La primera celda de combustible fue construida en 1839 por Sir William Grove, un juez galés y aficionado científico. El verdadero interés en celdas de combustible, como un generador práctico, no vino sino hasta comienzos de los años 1960's cuando el programa espacial de los Estados Unidos seleccionó las celdas de combustible en lugar del riesgoso generador nuclear y de la costosa energía solar, ver figura 4.1. Fueron celdas de combustible las que proporcionaron electricidad y agua a las naves espaciales de la NASA.

En las celdas de combustible la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno produce una diferencia de potencial y una corriente eléctrica continua en un circuito exterior y agua como residuo del proceso.

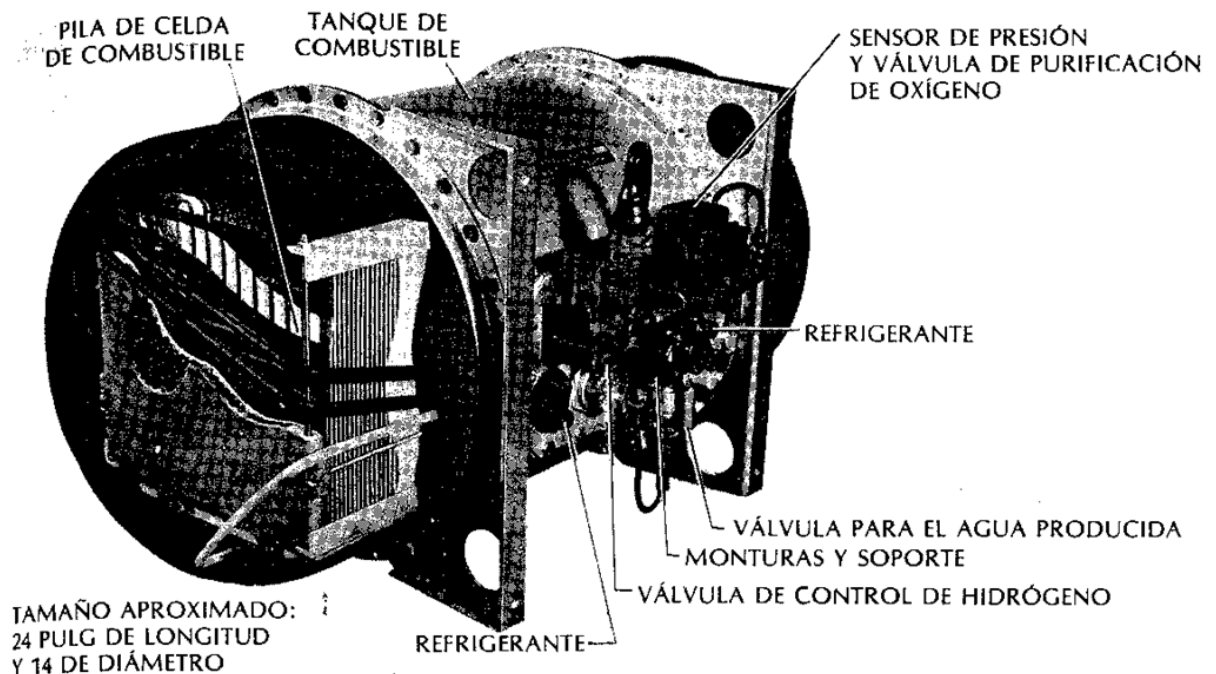


Figura 4.1. Celda de combustible.

En relación con la utilización del hidrógeno como combustible, Julio Verne en su novela "La isla misteriosa, escrita en 1874, hace decir a uno de sus personajes: ¿Qué se quemará en lugar de carbón? El agua, pero descompuesta en sus elementos constitutivos y descompuesta sin duda por la electricidad, que se habrá convertido para entonces en una fuerza poderosa y manejable".

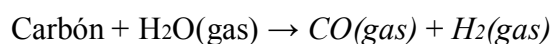
Como la cita anterior lo indica, el hidrógeno, H<sub>2</sub>, ha sido reconocido desde hace mucho tiempo como un combustible muy atractivo. El hidrógeno tiene un valor energético muy alto (Tabla. I) y su combustión produce agua, un subproducto "limpio" sin efectos negativos sobre el ambiente.

**Tabla. I Valores energéticos y composición de algunos combustibles comunes**

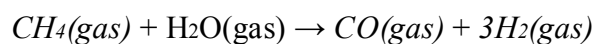
	Composición Elemental aproximada (%)			Valor calórico (Kj/g)
	C	H	O	
Madera (pino)	50	6	44	18
Carbón de antracita	82	1	2	31
Carbón bituminoso	77	5	7	32
Carbón	100	0	0	34
Petróleo crudo	85	12	0	45
Gasolina	85	15	0	48
Gas natural	70	23	0	49
Hidrógeno	0	100	0	142

No obstante, el hidrógeno no se puede utilizar como fuente primaria de energía porque existe muy poco en la naturaleza. La mayor parte del hidrógeno, se produce por descomposición del agua y de los hidrocarburos. Esta descomposición necesita energía; en realidad, a causa de la pérdida de calor, se debe utilizar más energía para generar hidrógeno que la que se puede aprovechar al utilizar el hidrógeno como combustible. No obstante, en la medida en que están disponibles fuentes de energía muy abundantes (como sería el caso de la energía solar) parte de esa energía se podría utilizar para generar hidrógeno, el cual se puede transportar y almacenar.

El hidrógeno, como ya vimos, se puede preparar por tratamiento del carbón con vapor sobrecalentado:



La conversión del carbón (rico en azufre) a hidrógeno es especialmente importante, porque se elimina el azufre en este proceso: la combustión directa del carbón rico en azufre genera emisiones que son muy dañinas para el ambiente. El hidrógeno se puede generar también a partir del metano, principal componente del gas natural, por medio de la siguiente reacción con el vapor de agua:



Una vez generado, el hidrógeno podría servir como un acarreador de energía. Podría ser más barato el transporte de hidrógeno utilizando las tuberías que ya existen para el gas natural, que el transporte de la energía eléctrica. Debido a que las tecnologías actuales se basan en combustibles que se queman, el hidrógeno podría sustituir al petróleo y al gas natural pues estos combustibles serán cada día más escasos y costosos (ver el siguiente esquema de la figura 4.2

## DENTRO DE UNOS AÑOS

**a** Empieza a probarse un reducido número de prototipos, los cuales se les rentan a conductores que vivan cerca de una estación de combustible de hidrógeno.

**b** Las flotillas de transporte público y comercial que regresan a la cochera cada día, empiezan a abastecerse en estaciones centralizadas de hidrógeno.

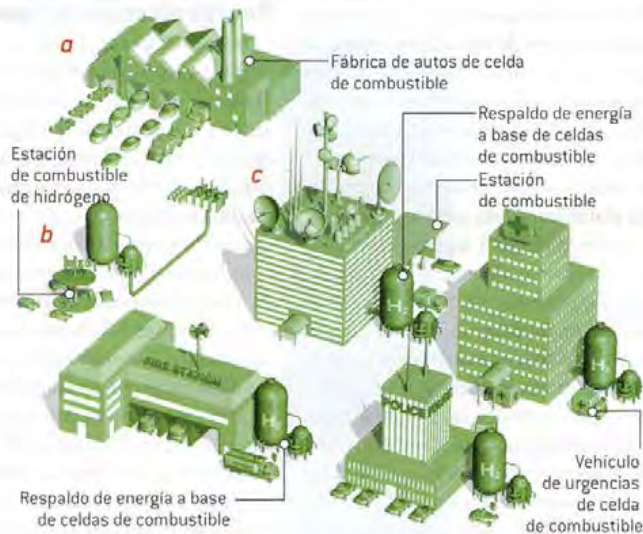


## DENTRO DE UNA DÉCADA

**a** Las plantas automotrices fabrican "patinetas" impulsadas con celdas de combustible, y algunos modelos de carrocería "enchufable".

**b** Se instalan estaciones abastecedoras de hidrógeno, con reformadores de gas natural (unidades de descomposición química), para suministrar hidrógeno a los primeros vehículos producidos.

**c** Se instalan unidades estacionarias de celda de combustible que reforman el gas natural en hidrógeno y lo transfieren a las unidades de celda de combustible, en empresas que requieran energía "de primera" de gran confiabilidad para comunicación de datos, manufactura continua o medicina de urgencias.



## MÁS ALLÁ DE UNA DÉCADA

**a** Las unidades estacionarias y regenerativas de celda de combustible en otros tipos de empresas y posteriormente en casas, venden la energía adicional a la red pública de electricidad.

**b** Entran en funcionamiento más estaciones que usan electrolizadores.

**c** Los distribuidores de autos venden varios modelos de carrocería para las patinetas usadas de los conductores.

**d** Enormes plantas de ensamblado producen patinetas de celda de combustible en tres tamaños (compacto, mediano y grande).

**e** Otras plantas en diferentes regiones del mundo construyen carrocerías diversas para sus mercados locales.



## FUENTES DE ENERGÍA

La generación actual de energía nuclear, hidroeléctrica y a partir de combustibles fósiles, se irá complementando con tecnologías limpias y renovables.



PETRÓLEO Y CARBÓN



HIDRO-ELECTRICA



NUCLEAR



GAS NATURAL



GEOTÉRMICA



BIOMASA



EÓLICA



SOLAR

Figura 4.2. Pasos hacia una sociedad de Hidrogeno

La energía eléctrica es una de las formas de energía más limpias y fáciles de transportar. Si pueden encontrarse métodos para producir grandes cantidades de energía eléctrica mediante celdas de combustible, a un costo razonable, la sociedad será capaz de alcanzar altos niveles de vida. Al mismo tiempo, se reducirían los daños al ambiente. Considérese un automóvil con celda de combustible. Tal vehículo no contaminará, será silencioso, probablemente tendrá pocos problemas de mantenimiento y podrá ser un catalizador de un mañana más limpio.

## **Aplicaciones**

En la actualidad, esta tecnología tiene muchas aplicaciones, ya que las celdas de combustible pueden utilizarse en cualquier situación en la que se requiera de una fuente eléctrica (la naturaleza de la corriente producida por las celdas de combustible, no representa dificultad, ya que puede utilizarse la electrónica de potencia para convertir la corriente directa en corriente alterna), independientemente de la escala de la aplicación. Así, por ejemplo, tenemos celdas de combustible que pueden abastecer sistemas eléctricos de gran demanda como edificios y casa habitación, hasta aparatos electrónicos portátiles como teléfonos celulares y laptops.

Sin embargo, las celdas de combustible tienen un espectro de aplicación mucho más amplio, que abarca incluso las áreas de consumo energético clásicamente dominadas por energéticos diferentes al hidrógeno. El más claro ejemplo es el de la industria automotriz. Si bien se ha demostrado que un motor a gasolina puede ser fácilmente convertido a hidrógeno, los motores a explosión continúan siendo muy poco eficientes. De manera que si el motor a gasolina es sustituido por un motor eléctrico, abastecido de electricidad por una celda de combustible, la eficiencia de dicho sistema resulta ser tres veces el valor de la un motor a gasolina, por lo menos. Actualmente esta aplicación está siendo utilizada tanto para autos compactos, como para autobuses de pasajeros en múltiples lugares del mundo.

Por último mencionaremos que la tecnología del hidrógeno aplicada a las celdas de combustible ha llegado para darle un nuevo impulso a la renovada industria de la

energía alternativa. Esto debido a que el gran problema de dicha industria era la intermitencia del sol o del viento, problema que pretendió resolverse mediante el uso de bancos de baterías para su carga y recarga, solución que por razones obvias resulta inviable a gran escala, no así la producción de hidrógeno, que combinado con la tecnología de las celdas de combustible resulta ser la solución para los problemas de intermitencia de los sistemas de gran escala.

## **Ventajas**

Las características que brindan a la celda de combustible la ventaja sobre otros sistemas son: Muy silenciosa, eficiente y limpia. La celda de combustible no cuenta con partes móviles, de manera que no existe fricción entre sus piezas, por lo tanto es casi completamente silenciosa, característica que en estos días ha resultado revalorada en su importancia.

Como ya se señaló, la eficiencia de una celda de combustible resulta muy superior a la de otros sistemas generadores, actualmente dicha eficiencia en modelos comerciales es del 50% (aunque día con día aparecen nuevos modelos experimentales que presentan eficiencias cada vez más elevadas), cuando la de un motor a gasolina oscila entre el 12% y el 15%.

Lo mejor de todo es que los únicos subproductos, resultantes de la generación de electricidad a partir de hidrógeno y oxígeno en una celda de combustible resultan ser únicamente agua pura y calor.



