

USO DEL HIDROGENO PARA TRANSPORTE VEHICULAR

Ing. PABLO EMILIO FERREIRA MEJIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMAGA
2008**

USO DEL HIDROGENO PARA TRANSPORTE VEHICULAR

Ing. PABLO EMILIO FERREIRA MEJIA

**Monografía presentada para optar el título de
Especialista en Ingeniería del Gas**

DIRECTOR

SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO

Ingeniero de Petróleos UIS Magíster en Yacimientos.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMAGA
2008**

Dedico este trabajo a mi querida madre, a mi padre, a mi esposa e hijas Paula, Maryori, Luz Dary y Fabiola, quienes me han dado la fortaleza para lograr todas mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a DIOS por la sabiduría, a la Empresa INDEPENDENCE DRILLING S.A. por su colaboración, a la Universidad UIS por todos los valiosos conocimientos que he adquirido.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. IDENTIFICACION DEL HIDROGENO	4
1.1. Propiedades físicas y químicas	6
2. PRINCIPALES REACCIONES DE COMBUSTIÓN DEL HIDROGENO.	8
2.1 La química del hidrógeno	8
3. USO DEL HIDROGENO EN MOTORES, MOTORES TERMICOS, CICLO DE OTTO, CICLO DIESEL.	11
3.1. Uso directo en motores	11
3.1.1. El ciclo de Otto	11
3.1.2. El ciclo diesel	12
3.2. Ejemplo de la conversión de vehículos diesel a gas natural de hidrogeno	14
3.3 Uso del hidrogeno en celdas de combustión	15
3.3.1 Definición de una celda de combustible	15
3.3.2 Tipos de celdas de combustible	18
3.3.2.1. Ácido fosfórico (PAFCs)	18
3.3.2.2 Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (PEM)	18
3.3.2.3 Carbonato Fundido (MCFCs)	19
3.3.2.4 Óxido Sólido (SOFCs)	19
3.3.2.5 Alcalinas	19
3.3.2.6 Otras Celdas de Combustible	19
3.3.2.7 Avances de Equipos Industriales	20
3.3.2.8 Selección de la mejor Celda de Combustible	21
3.3.2.9 Tipo de combustibles pueden usarse en Celdas de Combustible	21
3.3.2.10 Comparación entre un auto movido por Celdas de Combustible con uno movido por baterías	22
3.3.2.11 Posición del gobierno de los Estados Unidos ¿Qué esta haciendo con respecto a esta tecnología?	22

3.3.2.12 Celdas de Combustible en el Transporte. Qué es lo que está ocurriendo en el mundo EU. Y Canadá Europa Asia	23
3.3.2.13. Costos de las celdas de combustible	28
4. OBTENCION DEL HIDROGENO	30
4.1. A partir de combustibles fósiles	30
4.2 Por biomasa	33
4.3 Por electrólisis del agua	33
4.4 Por energía nuclear	35
4.5 Producción de H ₂ a partir de energía solar	35
4.6 Otros métodos de obtención del hidrogeno	36
4.7. Composición del hidrógeno de alta pureza de una planta típica	37
5. ESTRUCTURA PARA EL MANEJO DEL HIDRÓGENO.	38
5.1 Líneas de transmisión de hidrógeno.	39
5.1.1 Consideraciones sobre materiales	39
5.1.2 Ataque de Hidrógeno (Hydrogen Attack)	40
5.1.3 Fragilización por hidrógeno	40
5.1.4 Materiales que se deben utilizar en el manejo del hidrógeno: Bajo ciertas	42
5.1.5 Transmisión de Hidrógeno por tubería	43
6. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE	44
6.1. Métodos de almacenamiento	47
6.1.1. Hidrógeno gaseoso	47
6.1.2 Hidrógeno líquido	48
6.1.3 Adsorción en carbón	48
6.1.4 Subsistema S4: transporte y distribución	48
6.2. Gasolineras de hidrógeno, (hidrogeneras). Modelos construidos en varios países.	49
6.2.1. Distribución del hidrogeno	51
6.2.1.1 Distribución a los usuarios.	51
6.2.1.2 Costos de la producción y distribución de Hidrogeno.	52
	52
7 PRINCIPALES VEHICULOS OFRECIDOS POR LA INDUSTRIA	54
7.1 Revolucionario prototipo de hidrógeno	54