## Eficiencia de las celdas de combustible

La eficiencia energética de una celda de combustible según Ullberg, (1998), se define como:

$$E = \frac{U_{rev}}{U_{tn}}$$

donde:

$U_{rev}$ : voltaje reversible, (V)

$U_{tn}$ : voltaje termoneutral, (V)

$$U_{tn} = \frac{-\Delta H}{nf}$$

donde:

$n$ : número de electrones generados por 1 mol de hidrógeno, 2

$F$ : constante de Faraday, 96487 A.s/mol

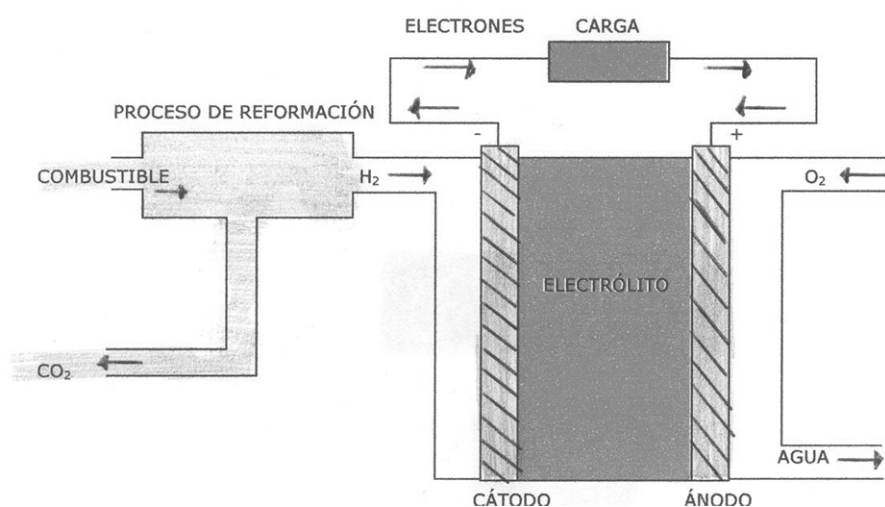
$\Delta H$ : entalpía, (J/mol) (W.s/mol) (A.V.s/mol)

## 4.2 Funcionamiento de las celdas de combustible

---

En una celda de combustible, las reacciones químicas entre el oxígeno y el hidrógeno ocasionan que la energía química se transforme directamente en energía eléctrica. El hidrógeno obtenido a partir del metano es el proceso que se usa con mayor frecuencia en tales celdas.

La estructura básica de una celda de combustible de hidrógeno-oxígeno se muestra en la figura 4.3. En esta celda se suministra hidrógeno líquido o gaseoso al cátodo o electrodo negativo. Posteriormente el hidrógeno se distribuye en todo el electrolito y este último libera electrones. Estos electrones se depositan en el cátodo por lo cual queda cargado negativamente. Los electrones se mueven después, a través de la carga, al ánodo o electrodo positivo.



**Figura 4.3. Operación básica de una celda de combustible. El combustible es metano ( $CH_4$ ), el proceso de reformación lo descompone en  $CO_2$  y  $H_2$ .**

## 4.3 Tipos de celdas de combustible

---

Las celdas de combustible son una familia de tecnologías que usan diferentes electrólitos, que operan a diferentes temperaturas con diferentes electrodos. Dichas tecnologías se encuentran con diferentes grados de desarrollo y comercialización; utilizan diversos combustibles (gas natural, hidrógeno, gas licuado de petróleo [GLP], etc.), diferentes electrólitos, entre otras diferencias.

Cada una de estas tecnologías tiende a ser más apropiada para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, las celdas de combustible de membrana eléctrica polimérica han demostrado ser apropiadas para su aplicación en autos, mientras que las celdas de combustible de carbonatos fundidos parecen ser más apropiadas para uso con turbinas a gas.

## 4.4 Celdas ácido fosfórico (CCAF)

---

Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Esta tecnología se ha estado impulsando durante más de 20 años. Además se han aportado inversiones de gran magnitud (un poco más de \$500 millones de dólares) por gran número de países a su investigación, desarrollo y programas de demostración.

Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia – y cerca del 85% si se lleva por que ésta produce y se emplea en cogeneración – comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 204 °C. Esta clase de celdas tiene gran auge porque es la única tecnología, entre las celdas de bajas temperaturas, que ha mostrado relativa tolerancia a combustibles reformados de hidrocarburo y por lo tanto estas celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras.

Por otro lado las CCAF son muy confiables. Algunas han operado por más de 9000 horas sin ningún tipo de mantenimiento o intervención humana. Un problema con las CCAF es su baja densidad de potencia.

Para que estas plantas sean rentables se necesita que sean desarrolladas técnicas de manufactura baratas. Diseño y operación de las CCAF El ácido fosfórico está contenido en una matriz de carburo de silicio recubierto de teflón. Los pequeños poros de la estructura de la matriz mantienen el ácido en su lugar mediante una acción capilar. Sin embargo, una porción del ácido puede combinarse con el combustible o en el flujo de oxidación. Por otra parte, los electrodos de carbón poroso catalizados con platino son usados tanto en el ánodo como en el cátodo.

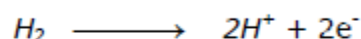
Los gases del oxidante y del combustible son alimentados por detrás de los electrodos por medio de surcos paralelos formados dentro de las placas de carbono. Estas placas son conductoras y llevan los electrones del ánodo al cátodo de la celda adyacente. En la mayoría de los diseños las placas son bipolares, si es que tienen surcos en ambos lados; un lado alimenta el combustible al ánodo de una celda mientras el otro lado suministra aire u oxígeno al cátodo de la celda adyacente.

El subproducto es agua y ésta es removida en forma de vapor en el lado del cátodo de cada celda junto con el exceso de oxidante. Este procedimiento para remover el agua necesita que el sistema sea operado a temperaturas alrededor de los 190 °C. A menores temperaturas el agua se puede disolver en el electrolito y entonces no puede ser removida en forma de vapor. A 210 °C el ácido fosfórico comienza a descomponerse.

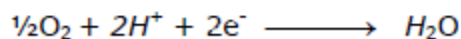
El exceso de calor se remueve de la pila de celdas por medio de canales de enfriamiento en las placas de carbono cada cierto número de celdas. Se puede utilizar aire o un líquido refrigerante como agua para que pase a través de los canales disipando el calor.

Las reacciones en las CCAF son:

Ánodo.



Cátodo.



En el ánodo, el hidrógeno se descompone en dos iones H<sup>+</sup>, los cuales pasan a través del electrolito al cátodo y dos electrones que pasan a través del circuito externo al cátodo. En el cátodo los electrones y el oxígeno se combinan con los iones H<sup>+</sup> para formar agua.

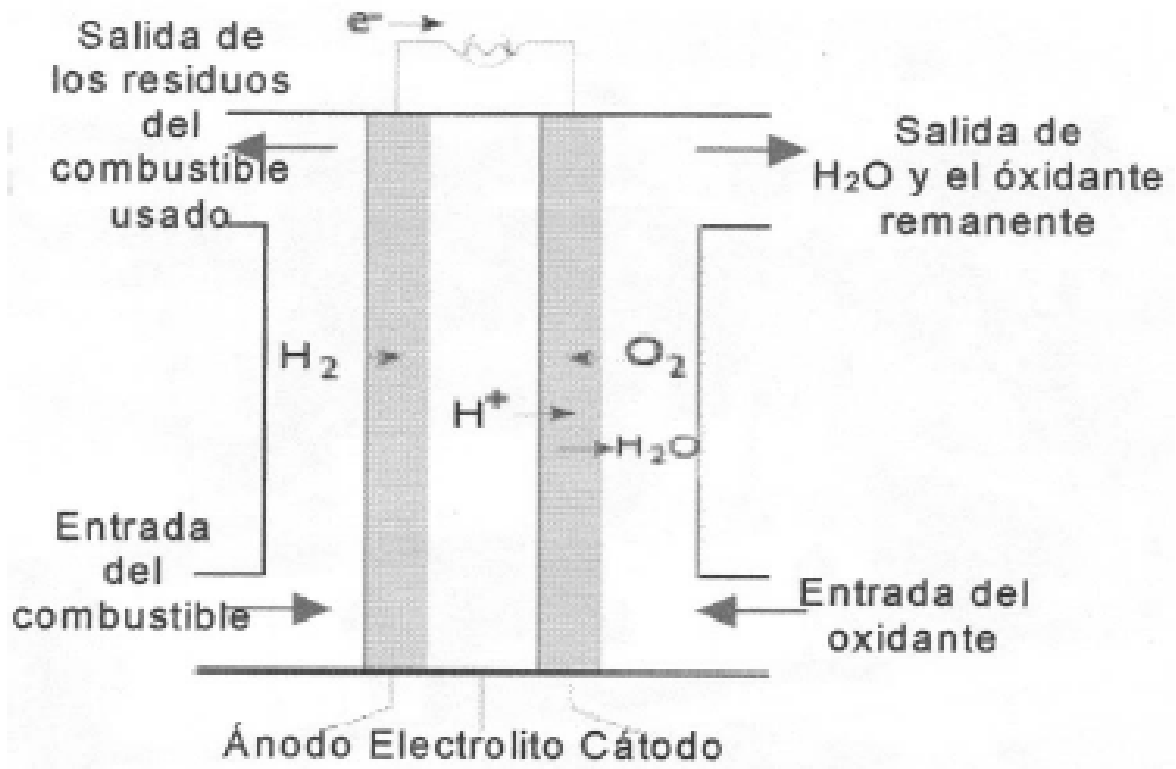


Figura 4.4 Esquema del funcionamiento de las CCAF

## 4.5 Celdas de polímero sólido (CCPM).

Estas celdas operan a relativamente bajas temperaturas (unos  $93^{\circ}\text{C}$ ), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, "son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como el reemplazamiento de baterías recargables en video cámaras".

Una de las ventajas de estas celdas al operar a temperaturas bajas y utilizar un electrolito sólido es que es posible tener más de 50,000 horas de vida útil.

El rango de operación de temperaturas oscila entre  $70^{\circ}\text{C}$  y  $85^{\circ}\text{C}$ . La baja temperatura de operación también reduce o elimina la necesidad de aislamiento térmico para proteger a personal o al equipo. El exceso de calor es utilizado para la calefacción de espacios en habitaciones o para el calentamiento de agua de uso residencial, pero no es suficientemente caliente para generar el vapor necesario para el proceso de reformación del combustible.

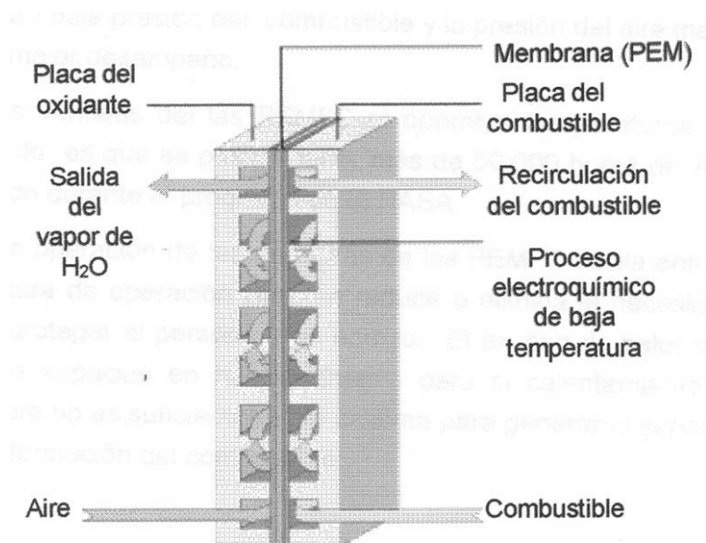


Figura 4.5. Funcionamiento de una CCMP diseñada por Ballard

## Diseño y operación de las CCMP

Las CCMP usan como electrolito una membrana polimérica. Esta membrana es un aislante eléctrico así como también un excelente conductor de iones de hidrógeno. El material usado hasta la fecha consiste de un polímero fluorocarbonado, tipo teflón, al cual se le han amarrado grupos de ácidos sulfúricos. Las moléculas del ácido están fijadas en el polímero y no pueden escapar, pero los protones de estos ácidos sí tienen libertad de migrar a través de la membrana. Con el electrolito en forma de un polímero sólido, no existe el problema de pérdida de electrolito que limita la vida útil de la celda.

La membrana de electrolito es una hoja delgada que puede manejarse fácil y seguramente. El ánodo y cátodo son preparados aplicándoles una cantidad pequeña de platino a una superficie de la hoja delgada porosa; son envueltos con papel grafitado poroso el cual ha sido impermeabilizado con teflón. El electrolito se intercala entonces entre el ánodo y cátodo, y los tres componentes se sellan juntos bajo condiciones de calor y presión para producir un solo "ensamble de membrana / electrolito".

Por otra parte, el ánodo y cátodo hacen contacto por la parte de atrás en donde se tienen los canales. Las columnas entre los canales hacen contacto eléctrico con la parte de atrás de los electrodos y dirigen la corriente al circuito externo. Los canales proporcionan combustible al ánodo y oxidante al cátodo.

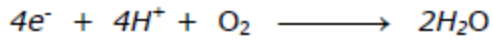
Las reacciones del electrodo en la CCMP son análogas a las que se producen en las CCAF. El hidrógeno es suministrado al ánodo, produciendo iones de hidrógeno que entran al electrolito y electrones que viajan al cátodo por el circuito exterior. En el cátodo, se combina el oxígeno suministrado en el mismo, con los iones de hidrógeno del electrolito y los electrones, para producir agua. Cuando el CCMP opera a alrededor de los 80°C, el agua está en estado líquido y es llevada fuera de la celda de combustible arrastrada por el flujo del oxidante excedente.