8. EJEMPLO DEL USO DEL HIDROGENO EN VARIOS PAISES	58
8.1 Latinoamérica	59
8.1.1 Argentina	59
8.1.2. Un auto a hidrógeno made in Argentina	59
8.1.2.1. Distintas opciones	60
8.2 Europa	61
8.3 Estados unidos y Canadá	63
8.3.1 Chrysler	63
8.3.2 Ford Motor Corporation	64
8.3.3 General Motors	64
8.3.4 Ballard Power Systems	64
8.3.5 Energy Partners	64
8.3.6 Universidad de Georgetown	65
8.3.7 H-Power	65
8.3.8 International Fuel Cells	65
8.3.9 Plug Power, L.L.C	65
9. DESVENTAJAS DEL USO DEL HIDROGENO	67
10. VENTAJAS AMBIENTALES DEL USO DEL HIDROGENO	68
10.1 Un informe de la National Hydrogen de EEUU elige los vehículos de hidrogeno como la mejor alternativa de futuro	68
11. SEGURIDAD EN EL MANEJO DEL HIDROGENO	70
11.1 Escape y fuego	70
11.1.1 Datos de inflamabilidad y combustión	72
11.2 Físicos	72
11.3 Químicos	72
11.4 Incendios	73
11.5 Explosión	73
11.6 Derrames y fugas	73
11.7 Exposición	73
11.8 Liberación en áreas confinadas o cerradas	74
11.9 Liberación en espacios no confinados	74
11.10 Efectos de temperatura particulares del hidrogeno	75

12. PRECAUCIONES EN EL DISEÑO DE LÍNEAS DE HIDROGENO	76
12.1 Características de diseño de tuberías	76
12.1.1. Características de seguridad	76
12.1.2 Diseño de medidores	77
12.1.3 Válvulas, flanches y accesorios	78
13. CONCLUSIONES	79
14. RECOMENDACIONES	80
15. BIBLIOGRAFIA	82

LISTADO DE TABLAS

		Pág.
Tabla No.1	Propiedades del Hidrogeno puro.	5
Tabla No. 2	Identificación del hidrogeno y sus características.	6
Tabla No. 3	Características físicas y químicas.	7
Tabla No. 4	Composición del hidrogeno de alta pureza de una planta típica.	37
Tabla No.5	Resumen de las principales líneas de hidrogeno que operaban en el mundo hasta el año 2000.	45 37
Tabla No. 6	Códigos de diseño que se recomiendan para sistemas de hidrogeno gaseoso.	46
Tabla No. 7	Una comparación de las tecnologías de distribución de Hidrogeno.	52
Tabla No. 8	Descripción de un prototipo de un automóvil propuesto por la General motors.	55
Tabla No. 9	Estándares de los requerimientos para dureza de accesorios, válvulas y flanches para servicio con hidrogeno (NPS 16 y mayores).	70
Tabla No. 10	Tipos de válvulas usados en servicios con hidrogeno.	78