Ánodo



Cátodo



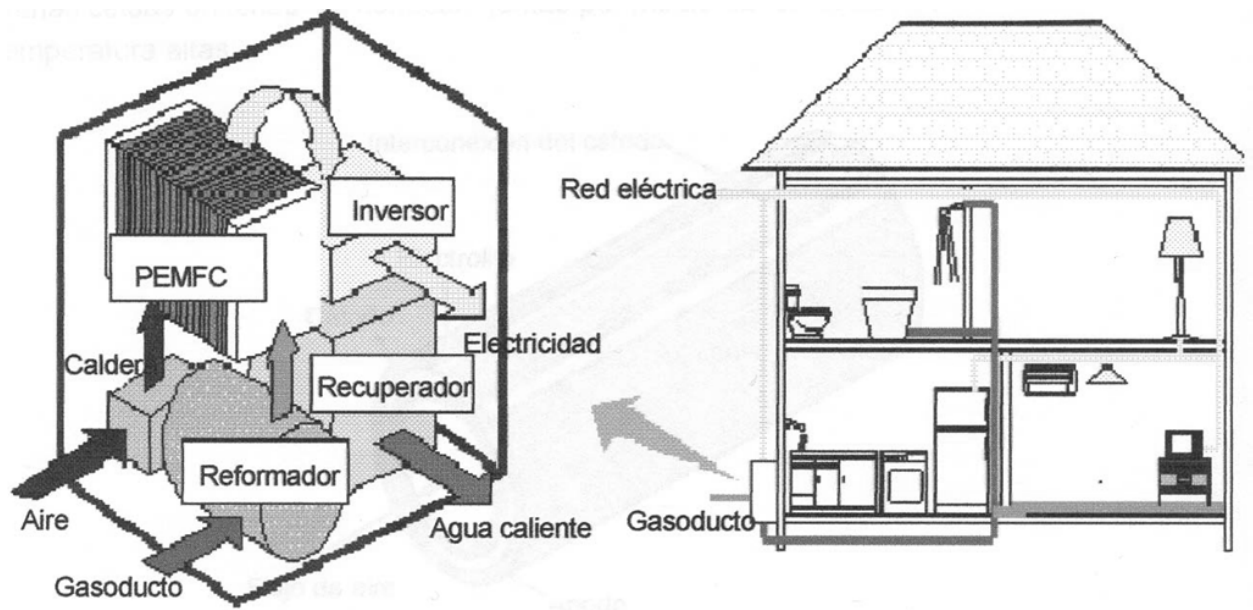
El desempeño de las CCMP ha mejorado durante los últimos años. Se han logrado densidades alrededor de 9150 A/m<sup>2</sup> a 0.7 V/celda unitaria bajo las condiciones de 4.5 atm, aproximadamente, de hidrógeno y oxígeno, y se obtienen más de 5380 A/m<sup>2</sup> para aire en lugar de oxígeno a la misma presión.

Por otra parte, en la celda de combustible, la eficiencia es determinada por el voltaje al que ésta ópera. La ventaja de la CCMP es que tiene una densidad energética volumétrica mayor a las otras tecnologías.

Además del hidrógeno puro, las CCMP pueden ser operadas también con combustibles de hidrocarburos reformados sin remover el CO<sub>2</sub>. Pero las pequeñas cantidades de CO producidas durante el proceso de reformación deben ser convertidas a CO<sub>2</sub> por un proceso de oxidación selectivo antes de que el gas de combustible entre a la celda unitaria de combustible, ya que grandes concentraciones de CO disminuyen la vida útil del electrolito. Éste es un proceso catalizador simple que puede integrarse fácilmente en un sistema de suministro de combustible.

Las CCMP pueden operar con aire. Como en todas las celdas de combustible, el desempeño es mejorado al presurizar el aire. Esto se verá reflejado en la relación existente entre la energía y el costo financiero asociado con comprimir aire a las presiones más altas y mejorar el desempeño. Pero por otro lado, las presiones arriba de 3 atm no son ventajosas para la mayoría de las aplicaciones.

Debido a que la CCMP usa un electrolito sólido, un diferencial de presión significativo puede ser mantenido entre los electrodos. Esto permite el funcionamiento del CCMP con baja presión del combustible y la presión del aire más alta dando como resultado un mejor desempeño.



**Figura 4.6. Configuración esquemática de una instalación residencial eléctrica con una CCMP empleando la cogeneración.**

## 4.6 Celdas de carbonato fundido (CCCF).

---

Las Celdas de Combustible de Carbonato Fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. Las celdas de carbonatos fundidos pueden alcanzar eficiencias de 50%, que es considerablemente mayor a las logradas por las celdas de ácido fosfórico.

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos evolucionaron a partir de un trabajo de los años sesenta dirigido a producir una celda de combustible que pudiese operar con carbón. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo probadas en California.

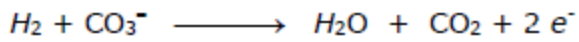
Aunque la operación con carbón parece poco probable en nuestros días, la operación con combustibles derivados del carbón o con gas natural es muy factible.

### **Diseño y operación de las CCCF**

Las CCCF emplean una mezcla de sales de carbonatos fundidos como electrolito. La composición del electrolito varía pero usualmente está constituido por carbonato de litio y de potasio. Opera a una temperatura cercana a los 650 °C; la mezcla de sales es líquida y es un excelente conductor iónico. El electrolito está suspendido en una matriz de cerámica aislante y químicamente inerte ( $\text{LiAlO}_2$ ).

Las reacciones en la CCCF son:

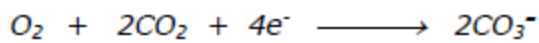
Ánodo



Y



Cátodo



El proceso del ánodo involucra una reacción entre el hidrógeno, el monóxido de carbono y los iones de carbonato ( $CO_3$ ) del electrolito a partir de los cuales se produce agua y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) mientras se liberan electrones. El proceso en el cátodo combina oxígeno y  $CO_2$  del flujo oxidante con electrones del cátodo para producir iones de carbonato los cuales ingresan al electrolito. El hecho de tener  $CO_2$  en el flujo oxidante requiere un sistema para recolectar dióxido de carbono del ánodo y para mezclarlo con el flujo que alimenta el cátodo.

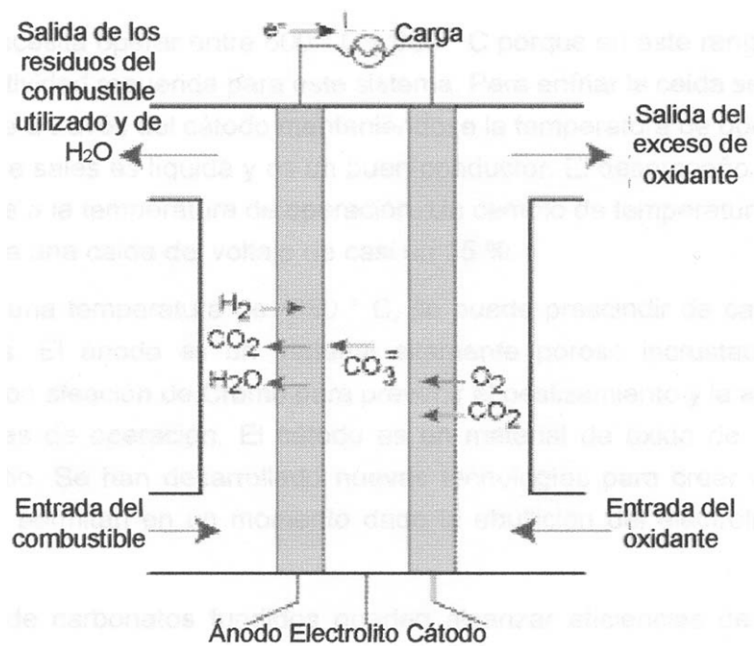


Figura 4.7. Esquema del funcionamiento de las CCCF

## Características del funcionamiento de las CCCF

Cuando la temperatura de operación se incrementa, el voltaje teórico de operación para la celda decrece y se obtiene una mayor eficiencia. Por otro lado al incrementar la temperatura de operación aumenta la tasa de la reacción electroquímica y por lo tanto la corriente obtenida también se incrementa. El efecto neto en la CCCF es que el voltaje de operación real es más alto que el de una CCAF con la misma densidad de corriente.

Este alto voltaje de operación de la CCCF significa que hay mayor energía disponible y por lo tanto la eficiencia de este tipo de celdas es mucho más grande que el de una CCAF que tenga el mismo tamaño en cuanto a sus electrodos. Puesto que las dimensiones de los electrodos determinan en gran medida el costo de la celda, se puede inferir que una CCCF es de menor tamaño será más barata y constituye una mejor inversión comparada con una CCAF de las mismas características.

Por otro lado una CCCF también produce un exceso de calor a una temperatura a la que es posible obtener vapor a alta presión, el cual podría ser utilizado para mover una turbina y así generar electricidad adicional. Por todo lo anterior se ha previsto que los sistemas de CCCF podrán tener una eficiencia global alrededor del 60%, si se emplea el esquema de ciclo combinado para utilizar el calor de desecho de la celda.

La CCCF necesita operar entre 600 °C y 650 °C, porque en este rango el electrolito tiene la conductividad requerida para este sistema. Para enfriar la celda se pasa un gran volumen de aire a través del cátodo manteniéndose la temperatura de operación. A 650 °C la mezcla de sales es líquida y es un buen conductor. El desempeño de la celda es muy susceptible a la temperatura de operación. Un cambio de temperatura de 650 °C a 600 °C produce una caída del voltaje de casi un 15 %.

Al operar a una temperatura de 650 °C, se puede prescindir de catalizadores de metales nobles. El ánodo es un material altamente poroso incrustado con níquel pulverizado y con aleación de cromo para prevenir el deslizamiento y la aglomeración a las temperaturas de operación. El cátodo es un material de óxido de níquel poroso

dopado con litio. Se han desarrollado nuevas tecnologías para crear estructuras de electrodos que permitan en un momento dado la ebullición del electrolito durante la operación.

## 4.7 Celdas de óxido sólido (CCOS).

---

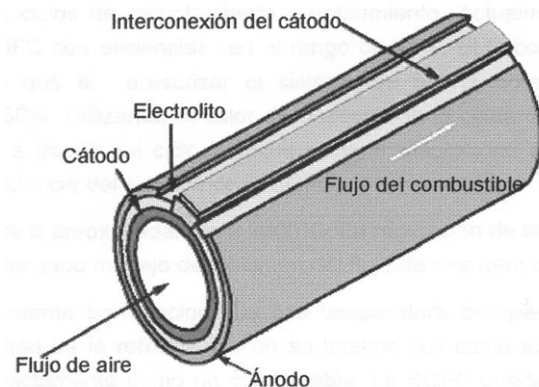
Otra celda de combustible altamente prometedora, la Celda de Combustible de óxido sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de estas en vehículos motores. Una prueba de 100kW está siendo terminada en Europa mientras que dos pequeñas unidades de 25kW se encuentran ya en línea en Japón. Un sistema de óxido sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 982 grados Celsius. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%. Un tipo de celda de combustible de óxido sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido.

La celda de combustible de óxido sólido (CCOS) usa un electrolito cerámico que reduce la corrosión y elimina los problemas asociados con los electrolitos líquidos de las celdas de combustible. Para lograr la conductividad iónica adecuada en semejante electrolito cerámico, el sistema debe operar a aproximadamente a 1000 °C. A esta temperatura, la reformación del combustible tipo hidrocarburo es factible, y el calor desechado del dispositivo sería utilizado fácilmente por las plantas generadoras de electricidad térmicas convencionales obteniendo una alta eficiencia del combustible.

### Diseño y operación de las CCOS

La CCOS está basada en el uso de un sólido cerámico como electrolito. El material preferido, óxido de circonio estabilizado con litio, es un conductor excelente de los iones a temperaturas altas. La CCOS es un dispositivo de estado sólido que posee ciertas propiedades y técnicas de fabricación similares a la de dispositivos semiconductores. El ánodo es un cermet (material con propiedades metálicas y cerámicas) poroso de níquel / circonio mientras que el cátodo es de estroncio dopado con manganato de lantano. El diseño de Siemens - Westinghouse coloca a la celda de

combustible alrededor de un soporte tubular de óxido de circonio poroso a través del cual se suministra el aire al cátodo que se encuentra colocado en la parte exterior del tubo. Después se deposita una capa de electrolito por fuera del cátodo y finalmente una capa de ánodo encima del electrolito. Varias celdas unitarias se conectan juntas por medio de contactos de semiconductor a temperaturas altas.



**Figura 4.8. Diseño tubular de una celda CCOS de Siemens – Westinghouse**

## **Características del funcionamiento de las CCOS**

Referente al funcionamiento, el hidrógeno o monóxido de carbono (CO) del combustible reacciona con iones del oxígeno (O) del electrolito para producir agua o CO<sub>2</sub> y generar electrones en el ánodo. Los electrones fluyen a través del circuito, y en el cátodo el oxígeno del aire se combina con los electrones y se convierte en iones que se inyectan en el electrolito. Es importante recalcar que la CCOS puede usar CO, metano o hidrógeno como su combustible directo.