LISTADO DE FIGURAS

		Pág.
Figura No. 1.	Diagrama TS para hidrogeno normal (-10 < S < -1). Unidades (Kcal . kg ⁻¹ . k ⁻¹). (Michel, et al, 1959, reimpreso de PHYSYCA, Courtesy of Elsevier Scientific Publishing Company).	7
Figura No. 2.	En los motores Diesel, la bujía se reemplaza por un inyector de combustible y solo se comprime el aire durante el proceso de compresión.	13
Figura No. 3.	Bus a gas natural e hidrogeno.	14
Figura No. 4.	Electrolisis del agua.	16
Figura No. 5.	Esquema de funcionamiento de una celda de combustible.	16
Figura No. 6.	Aplicaciones futuras de las celdas de combustible.	16
Figura No. 7.	Almacenamiento de Hidrógeno por nanotubos de carbono.	16
Figura No. 8.	Esquema de una celda de combustible.	17
Figura No. 9.	Conversión de metanol a Hidrógeno con varios catalizadores.	25
Figura No. 10.	Esquema simplificado del generador de H2 y pila de combustible.	26
Figura No. 11.	Etapas habituales del proceso de obtención y purificación de hidrógeno.	31
Figura No. 12.	Electrolisis del agua aprovechando la energía solar con el satélite (rayo láser).	34
Figura No. 13.	Electrolisis del agua aprovechando la energía solar con el satélite (Por microondas).	35
Figura No. 14.	Costo relativo de transmisión de hidrogeno Vs. Otros fluidos.	38
Figura No. 15.	Costo relativo de trasmisión de energía.	39
Figura No. 16.	Factores que afectan la fragilización del acero por el Hidrógeno.	41
Figura No. 17.	Limites de operación para aceros en servicio a alta presión para transporte de hidrogeno API (941,1983) (cortesía de impresión del Instituto Americano del Petróleo).	41
Figura No. 18.	Principales hidrogeneras en el mundo.	50
Figura No. 19.	Costo del Hidrógeno como combustible comparado con el costo de la gasolina.	53
Figura No. 20.	Esquema de un automóvil que usa celdas de combustible del General Motors., su prototipo se llamo Hy-Wire.	56
Figura No. 21.	Comparación de la polución generada por el uso de los diferentes tipos de combustibles en el tiempo.	68
Figura No. 22.	Energía para la chispa de ignición de hidrogeno en aire (ANSI NFPA Standard 50 A).	71
Figura No. 23.	Efecto Joule Thomson sobre el hidrogeno (la temperatura Calculada aumenta arriba de la expansión).	75
Figura No. 24.	Sistema de medición típica en una estación que controla una Línea de bombeo de hidrogeno.	77

GLOSARIO

Gas combustible inflamable: Para propósitos de esta monografía es un gas combustible, inflamable, es un gas que quema, esto incluye gases combustibles, gas inflamable de hidrocarburos, hidrógeno y monóxido de carbono.

Líquido combustible-Inflamable: Es un líquido combustible inflamable que puede liberar vapores, capaces de encender arriba de 100 oF.

Sistemas de Detección: Es un mecanismo o colección de mecanismos, diseñados e instalados, para producir signos de alarma en la presencia de un determinado nivel de material o condición peligrosa.

Material peligroso: Un material que es un peligro físico o para la salud. Esto incluye materiales que son cancerígenos, irritantes, corrosivos, inflamables o reactivos.

Material Inerte: Un material que bajo temperatura y presión normal, no reacciona con otros materiales.

Material safety Data Sheet (MSDS Request), Hoja de datos de seguridad del material. Es una hoja de la sustancia que contiene las características y peligros, de un material específico, así como procedimientos en caso de emergencia y primeros auxilios.

Oxidante: Una sustancia que desarrolla oxígeno y así inicia o promueve combustión en otros materiales por lo tanto causan fuego por sí mismo o a través de la liberación de oxígeno o otros gases. Este grupo incluye químicos tales como peróxidos, cloratos, percloratos, nitratos y permanganatos.

Las hidrogeneras: Son las estaciones de servicio preparadas para servir hidrógeno en los coches de pila de combustible.

Una **célula de combustible** o **celda de combustible** es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos; es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería.

PSA: (Pressure swing adsorption) Sistema para la obtención del Hidrógeno de alta pureza a partir de los gases provenientes de la gasificación de la Biomasa. Mediante ciclos de absorción / desorción por cambios de presión.

RESUMEN

TITULO USO DEL HIDROGENO PARA TRANSPORTE VEHICULAR*

FERREIRA MEJIA, Pablo Emilio**

Palabras claves: hidrogeno, vehicular, ecología, transporte, combustibles, alternativos, combustión, gas, gasolina, aire.

La economía del hidrógeno es un sistema que utiliza al hidrógeno como un medio de energía en el ciclo de abastecimiento energético. El término evoca una visión del aprovechamiento energético en el futuro, que sea sustentable y amigable con el medio ambiente.