Las reacciones de CCOS que ocurren son las siguientes:

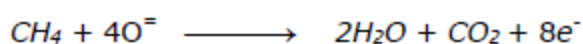
Ánodo



y



ó



Cátodo



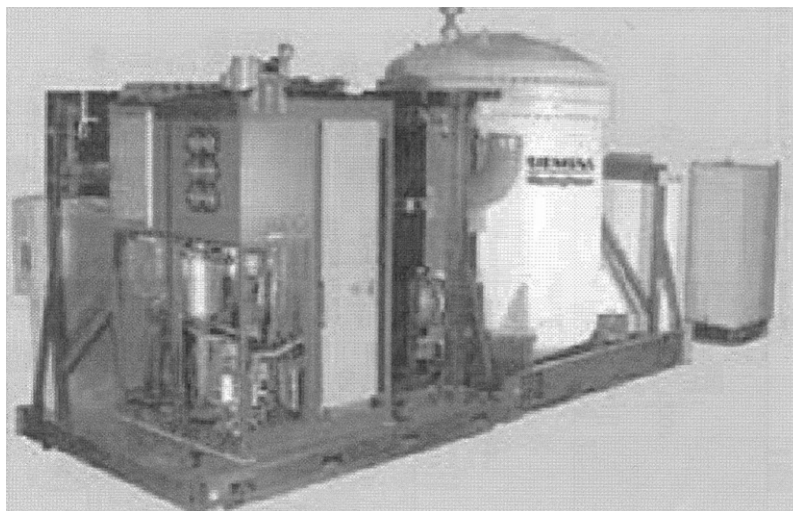
En el desarrollo de las celdas CCOS se ha obtenido 0.6 V /celda unitaria a aproximadamente 2500 A /m<sup>2</sup>. La vida útil de una sola celda ha alcanzado 30,000 horas con varios ciclos de calentamiento y enfriamiento. Actualmente se encuentra disponible CCOS con eficiencias en el rango de 45%. El Laboratorio Nacional de Argonne sugiere que al presurizar el sistema se podría obtener eficiencias de combustible del 60%. Utilizando el calor de desecho de la celda de combustible para generar vapor y a través del ciclo Rankine generar electricidad adicional, se podría incrementar la eficiencia del sistema de la CCOS.

La CCOS opera a aproximadamente 1000°C. La regulación de temperatura se logra a través de un adecuado manejo del volumen del flujo de aire dentro de la celda.

Como anteriormente se mencionó, la alta temperatura de operación de la CCOS ofrece la posibilidad de la reformación en su interior. Así como en la CCCF, el CO puede usarse directamente como un combustible, la CCOS puede soportar mayores concentraciones de azufre en el combustible en comparación de otro tipo de celdas.

El ánodo consiste en níquel metálico, con esqueletos e estabilizadores de óxidos de circonio y de litio que sirven para inhibir las incrustaciones de las partículas metálicas y proporcionar un coeficiente de expansión térmico comparable al de otros materiales de a ce lla. La estructura del ánodo se fabrica con una porosidad de 20 a 40% para facilitar el transporte de masa de reactante y los productos gaseosos. El estroncio dopado con manganato de lantano, que es el más común para el material del cátodo, es un conductor tipo p. Similar al ánodo, el cátodo es una estructura porosa que debe permitir el transporte rápido de masa reactante y los productos gaseosos.

La temperatura de operación de 1000 ° C de la CCOS requiere de un tiempo de encendido significativo. El desempeño de la celda es muy sensible a la temperatura de operación. Una caída del 10% de la temperatura produce una caída del 12% en el rendimiento de la celda debido al aumento de resistencia interna para el transporte de los iones de oxígeno.



**Figura 4.9. Desarrollado por Siemens - Westinghouse, es el primer híbrido entre una celda de combustible y una turbina de gas. El sistema utiliza una CCOS y produce 220 kW con una eficiencia del 58%.**

## 4.8 Celdas alcalinas.

---

Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

### **Otras Celdas de Combustible.**

Nuevos miembros de la familia de celdas de combustible, tales como las de metanol directo, pueden surgir como resultado del trabajo llevado a cabo en laboratorios privados y gubernamentales.

## 4.9 Observaciones finales

Al analizar el primer cuadro comparativo (Tabla I) observamos dos principales rangos de temperatura de operación. Las temperaturas se pueden clasificar como altas a partir de los 200°C y como bajas temperaturas cuando no se excede el valor de los 200°C. Esta variación se debe al empleo de diferentes electrolitos. Una ventaja que presentan las celdas de combustible radica en que la eficiencia no depende esencialmente de la temperatura de operación, por lo que se pueden alcanzar valores altos.

**Tabla II. Cuadro comparativo de las distintas tecnologías**

Celda de combustible	Electrolito	Temperatura de operación (°C)	Aplicaciones	Eficiencia	Densidad de potencia Actual (mW/cm <sup>2</sup> )	Densidad de potencia proyectada (mW/cm <sup>2</sup> )
Ácido Fosfórico (CCAF)	Ácido fosfórico líquido	175-200	Generación distribuida Transporte	40-50%	200	250
Carbonatos fundidos (CCCF)	Solución líquida de carbonatos de Litio, Sodio o Potasio	600-650	Generación distribuida	50-60%	100	>200
Intercambio Protónico (CCIP)	Polímero orgánico sólido	60-100	Generación distribuida Transporte	40-50%	250	>600
Óxidos sólidos (CCOS)	Óxido de Zirconio sólido dopado con litio	1000	Generación distribuida	45-55%	240	300

En la práctica, se han reportado eficiencias que llegan al 50% y en aquellos casos en que se utiliza el calor generado por la celda, se ha obtenido un 85%. Este calor se puede aprovechar en sistemas de generación eléctrica, calefacción, agua caliente, etc.

Otra de las ventajas que presentan las celdas de combustible es la capacidad de ser modulares y compactas, por lo que no requieren de un espacio con dimensiones grandes y además pueden conformarse de manera aditiva según las necesidades,

satisfaciendo cualquier tipo de demanda. Por otro lado estos dispositivos no requieren de sistemas de lubricación y tampoco un mantenimiento exhaustivo ya que no tienen partes móviles. Esta característica se traduce en sistemas silenciosos.

Es importante considerar que la celda de combustible puede utilizar casi cualquier combustible que contenga hidrógeno, aunque hidrocarburos como el gas natural, metano, etanol, biogás y propano, así como el diesel y la gasolina son los que mayor atención han recibido por razones de tipo práctico. En algunos casos, se pueden utilizar otros combustibles como el monóxido y dióxido de carbono, etc. Sin embargo, al utilizar alguno de estos combustibles es necesario incluir una etapa de reformación para extraer el hidrógeno, lo cual implica ciertos problemas como la producción de  $\text{CO}_2$  aunado al alto costo del proceso de reformación.

Las familias de celdas de combustibles se encuentran en una etapa de diagnóstico en diversas aplicaciones. Dependiendo de la tecnología utilizada podemos encontrar aplicaciones en transporte, generación eléctrica portátil y generación distribuida. Como lo muestra la tabla III

**Tabla III. Comparación de las tecnologías**

<b>Celda de combustible</b>	<b>Potencia Proyectada (KW)</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Ácido Fosfórico (CCAF)	100-5000	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Alta eficiencia en cogeneración de electricidad y calor</li> <li>*No necesita H<sub>2</sub> puro</li> <li>*Tecnología actualmente disponible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Requiere como catalizador Pt</li> <li>*Baja potencia y corriente</li> <li>*Tamaño grande/peso</li> </ul>
Carbonatos fundidos (CCCF)	1000-100,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Altas temperaturas que permiten una mayor eficiencia</li> <li>*No necesita un catalizador caro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Altas temperaturas producen corrosión y falla de componentes</li> <li>*Corta vida útil</li> </ul>
Intercambio Protónico (CCIP)	1-1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>*El electrolito evita la corrosión y los problemas de mantenimiento</li> <li>*Baja temperatura</li> <li>*Encendido instantáneo</li> <li>*Alta densidad de corriente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Bajas temperaturas requieren un catalizador costoso</li> <li>*sensible a impurezas en el combustible</li> <li>*Es necesario eliminar el exceso de agua que se produce ya que se inunda la pila</li> </ul>
Óxidos sólidos (CCOS)	100-100,0000	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Altas temperaturas que permiten una mayor eficiencia</li> <li>*No necesita un catalizador caro</li> <li>*El electrolito evita la corrosión y los problemas de mantenimiento</li> <li>*Larga vida útil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Altas temperaturas producen falla de los componentes</li> <li>*Baja conductividad iónica</li> </ul>

## 4.10 Mejoras al motor de explosión

---

Una posible crisis de hidrocarburos nos amenaza para dentro de 15 años, y en la actualidad, las emisiones contaminantes afectan de manera severa el medio ambiente. Por fortuna, los autos híbridos, eléctricos, de hidrógeno y de celdas de combustibles ofrecen una solución.

La aparición de autos que funcionan con combustibles alternos no responde únicamente al interés por la innovación o al avance de la ciencia como tal, es más bien por satisfacer la necesidad de una opción a los combustibles fósiles tradicionales, ya sea para ayudar a conservar el medio ambiente, como previsión a una futura escasez de petróleo o por conveniencia económica de aquellas naciones que no son autosuficientes en la producción de este energético.

Estados Unidos país que con apenas 5% de la población mundial utiliza el 26% del petróleo que se extrae del orbe, desarrolla un proyecto para que en menos de 16 años, el uso de las celdas de combustible sea generalizado. Japón, con su limitado territorio y pocos recursos naturales, también muestra interés al dirigir muchos de los esfuerzos de la industria automotriz al desarrollo de vehículos híbridos o eléctricos. Casos interesantes son Brasil y Australia, naciones que demuestran con éxito la viabilidad y conveniencia de usar alternativas a la gasolina como el etanol y el biodiesel.

### **Avances del automovilismo**

En los automóviles que usan combustibles alternos hay tres niveles: los que ya son una realidad (como los que utilizan gas LP, gas natural, alcohol o biodiesel), los que apenas comienzan su camino en el mercado (eléctricos, híbridos y de celdas de combustible) y los que se gestan en los laboratorios los que funcionan con energía solar, hidrógeno, aire comprimido o a largo plazo, los que aprovechan la tan añorada fusión nuclear.

En este capítulo de la tesis nos abocaremos principalmente al segundo nivel, donde están depositados los esfuerzos de las empresas automotrices. Los vehículos híbridos y de celdas de combustible ya son realidades palpables, y aunque todavía existen algunos pequeños inconvenientes que radican más en una falta de infraestructura para recarga que en su desempeño, tienen ventajas importantes en el cuidado del medio ambiente.



## 4.11 Autos con celdas de combustible

---

Actualmente se piensa que el hidrógeno lanzará una nueva revolución industrial en el siglo XXI, tan poderosa en sus impactos comercial, social y político como el carbón y el vapor en el siglo XIX, y el petróleo y el motor de combustión interna en el XX. A diferencia del carbón y del petróleo, el hidrógeno tiene el potencial de ser sostenible, no contaminante y de poder facilitar el acceso a la energía a todos los países.

Cuando Karl Benz sacó del granero su automotor, patentado en 1886, literalmente echó a andar las ruedas del cambio. El surgimiento del automóvil alteró de manera espectacular tanto la vida de las personas como la economía mundial. La creciente disponibilidad de transporte personal y económico hizo del mundo un lugar más accesible, al tiempo que dio origen a una compleja infraestructura industrial que transformó a la sociedad moderna.

Ahora, la tecnología automotriz podría desencadenar otra revolución, impulsada por hidrógeno en lugar de petróleo. Las llamadas celdas de combustible -en las que los átomos de hidrógeno se disocian en protones y electrones que impulsan motores eléctricos y emiten vapor de agua- podrían hacer que los automóviles fueran mucho más amigables con el ambiente. No sólo podrían ser más limpios, sino también más seguros, cómodos, personalizados, y tal vez hasta más baratos. Además, estos vehículos podrían ser decisivos en el viraje hacia una economía de energía "verde", basada en el hidrógeno. Conforme eso ocurriera, el uso y la producción de energía cambiarían significativamente. El cambio permitiría la libertad de viajar con independencia sin comprometer al medio ambiente ni agotar los recursos naturales de la Tierra.

Lo anterior parece cada vez más probable debido a una conjunción de factores. Para empezar, el motor de combustión interna impulsado por derivados del petróleo por

refinado, confiable y económico que sea finalmente está llegando a sus límites. A pesar de los continuos avances, su eficiencia es de sólo 20 al 25 por ciento. Y aunque desde los años sesenta, cuando esto no estaba regulado, la industria automotriz de Estados Unidos de América, ha reducido sustancialmente la emisión de gases (los hidrocarburos se han reducido en 99 por ciento, el monóxido de carbono en 96 por ciento y los óxidos de nitrógeno en 95 por ciento), la constante producción de dióxido de carbono, como ya se vio en capítulos anteriores, es motivo de gran preocupación, debido a su potencial de modificar el clima del planeta.

Aún con la aplicación de nuevas tecnologías, no se espera que la eficiencia del motor de combustión interna supere el 30 por ciento, y como sea, seguirá emitiendo dióxido de carbono. En comparación, el vehículo de celda de combustible con hidrógeno tiene casi el doble de eficiencia, por lo que necesitaría sólo la mitad de energía de combustible (ver figura 5.1). Y, lo que es más significativo, las celdas de combustible sólo emiten agua y calor como subproductos. Por último, el hidrógeno gaseoso puede extraerse de varios combustibles y fuentes de energía, como el gas natural, el etanol, el agua (vía electrólisis) y, con el tiempo, a partir de sistemas renovables de energía. Debido a su gran potencial, una impresionante lista de compañías automotrices como DaimlerChrysler, Ford, General Motors, Honda, PSA Peugeot-Citroën, Renault-Nissan y Toyota, están esforzándose por desarrollar vehículos de este tipo.

## 4.12 El automóvil crítico foco de transporte

---

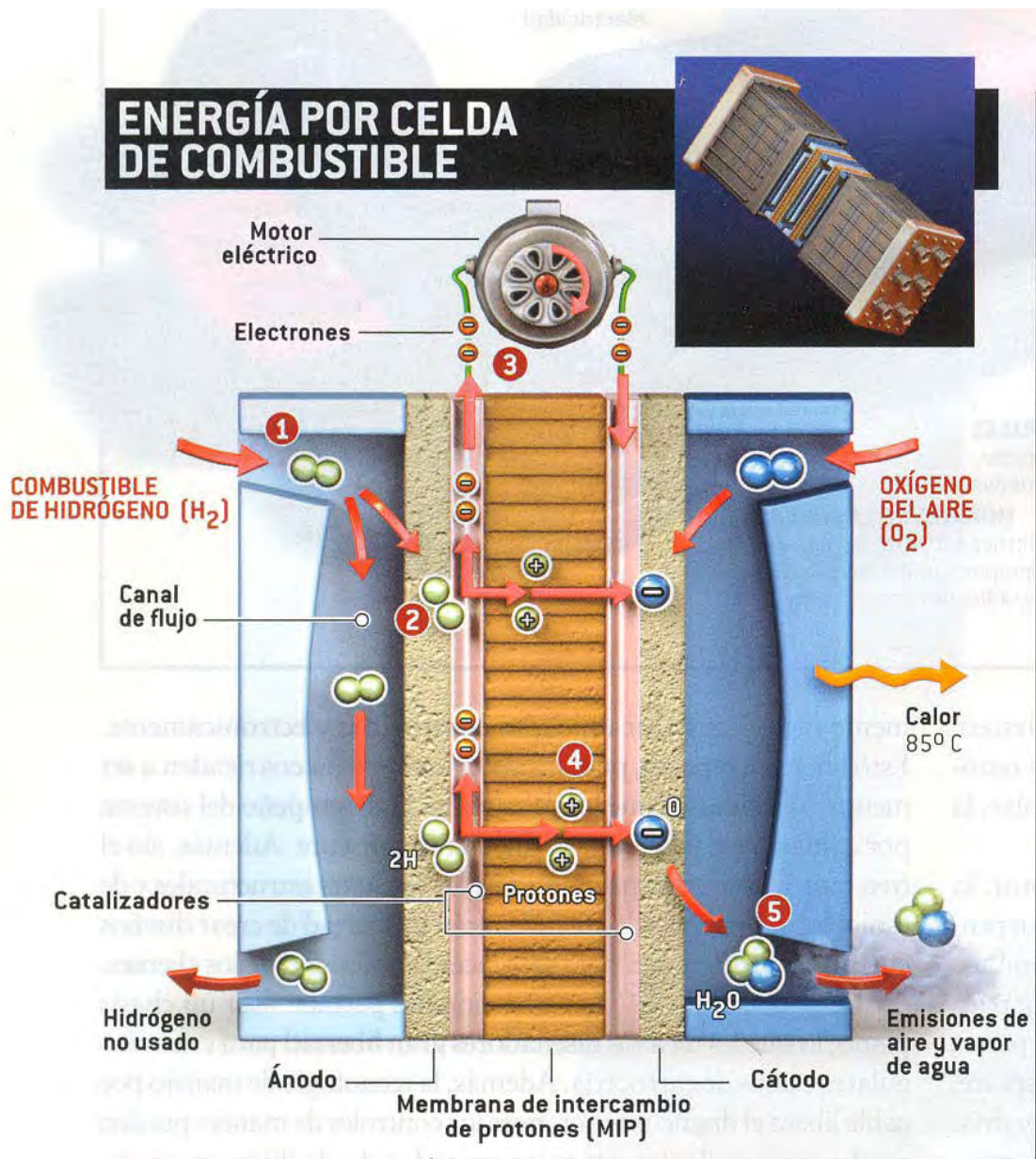
Es importante encontrar una mejor solución a los problemas que implica el transporte personal, ya que el efecto de los vehículos sobre el ambiente crecerá conforme aumente su uso. En 1960, menos del 4 por ciento de la población mundial poseía un vehículo. Veinte años después, el 9 por ciento tenía uno y en la actualidad, esa proporción ha alcanzado el 12 por ciento. Con base en las tasas actuales de crecimiento, para el año 2020, el 15 por ciento de la población del planeta podría poseer un vehículo. En vista de que la población puede pasar de los seis mil millones actuales a casi 7,500 dentro de dos decenios, el número total de vehículos se incrementaría de cerca de 700 millones a más de 1,100 millones. La expansión que se tiene prevista será impulsada por el florecimiento de la clase media en los países en desarrollo, lo cual se traducirá en el aumento del ingreso per cápita. Este último se relaciona casi directamente con la posesión de automóviles.

Actualmente, tres cuartas partes de los automóviles del mundo se concentran en EUA., Europa y Japón. Sin embargo, se espera que en los próximos diez años, el 60 por ciento de las ventas de vehículos nuevos se realice en ocho mercados emergentes: China, Brasil, India, Corea, Rusia, México, Polonia y Tailandia. El reto es producir vehículos atractivos, accesibles y rentables, que sean seguros, efectivos y ecológicamente sustentables.

## 4.13 Reconsideración de la propulsión automotriz

---

Para entender por qué puede ser tan revolucionaria esta nueva tecnología, consideremos el funcionamiento de un vehículo de celda de combustible. Éste es, en esencia, un vehículo de tracción eléctrica. Sin embargo, el motor recibe energía no de una batería electroquímica, sino de una unidad de celdas de combustible. El concepto de celda de combustible ya se vio en el capítulo anterior (vea la siguiente figura 4.10). La electricidad se produce cuando se desprenden electrones del combustible de hidrógeno que viaja a través de una membrana en la celda. La corriente resultante impulsa al motor eléctrico, que a su vez hace girar las ruedas. Los protones del hidrógeno se combinan con oxígeno y electrones para formar agua. Cuando se usa hidrógeno puro, el auto de celda de combustible es un vehículo de "cero emisiones".



**Figura 4.10. Celda de combustible.**

En la figura 4.10 se puede observar que la celda de combustible, con membrana de intercambio de protones (MIP) comprende dos electrodos delgados y porosos, un ánodo y un cátodo, separados por una membrana electrolítica de polímero que sólo deja pasar a los protones. Un lado de cada electrodo está revestido de catalizadores.

Después de que entra el hidrógeno [1] el catalizador del ánodo lo separa en electrones y protones [2]. Los electrones impulsan el motor al desplazarse [3], mientras los

protones atraviesan la membrana [4] hacia el cátodo. Su catalizador combina los protones con los electrones que regresan y oxígeno del aire para formar agua [5]. Las celdas pueden apilarse para producir mayor voltaje [6].

Las celdas de combustible, que utilizan hidrógeno y oxígeno para producir electricidad por un proceso electroquímico sin ruido y sin contaminación, se han perfeccionado hasta conseguir algunos tipos que son aptos para los vehículos de transporte y que tienen la gran ventaja de que resultan mucho más eficientes que la combustión típica en un motor de explosión. Se trata de las celdas de membrana polimérica que funcionan a baja temperatura. Otras celdas, más grandes y aptas para producir electricidad en instalaciones estáticas, funcionan a alta temperatura. En ambos casos se suelen utilizar materiales caros, que además tienden a degradarse, lo que hace que disminuya con el tiempo el rendimiento de la celda. También existen problemas potenciales de seguridad.

Casi todos los fabricantes de automóviles tienen un programa de investigación en celdas de combustible, con hidrógeno o sustancias ricas en hidrógeno como el metanol, y existe un reciente apoyo institucional a largo plazo en Estados Unidos y en la Unión Europea, pero nadie oculta que falta un largo camino por andar.

Aunque se requiere energía para extraer hidrógeno de las sustancias, ya sea a partir de hidrocarburos o mediante la electrólisis del agua, la gran eficiencia de la celda de combustible compensa esto con creces, como demostraremos más adelante. Por supuesto, la energía necesaria debe provenir de alguna parte. Algunas fuentes de energía, como las plantas de energía que queman gas natural, petróleo o carbón, producen dióxido de carbono y otros gases de invernadero. Otras, como las plantas nucleares, no lo hacen. Lo óptimo, como ya se demostró, sería producir electricidad a partir de fuentes renovables, como la energía de biomasa, la hidroeléctrica, la solar, la eólica y la geotérmica.

Al adoptar al hidrógeno como combustible automotor, la industria del transporte podría iniciar su transición, de una dependencia casi total del petróleo a una mezcla de fuentes de combustible. En la actualidad, el 98 por ciento de la energía usada para

impulsar vehículos se deriva del petróleo. Casi dos terceras partes del petróleo que importa Estados Unidos se destinan al transporte. Al complementar los combustibles fósiles, Estados Unidos podría, en teoría, reducir su dependencia del petróleo extranjero y fomentar el desarrollo de fuentes de energía locales, más amigables con el ambiente. Este esfuerzo introduciría además la competencia en los precios de la energía, lo que a largo plazo podría reducir su costo.

## 4.14 Renovación del diseño de vehículos

---

Otra clave para producir un vehículo realmente revolucionario es la integración de la celda de combustible con la tecnología del manejo por cable para reemplazar los anteriores sistemas de dirección, frenos, aceleración y otras funciones, predominantemente mecánicos, por unidades controladas electrónicamente. Esto liberaría espacio, pues los sistemas electrónicos tienden a ser menos voluminosos que los mecánicos. El desempeño del sistema por cable puede programarse mediante software. Además, sin el tren motriz convencional que limite las opciones estructurales y de estilo, los fabricantes de autos tendrán la libertad de crear diseños enteramente diferentes para satisfacer la necesidad de los clientes.

Reemplazar los motores de combustión interna convencionales permite usar un chasis plano, lo que les da a los diseñadores gran libertad para crear singulares estilos de carrocería. Además, la tecnología de manejo por cable libera el diseño interior, pues los controles de manejo pueden modificarse radicalmente y ser operados desde diferentes posiciones en la cabina.

Después de reconocer las ventajas anteriores, General Motors ideó el concepto AUTOnomy, mismo que introdujo en el año de 2002. A fines de septiembre del año pasado, un prototipo funcional, llamado Hy-wire (de "hidrógeno por cable", en inglés) hizo su debut en el Salón del Automóvil en París.

El concepto AUTOnomy y el prototipo Hy-wire fueron creados, literalmente, de las ruedas para arriba. Ambos constan de un chasis delgado, parecido a una patineta, que contiene la celda de combustible, el motor eléctrico, tanques de almacenamiento de hidrógeno y los sistemas de conducción (véase la figura 4.11). No tienen motor de combustión interna, transmisión, árbol de levas, ejes ni articulaciones mecánicas.





**Figura 4.11. Chasis “patineta” del AUTOnomy**

En un vehículo tipo AUTOnomy pl enamente de sarrollado, la tecnología de manejo por cable requiere de una simple conexión eléctrica y una serie de articulaciones mecánicas para unir el chasis y la carrocería. La segunda se inserta en el primero casi como una computadora portátil se conecta a una estación de acoplamiento. El concepto de un solo puerto eléctrico constituye una forma rápida y fácil de enlazar todos los sistemas de la carrocería -controles, energía y calefacción- con la plataforma. Esta sencilla separación de carrocería y chasis ayuda a que la primera sea ligera y no tenga complicaciones. Asimismo, la hace fácilmente reemplazable. En principio, bastaría con que el distribuidor o el propietario del auto "enchufara" un módulo intercambiable de carrocería, para que el vehículo fuera un auto de lujo hoy, una camioneta familiar la próxima semana y una minivan al año siguiente.

De manera muy similar a lo que ocurre con las computadoras, los sistemas del vehículo podrían actualizarse mediante software. En consecuencia, el personal de servicio podría descargar programas al gusto, para mejorar el desempeño del vehículo o para obtener características específicas de manejo y operación adaptadas a una marca particular de vehículos, un estilo de carrocería o las preferencias del cliente.

Con los controles electrónicos de manejo por cable, el conductor no necesita volante, palanca de velocidades ni pedales. El prototipo Hy-wire de GM está equipado con un control, llamado X-Drive, que puede moverse fácilmente para acomodarse a la posición de manejo de zurdos y diestros. El X-Drive funciona en forma parecida al manubrio de las motocicletas: el conductor acelera haciendo girar los manubrios y frena apretándolos. El conductor también tiene la opción de frenar y acelerar con la mano derecha o la izquierda; el freno tiene la prioridad en caso de señales ambiguas. El automovilista arranca el vehículo oprimiendo un solo botón, después de lo cual puede seleccionar una de tres funciones: neutral, avance o reversa. X-Drive elimina el tablero convencional de instrumentos y la columna de dirección, lo cual despeja el interior del vehículo y permite una colocación novedosa de los asientos y las áreas de almacenamiento. Por ejemplo, como no hay compartimiento para el motor, el conductor y todos los pasajeros tendrían mayor visibilidad y más espacio para las piernas que en los vehículos convencionales de la misma longitud.

Al bajar el centro de gravedad del vehículo y eliminar el bloque rígido del motor enfrente de los pasajeros, el chasis patineta AUTOnomy puede mejorar la suavidad de marcha, el manejo y la estabilidad más allá de lo posible con la arquitectura automotriz convencional (ver la siguiente figura 4.12).

## HY-WIRE AMPLÍA EL ESPACIO INTERIOR



LA FLEXIBILIDAD DE DISEÑO y la libertad de elección para el consumidor que se logran con la colocación de todos los sistemas operativos del auto en el chasis tipo patineta, son la clave de la estrategia de GM. Ahora los diseñadores de carrocerías tienen la libertad de explorar diferentes configuraciones para la cabina de pasajeros, sin las limitaciones tradicionales que implican el tablero y la saliente del centro. Otro aspecto atractivo es que un solo chasis podría tener un "guardarropa" de carrocerías intercambiables.

Figura 4.12. Hy-wire Amplía el espacio interior.

## Reorganización del sector automotriz

El diseño simplificado de un vehículo avanzado de celda de combustible, como lo dejan ver el concepto AUTOnomy y el prototipo Hy-wire, podría tener un profundo efecto en la manufactura de autos y quizá abriría el camino a la “reinvención de la industria del automóvil”. La industria automovilística actual depende de grandes capitales y sus márgenes de ganancia son modestos. Aunque las compañías de autos manejan dinámicamente los costos de desarrollo y manufactura, el exceso de capacidad de producción en la industria global está reduciendo los precios de los vehículos. Al mismo tiempo, se sigue complicando la reglamentación sobre lo que los autos y camiones tienen que contener, lo cual incrementa los costos. Considerados en conjunto, los precios bajos y los costos altos están amenazando los márgenes de ganancia.

Sin embargo, un concepto como el de AUTOnomy podría cambiar significativamente el actual modelo de negocios. Probablemente reduciría los costos de desarrollo de vehículos, ya que los módulos podrían producirse en forma independiente, y resultaría más fácil y barato hacerle cambios a los módulos de carrocería y de chasis. Al igual que con las actuales plataformas de camiones, será posible diseñar el chasis sólo una vez para satisfacer diferentes estilos de carrocería. Estos componentes tendrían diferentes frentes y diseño interior. Quizá se necesitarían sólo tres modelos de chasis - compacto, mediano y grande - por lo que el volumen de producción sería mucho más grande que en la actualidad, lo que generaría economías de escala.

Tener muchos menos componentes y tipos de partes reduciría aún más los costos. Por ejemplo, el conjunto de celdas de combustible se crea a partir de una serie de celdas idénticas, cada una de las cuales consta de una lámina plana de cátodos y un componente similar de ánodos, separados por una lámina de polímero electrolítico.

Dependiendo de los requerimientos de energía de un vehículo determinado (u otro dispositivo, como un generador estacionario de electricidad), puede aumentarse o disminuirse el número de celdas de la pila.

Aunque por el momento la tecnología automotriz de celda de combustible está lejos de ser económica (miles de dólares por kilovatio en el prototipo fabricado a mano), los costos están disminuyendo rápidamente. Si bien las celdas de combustible requieren actualmente de metales preciosos como catalizadores y de costosas membranas de polímeros, los científicos siguen buscando la forma de reducir al máximo el uso de los primeros y de hacer más baratos los materiales de las membranas.

El concepto AUTOnomy también permite desacoplar la manufactura de la carrocería y del chasis. Un fabricante mundial podría construir y exportar los chasis mientras que las empresas locales construirían las carrocerías y ensamblarían los vehículos.

En los mercados de alto poder adquisitivo, un arreglo de este tipo significaría que cada tres o cuatro años podrían introducirse nuevos modelos de chasis -cuando las actualizaciones de software ya no pudieran otorgar el desempeño deseado-, pero los clientes podrían comprar una carrocería nueva cada año, o rentar una cuando lo desearan.

## **Almacenamiento de hidrógeno**

Lo anterior no significa que se hayan superado todas las barreras técnicas en la ingeniería práctica de vehículos de celda de combustible. Hay todavía muchos obstáculos que deben ser superados para que los automóviles ofrezcan la comodidad y desempeño que los clientes esperan. Uno de los mayores retos es el desarrollo de una tecnología segura y efectiva, que permita almacenar a bordo el hidrógeno suficiente para hacer viajes de unos 450 kilómetros.

Cualquier tecnología aceptable debe durar lo suficiente para funcionar por lo menos 240,000 kilómetros, en un intervalo de temperaturas entre -40 °C y 45°C. El proceso de carga de combustible debe ser sencillo y no requerir más de cinco minutos. Como se vio en el capítulo anterior, hay propuestas para almacenar el hidrógeno en forma de

líquido, gas comprimido o estado sólido. Todas son prometedoras, pero también presentan dificultades.

Lo más probable es que en un principio se utilicen tanques de gas comprimido, aunque la compresión representa un riesgo. En la actualidad, estos sistemas tienen unos 350 kilogramos-fuerza por centímetro cuadrado de hidrógeno, pero el objetivo es alcanzar los 700 kgf/cm<sup>2</sup> para aumentar la autonomía del vehículo. Para efectos de seguridad, el tanque debe tener una resistencia al estallido de por lo menos el doble de la presión del combustible. Los recipientes actuales son relativamente grandes y están hechos de materiales muy costosos, como la fibra de carbono, o muy pesados.

El hidrógeno también puede almacenarse en forma líquida, pero se necesita una cantidad importante de energía para enfriarlo a la temperatura requerida (-253 °C). Además, diariamente se desprende del 3 a 14 por ciento del hidrógeno debido al calentamiento, lo cual constituiría un problema en el caso de que los autos permanecieran estacionados varios días entre uno y otro viaje.

Una solución a largo plazo es transportar hidrógeno sólido. Una alternativa es almacenarlo en forma de hidruros metálicos. Esta técnica es sencilla y segura pero se requiere de temperaturas entre 150 y 300 °C para extraer el hidrógeno del hidruro de metal. Para evitar la penalización de la energía, debe ser posible liberar el hidrógeno alrededor de los 80 °C. Aunque las investigaciones aún están en sus primeras etapas, el almacenamiento en estado sólido es tentador.

## 4.15 Reconstrucción de la infraestructura

---

Por históricos que puedan ser los cambios en el negocio automovilístico, éstos podrían quedar opacados por la posible influencia de los vehículos tipo AUTOnomy en el sistema mundial de abastecimiento energético. Las celdas de combustible y la infraestructura de combustible con hidrógeno representan un problema similar al de la gallina y el huevo. No podemos tener un gran número de vehículos de celda de combustible sin la disponibilidad de combustible adecuada, pero no podremos crear la infraestructura requerida a menos que en las carreteras haya un número significativo de vehículos de celda de combustible. Entre las cuestiones clave que deben atenderse están el financiamiento de subsidios, los incentivos para desarrollar estaciones de combustible (como ya se vio en el capítulo anterior), la creación de normas y la educación generalizada sobre estos temas. También será necesario el apoyo del gobierno para realizar investigaciones que prueben la viabilidad de la infraestructura.

Ciertamente, la industria también tiene que poner de su parte en la compleja y costosa transición hacia una economía basada en el hidrógeno. GM está desarrollando una estrategia para colocar en el mercado productos provisionales basados en celdas de combustible con hidrógeno, que produzcan ingresos que ayuden a cubrir los más de cien millones de dólares que la compañía invierte al año en tecnología de celda de combustible, y que al mismo tiempo ofrezcan experiencias operativas en el mundo real.

Es probable que los generadores de celda de combustible lleguen al mercado primero para usos industriales y posteriormente domésticos, antes de que estén disponibles los vehículos de este tipo. GM ha desarrollado prototipos de generadores estacionarios de celda de combustible, que funcionan con hidrógeno extraído de combustibles fósiles.

Dentro de pocos años, GM planea revelar una serie de generadores estacionarios de celda de combustible para sectores como los centros de datos digitales, los hospitales,

las fábricas y las empresas de telecomunicaciones, los cuales requieren "energía de primera" o "energía garantizada" de alta confiabilidad y no pueden permitirse quedarse sin electricidad. El producto inicial será una unidad de 75 kilowatts, que incorpora un reformador que extrae el hidrógeno para la pila de celda de combustible a partir de gas natural, metano o gasolina. No se necesita ningún avance técnico sensacional para construir estos productos estacionarios de energía.

Cuando estén en funcionamiento, estos sistemas descentralizados de energía también podrán usarse para reabastecer a los vehículos de hidrógeno.

Una vez que se disponga de métodos seguros y confiables de almacenamiento de hidrógeno, el procesamiento externo de combustible en las estaciones de abastecimiento se convertirá en un camino viable para generar el hidrógeno necesario para el transporte.

Una ventaja del procesamiento de combustible, por supuesto, es que ya existe gran parte de la infraestructura requerida para implementado. Podrían instalarse reformadores de combustible o electrolizadores en las estaciones de gasolina, lo que le permitiría a los operadores locales generar hidrógeno allí mismo y surtirlo a sus clientes. Con este enfoque no habría necesidad de construir nuevos ductos ni de desmantelar la actual infraestructura de servicios automotrices.

Un sistema aún más radical consistiría en reabastecer los vehículos en casa o en el trabajo, mediante la red de distribución que actualmente suministra gas natural a usuarios domésticos y comerciales. En algunas zonas, los ductos de gas natural son tan comunes como las estaciones de gasolina, lo que hace que esta infraestructura sea el conducto ideal para el hidrógeno. El gas natural se transformaría en hidrógeno y se almacenaría en el vehículo. Otra posibilidad es que la electricidad de la red pública produzca el hidrógeno. La electricidad adquirida en horas no pico, podría llegar a ser una forma accesible de cargar combustible en algunas localidades

Con el tiempo, los vehículos podrían convertirse en generadores de energía que suministrarán electricidad a casas y centros de trabajo. La mayoría de los vehículos



están ociosos cerca del 90 por ciento del tiempo, así que imagínese el crecimiento exponencial que tendría la disponibilidad de energía si la actual red eléctrica pudiera complementarse con la capacidad generadora de todos los autos y camiones estacionados a la entrada de las casas o en las cocheras.

Si uno de cada 25 vehículos de California fuera actualmente de celda de combustible, su capacidad conjunta de generación superaría a la de la red pública de ese estado.

Podemos elegir entre muchas opciones para crear una red de distribución de hidrógeno. Aunque los escenarios que hemos trazado son viables, será el costo lo que determine en mayor medida el desarrollo de la infraestructura. En todo el mundo, las compañías de energía están estudiando la economía del hidrógeno. Recientemente, James Uihlein, de BP (British Petroleum), declaró ante el Subcomité de Energía del Comité de Ciencias de la Cámara de Representantes de EUA., que puede generarse hidrógeno a partir de gas natural a un costo equiparable al del combustible convencional. Enfatizó el hecho de que el costo del hidrógeno por kilómetro de viaje es significativamente menor que el del combustible convencional, debido a la alta eficiencia del motor de celda de combustible. Según Uihlein, el alto costo actual del hidrógeno se debe a su transportación y distribución.

## 4.16 Problemáticas actuales con el hidrógeno

---

Dependiendo de los métodos de suministro, producción y distribución, el costo de un kilogramo de hidrógeno puede ser de cuatro a seis veces superior al costo de un galón de gasolina o combustible diesel. (Un kilo de hidrógeno produce la energía equivalente a un galón de combustible derivado del petróleo). Pero, gracias a que es probable que un vehículo optimizado de celda de combustible tenga por lo menos el doble de eficiencia que un vehículo de motor de combustión interna, viajará el doble de distancia con ese kilo de combustible. Por lo tanto, el hidrógeno se volvería comercialmente viable si su precio por kilogramo al menudeo fuera el doble que el de un galón de gasolina. Los estudios recientes indican que, con la tecnología actual, el precio es 1.3 veces mayor de lo que quisiéramos.

Pero conforme mejoren el almacenamiento de hidrógeno, el procesamiento de combustible y las tecnologías de electrólisis, y a medida que aumente la demanda de hidrógeno, su costo habrá de acercarse a lo requerido. Creemos que, a pesar de las dificultades que implica, la infraestructura para los vehículos de celda de combustible se desarrollará rápidamente.

Mientras continúan las discusiones sobre la forma de crear la infraestructura necesaria, es interesante señalar que ya existe cierta infraestructura de hidrógeno, muy en especial a lo largo de la costa del golfo de México, en EUA, y alrededor de Rotterdam, Países Bajos. El hidrógeno se produce en las industrias petroleras y químicas, así que actualmente fluye a través de ductos de cientos de kilómetros en numerosos países. La infraestructura existente produce al año alrededor de 540,000 millones de metros cúbicos de hidrógeno a partir de gas natural. En términos de energía, esto equivale a cerca de 140 millones de toneladas de petróleo al año, que es casi el 10% por ciento de los requerimientos del transporte actual. Aunque el hidrógeno que se produce actualmente tiene otros fines, lo importante es que ya se tiene experiencia en su generación y transporte.

Al igual que cualquier progreso que tiene el potencial de modificar por completo la tecnología dominante, la implementación de las celdas de combustible y la transición a una infraestructura energética basada en el hidrógeno llevará tiempo. Se planea por GM tener vehículos de celda de combustible, atractivos y a precios accesibles, para fines de este decenio y anticipamos que entre 2010 y 2020 los fabricantes habrán logrado instalar la base para apoyar una producción de gran volumen, lo que conducirá a un incremento significativo en la penetración de los vehículos de celda de combustible.

Debido a que se necesitan veinte años para dar una rotación completa a todo el parque vehicular, se requerirá por lo menos ese tiempo para apreciar en toda su extensión las ventajas ambientales y energéticas que ofrecen los vehículos de celda de combustible de hidrógeno. Pero el concepto AUTOnomy nos acerca a ese futuro y lo hace más claro

## 4.17 ¿Son ineficientes los motores de combustión?

---

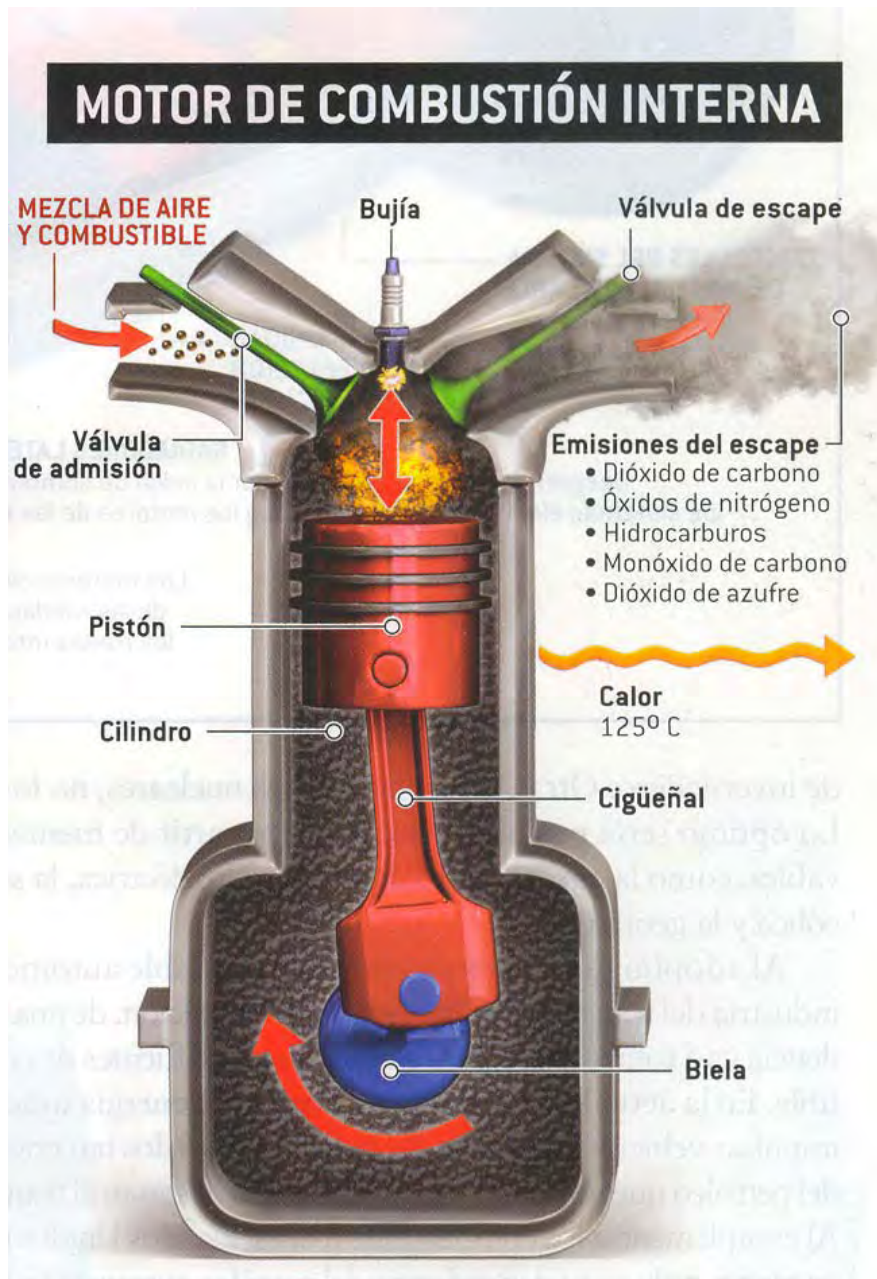
### **Funcionamiento del motor de combustión Interna (Eficiencia hasta del 30%)**

La mayoría de los autos usan un motor de combustión interna de cuatro tiempos. El pistón, que se mueve hacia arriba y abajo cuando gira el cigüeñal, empieza su carrera en la parte superior del cilindro.

La válvula de admisión se abre y el pistón baja, lo que permite que la mezcla de aire y gasolina entre en el cilindro. El pistón sube de nuevo y comprime la mezcla. La bujía se activa y enciende las gotitas de combustible. La carga comprimida explota e impulsa al pistón hacia abajo. La válvula de escape se abre y permite que salgan del cilindro los productos de la combustión (ver la siguiente figura 4.13).

De un tanque de gasolina de 40 litros, sólo se utilizan ocho para hacer que el automóvil se mueva; los otros 32 se desperdician. Por esta razón, se desarrollan motores más eficientes para los combustibles alternos.

Un motor requiere de energía para hacer que un auto acelere, contrarreste la resistencia del aire y venza la fricción del suelo. El combustible provee la energía necesaria -en forma química- para tales fines y se oxida -con ayuda de las chispas de las bujías- para generar calor que el motor transforma en trabajo. Pero los motores tradicionales sólo convierten una tercera parte del combustible en trabajo, a comparación del 80% en los autos híbridos y 72% en los de celda.



**Figura 4.13. Funcionamiento del pistón-émbolo del MCI**

La energía que se pierde por lo regular lo hace en forma de calor, en mover partes del auto y en bombeo de aire, entre otras tareas. En todos estos aspectos se puede mejorar la eficiencia de un motor. Si analizamos el proceso de un litro de gasolina, 62% se pierde en la fricción de las partes de la máquina, en bombeo de aire y en forma calórica. En el manejo en ciudad, otro 17% se desperdicia en el frenado y el arranque en los semáforos, 2% se gasta en accesorios como la bomba de agua, el aire acondicionado o el autoestéreo. Sólo alrededor del 20% se utiliza en la transmisión.

En un vehículo convencional, solamente cerca del 20%, y el mejor de los casos podría llegar a ser del 30%, de la energía térmica de la gasolina se convierte en trabajo mecánico (ver la siguiente figura 4.14).

Los autos con motor a gasolina tienen un depósito que alimenta al motor, el cual propulsa una transmisión que hace girar las ruedas.



**Figura 4.14. Eficiencia del motor de combustión de gasolina.**

# 4.18 Oxígeno + hidrógeno = electricidad

La electrólisis, como ya vimos, es el proceso por el cual el agua se descompone por medio de electricidad. Con un proceso inverso las celdas de combustible utilizan oxígeno e hidrógeno para generar energía. Ésta se almacena en baterías para alimentar el motor (ver figura 4.15).

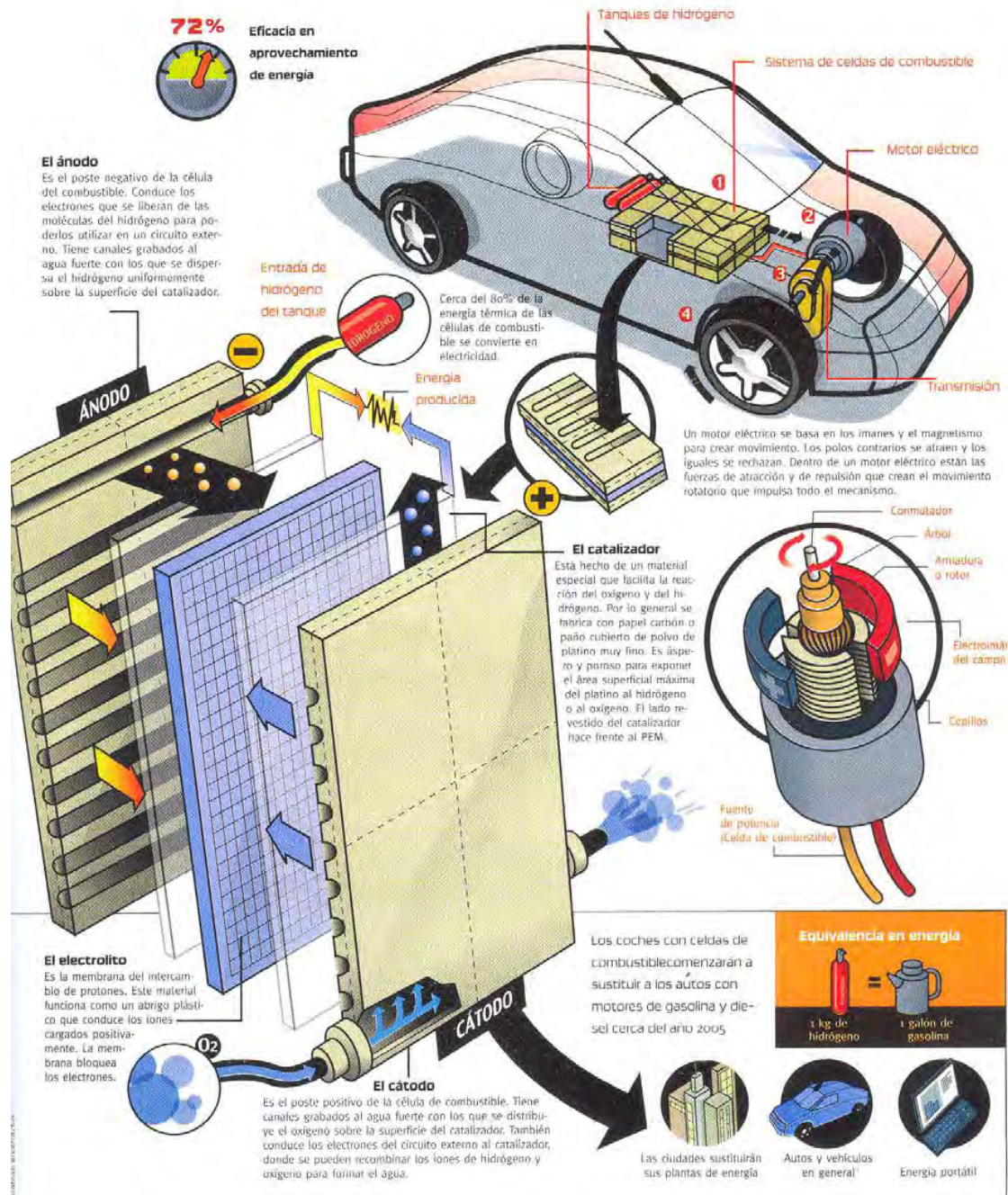


Figura 4.15. Eficiencia de la celda de combustible.

## 4.19 Vehículos híbridos

---

Cualquier vehículo es un híbrido cuando utiliza dos distintas fuentes de poder. Por ejemplo aquellas viejas motocicletas que permitían pedalear cuando el combustible se acababa son una excelente muestra de un transporte de este tipo, ya que combinaba la fuerza motriz humana con un motor de gasolina, o bien los submarinos que utilizan energía nuclear y diesel. Los autos de los que hablaremos en este caso toman su poder de la gasolina y la electricidad.

La estructura de un híbrido puede ser de dos clases: paralela o en serie. En la primera, un motor eléctrico y otro a gasolina envían la potencia a la transmisión, mientras que en la segunda, un motor a gasolina hace que trabaje un generador, y éste es el que se encarga de impulsar las ruedas; el motor de gasolina nunca mueve el vehículo directamente.

Muchos se preguntarán por qué diseñar un auto tan complejo, pero la respuesta está en su rendimiento de combustible, el cual es mucho mayor a los estándares que marcan que un automóvil nuevo debe recorrer 100 km con tan sólo 8.55 litros, y a que estos vehículos lo hacen con apenas 3.92 litros en promedio. Otra de sus ventajas es la reducción de la emisión de gases, la cual está muy por debajo de los 2.1 gramos de monóxido de carbono por kilómetro que se requieren para ser denominado como vehículo de baja emisión por el estado de California (véase Tabla IV).



<b>LOS TRES EN EL MERCADO</b>			
<b>VEHÍCULOS HÍBRIDOS</b>			
Modelo	Honda Civic Hybrid 2003	Honda Insight 2003	Toyota Prius 2003
Tipo de gasolina	Regular	Regular	Regular
Kilómetros por litro	20.4	23.8	20.4
Emisiones (tons.)	4.0	3.5	4.0
Tipo de vehículo	Compacto	Compacto	Compacto
Tamaño del motor (l)	1.3	1.0	1.5
Cilindros	4	3	4
Transmisión	Automática	Automática	Automática

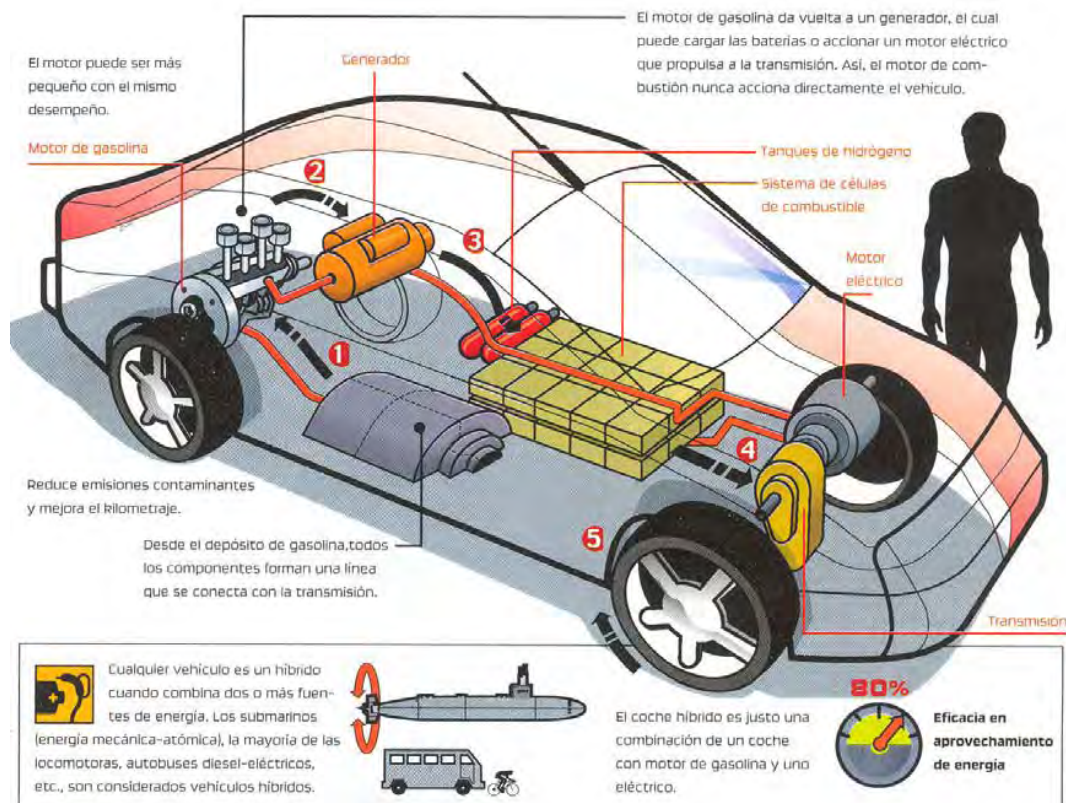
**Tabla IV Armadoras de autos híbridos**

## **¿Por qué construir un auto tan complejo?**

Puede ser que te preguntes por qué alguien construiría una máquina tan complicada cuando la mayoría de la gente es feliz con vehículos con motor de gasolina. La razón es doble: para reducir emisiones del tubo de escape y para mejorar el kilometraje. Estas metas en verdad se entretienen con firmeza. Además, los híbridos son sólo un paso hacia el uso de celdas de combustibles.

## **Partes fundamentales de un automóvil híbrido**

- Motor a gasolina. Un motor tradicional, como el que encontramos en cualquier vehículo pero de mucho menor tamaño y con tecnología que reduce las emisiones e incrementa la eficiencia.



**Figura 4.16 Estructura básica.**

- Tanque de gasolina. Es lo que hace que funcione el motor a gasolina. Es indispensable, ya que en densidad, de energía, cuatro litros de gasolina generan el mismo poder que una batería de casi media tonelada.
- Motor eléctrico. No es un motor normal, es sofisticado y cuenta con avanzados dispositivos electrónicos que hacen que trabaje como generador, ya que al acelerar, el motor consume energía, pero al frenar, esa misma energía es enviada de regreso a las baterías.
- Generador. Se utiliza únicamente para producir electricidad y es muy similar a un motor eléctrico.
- Baterías. Son usadas para almacenar la energía que necesita el motor eléctrico y demás funciones del auto.

- Transmisión. Es muy semejante a la de los vehículos convencionales y realiza la misma función.

## **Desempeño y eficiencia**

La clave para un híbrido está en el reducido tamaño del motor a gasolina, el cual debe ser mucho más chico que el de un auto convencional pero a la vez más eficiente. La pregunta es cómo un motor más pequeño puede desarrollar el poder al que estamos acostumbrados.

Por ejemplo en uno de los llamados *musclecars* de ocho cilindros, el motor nunca se desempeña a todo su potencial (esto sólo se logra en el 2% de las veces), pero en el caso de los híbridos, la pequeña máquina da la potencia requerida para que el auto se mueva a una velocidad suficiente para el manejo en condiciones normales. En el momento en que se requiere potencia extra para subir una cuesta o para acelerar de imprevisto, esta energía adicional la proveen la batería y el motor eléctrico, por lo que sólo se gasta el combustible indispensable.

Además de su pequeño tamaño y gran eficiencia, el motor de los autos híbridos tiene otras características para hacer rendir el combustible. Estos vehículos recuperan energía y la almacenan.

Cuando se frena en un auto convencional, se pierde la energía cinética del auto, pero en un auto híbrido, dicha energía se deposita en la batería gracias a los frenos regenerativos que hacen que el motor eléctrico funcione como generador y mande la energía al acumulador para su almacenamiento.

Otra forma de eficiencia se muestra cuando se apaga el motor de gasolina y sólo trabaja el motor eléctrico, por ejemplo, cuando el vehículo está parado en un alto o estacionado pero encendido.

Claro, también se utilizan las técnicas de los autos convencionales, tales como diseños aerodinámicos que contrarrestan la fricción del aire, llantas que favorecen la tracción y materiales ligeros.

Para RicR Wagoner, presidente mundial de General Motors, el ofrecer sistemas híbridos de propulsión es un compromiso de su compañía. Sobre lo cual comenta:

"Aunque el mercado de híbridos actual representa un volumen relativamente pequeño, se está preparando para satisfacer la demanda a medida que se desarrolle." GM pretende entrar al mercado de los híbridos con la GMC Sierra y la Chevy Silverado para el próximo año. "Como los híbridos tienen un costo mayor al de los vehículos convencionales, los incentivos fiscales al consumidor jugarán un papel crucial para ganar aceptación en el mercado al hacer que estas tecnologías sean más accesibles", agrega Wagoner.

Para muchos, los autos híbridos son simplemente un paso para acostumbrarnos al uso de otro tipo de carburantes, ya que en el muy probable caso de una crisis energética, la solución estaría en los automóviles que bajo el cofre tengan motores que no requieran gasolina para funcionar: "Los autos con celdas de combustible."

# CONCLUSIONES

---

México está capacitado para ser pionero en la producción del hidrógeno para uso tanto doméstico como industrial, ya que cuenta con diversas especialidades en ingeniería, que provee el personal adecuado para revolucionar el sistema energético de este país, pudiéndose convertir en exportador de hidrógeno y demostrar a las más importantes potencias, que un país del tercer mundo es capaz de preocuparse por el futuro y el bienestar de su gente.

La investigación necesaria para lograr una economía del hidrógeno podría beneficiarse enormemente de los recientes avances en los diseños experimentales y de la instrumentación. Teoría, simulación y computación estrechamente relacionadas con experimentos bien diseñados son fundamentales para reducir la enorme brecha entre el estado actual de la ciencia en México y las tecnologías disponibles en otros países. Todas estas capacidades deben ser explotadas para diseñar nuevos materiales, productos químicos asociados y los procesos físicos para la producción de hidrógeno, almacenamiento y uso.

La economía del hidrógeno ofrece una gran visión para la gestión de la energía en el futuro. Sus beneficios son numerosos, incluyendo un suministro amplio y sostenible, su flexibilidad con los medios de transporte de energía existentes, la diversidad de usos finales para producir electricidad mediante pilas de combustible o para producir calor mediante combustión controlada, el almacenamiento conveniente para la nivelación de carga, y una reducción potencialmente grande en nocivos contaminantes del medio ambiente. Consolidando la apuesta al hidrógeno como el combustible del futuro.

La única esperanza de reducir la diferencia significativa es un amplio programa a largo plazo de investigaciones innovadoras, de base alto riesgo / altas ganancias que este íntimamente unida y en coordinación con los programas aplicados de la industria privada, los mejores científicos de universidades y laboratorios nacionales del mundo, así como los mejores ingenieros y científicos de la industria deben trabajar en grupos interdisciplinarios para encontrar soluciones

revolucionarias a los problemas fundamentales de la producción de hidrógeno, almacenamiento y uso.

Proponemos cuatro enfoques dimensionales para establecer y consolidar al hidrógeno como un combustible alternativo:

1. Reducir drásticamente el costo de las pilas de combustible para el transporte.
2. Desarrollar una diversidad de fuentes para la producción de hidrógeno con costos de energía comparables a los de la gasolina.
3. Encontrar fórmulas viables de capacidad de almacenamiento de hidrógeno para usos de transporte.
4. Desarrollar una infraestructura segura y eficaz para el suministro del hidrógeno, así como contenedores apropiados que prevengan fisuras.

Con esta propuesta se esperarían lograr avances espectaculares en disminuir costos, mayor rendimiento y mayor fiabilidad que se necesitan para una economía del hidrógeno competitivo.

El hidrógeno es una posibilidad bastante amplia en el sector eléctrico, ya que en México hay comunidades tan alejadas de las grandes ciudades que es demasiado costoso crear un sistema eléctrico para satisfacer las necesidades de un pequeño grupo de personas, para lo cual el hidrógeno sería perfecto, ya que nos ahorra la construcción de torres eléctricas, subestaciones, tendidos de cables y personal de mantenimiento. Para el sector automotriz sucede de manera distinta ya que es un problema de salud pública y requiere de un enfoque diferente, este va más del punto de vista ecológico que económico sin embargo no van peleados y pueden llegar a tener un punto de equilibrio, en el que podamos tener combustibles más limpios, con costos accesibles y disponibilidad en el suministro. Es necesario recordar que los combustibles derivados del petróleo como se señaló en algunos temas son los más eficientes ni seguros, además debe ser

mejor cuidado ya que su uso es necesario en muchas otras aplicaciones y si podemos deslindarlo de algunas con otros combustibles estaríamos haciendo su precio más estable y se aprovecharía de mejor forma.

Recordemos también que el tema del hidrógeno adquiere su importancia no solo por ser una fuente diferente o alterna de energía, lo que más nos debe asombrar son los residuos que tenemos de su combustión, y esto representa significativamente la energía más limpia que jamás se haya descubierto, así como la oportunidad de enderezar el curso que lleva el cambio climático, el cual se ha visto seriamente afectado en el más corto plazo de tiempo que este planeta haya visto, y ya que los seres humanos lo hemos provocado, debemos de poner toda nuestra tecnología para salvar el lugar que habitamos tan cómodamente, o lo menos que podríamos hacer es no seguirlo destruyendo, ya que podrá otra especie mejor adaptada sobrevivir a todos estos cambios, pero la nuestra ... no.

Lo más seguro es que no nos toque a nosotros como lectores y contemporáneos de esta Tesis observar una ciudad de México totalmente libre de contaminación, donde las palomas no se mueran y los ojos no se nos irriten. Pero si queremos que futuras generaciones no padezcan lo mismo que nosotros, es muy importante demandar reformas en el sistema energético del tipo ambiental, ya fue mucho de carros ostentosos con motores de 8 litros que lo único que hacen es dañar la salud de los seres humanos y el planeta. Es necesario implementar estas tecnologías en el sistema automovilístico e industrial que son los que más afectan la atmósfera y en ella el aire que respiramos. ¿Se requiere mucho capital? ¡Sí!, pero nos va la vida en ello.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- Compendio de información del sector energético mundial 1999  
Ing. Gerardo Bazán Navarrete  
UNAM, Diciembre de 1999.
- Hidrógeno solar energía para el futuro  
Dr. Phil Eduard W. Justi.  
Marcombo, Barcelona- México, 1985
- Forster, K. “Hidrógeno Solar: la energía de una alternativa energética práctica. Revista Siemens, págs. 30 a 35.  
3er trimestre de 1990
- La generación distribuida a partir de celdas de combustible  
Tesis, Facultad de Ingeniería UNAM.  
México Febrero de 2003
- Edición española de Scientific American  
El vehículo del cambio  
Barcelona (España), diciembre de 2002
- “La economía del Hidrógeno. Cuando se agote el petróleo.”  
Jeremy Rifkin;  
Editorial PAIDOS. México.



- “Beyond Oil”  
J.Gever,  
University Press of Colorado, 1991, pág. 172.
- “El Mundo del Petróleo”  
Entrevista con el Director General de CFE Alfredo Elías Ayub. Revista Año 2, Tomo 11,  
Agosto-Septiembre, pág.59.
- “Survey of the Economics of Hydrogen Technologies”,  
C.E.G. Padro & V. Putsche,  
Informe técnico, Golden, CO, NREL, septiembre de 1999
- "Tesis: Hidrogeno solar una alternativa energética sin carbono"  
Gerardo Loredó López
- “Survey of Hydrogen Production and Utilization Methods”  
Institute of Gas technology, 1975.
- " Tesis: Estudio de Factibilidad del uso del hidrógeno como combustible en máquinas de  
combustión interna para generación de electricidad"  
Marco Antonio Rojas Mena
- “Hydrogen Power Theoretical and Engineering Solutions”  
Editors. M.Marini & G.Spazzafumo  
Ed. SGE Padova
- “Optimized Hydrogen and Electricity Generation from Wind”  
L.J. Fingersh. June 2003 • NREL/TP-500-34364

- " Tesis: Producción de hidrógeno a partir de microorganismos fotosintéticos para su empleo en celdas de combustible tipo PEM ”  
M. en Ingeniería Alina Juantorega Ugas
- “Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis”  
Pamela L. Spath, Margaret K. Mann Milestone Completion Report. February 2004 • NREL/MP-560-35404
- “Summary of Electrolytic Hydrogen Production”  
Milestone Completion Report, Johanna Ivy .September 2004 • NREL/MP-560-36734
- "Tesis: Producción de energía eléctrica a partir de energías renovables e hidrógeno"  
Juan Marcos Molina Martínez, Jesús Esteban Rosas Medellín, Jesús Antonio Serrano García
- “Hydrogen Storage in Wind Turbine Towers”  
R. Kottenstette. Summer intern from Santa Clara University, J. Cotrell. National Renewable, Energy Laboratory  
September 2003 • NREL/TP-500-34656
- “Solar and Wind Technologies For Hydrogen Production”  
Report to Congress (ESECS EE-3060), December 2005
- “Hidrógeno Solar Energía para el futuro”  
DR. Phil Eduard W. Justi.  
Editorial Marcombo  
Barcelona-México 1985