Esta visión sigue la tendencia histórica que apunta al empleo de fuentes energéticas que produzcan cada vez menos carbono como subproducto, producir menos CO₂, que produce efecto de invernadero.

El sector transporte es uno de los más contaminantes, se estima que aporta el 25%, el cual causa graves problemas de salud en las grandes ciudades, si se llegara a implantar el hidrógeno como combustible vehicular, se reduciría la contaminación ambiental a cero emisiones, por que el producto de la combustión del hidrógeno es agua y calor.

En esta monografía se hace un estudio sobre la posibilidad de utilizar el hidrógeno como combustible vehicular, se enuncian las ventajas, las desventajas, los riesgos, las posibilidades de usar el hidrógeno en motores de combustión interna y celdas de combustible, en las cuales se aprovecha la eficiencia del motor eléctrico, se presentan modelos de las estaciones de retanqueo, ofrecidos por la industria, lo mismo que los vehículos ofrecidos.

* Monografía.

** Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico – Químicas Escuela de Ingeniería de Petróleos, MUÑOZ NAVARRO, Samuel Fernando.

SUMMARY

TITLE THE USE OF HYDROGEN AS VEHICULAR FUEL*

FERREIRA MEJIA, Pablo Emilio**

Key Words: hydrogen, vehicular, ecology, transportation, fuel, alternatives, gas, gasoline, air

The economy of hydrogen is a system that uses hydrogen as a médium for energy in the cycle of energy rationing. The term evokes a vision of the efficient use of energy in the future, which would be sustainable and environmentally-friendly.

This vision follows the historical tendency which directs the use of energy sources that produce increasingly less carbon as a subproduct and by producing less CO₂, the heating effect, or global warming, is also reduced.

The transportation sector is one of the most contaminating sectors. In fact, it is estimated that it contributes to twenty-five percent of all pollution, which causes grave health problems in big cities. Yet if hydrogen were implemented as fuel for vehicles, it would reduce the pollution to zero emissions because the product of hydrogen as fuel is water and heat.

In this monograph, a study is shown over the possibility of using hydrogen as fuel for vehicles. It shows the advantages, the disadvantages, the risks, the possibilities of using hydrogen in internal-combusting motors and combustion compartments, which have the advantage of making use of the electric motor. Shown also are models of retanking stations, like gas stations, offered by the same industry that offers the same type of vehicles.

*Monograph

**Industrial University of Santander, Faculty of Physics chemistry Engineering School of Petroleum Engineering, MUÑOZ NAVARRO, Samuel Fernando

INTRODUCCIÓN

La disminución progresiva de las reservas de combustibles fósiles y los problemas de contaminación ambiental asociados a su combustión han atraído la atención de los investigadores hacia la búsqueda de vectores energéticos alternativos para automoción. Este estudio se enfocará principalmente al uso del hidrógeno en el transporte terrestre, así mismo el hidrógeno puede usarse en otras formas de transporte como aéreo, marítimo, fluvial, espacial. También tiene aplicaciones en la forma de generación eléctrica estacionaria, al utilizarlo con las celdas de combustible.

El hidrógeno es uno de estos vectores que tiene grandes ventajas ambientales. De muchas maneras el hidrógeno es una fuente de combustible ideal. Quema sin contaminación, unitariamente con oxígeno en el aire y se produce como consecuencia de la combustión calor y agua. Sin embargo el calor generado por la combustión de un metro cúbico de hidrógeno es de alrededor de 10 mil kilojulios comparado al gas natural, incluyendo solo metano se producirá aproximadamente 33 mil kilojulios por metro cúbico (ANSI/NAFA estándar 50ª, 1984). Así, para transportar un equivalente de energía mas de tres veces el volumen de hidrógeno debe ser transportado comparado al gas natural, además a causa del relativo bajo calor resultante de combustión del hidrógeno, este gas debe ser almacenado en grandes volúmenes para compararlo favorablemente con los requerimientos de gas almacenado de otros combustibles el uso del hidrógeno no será solo para transporte, es una aplicación muy importante, pero no será solo la única. El hidrógeno podrá utilizarse con cualquier aparato que consuma energía eléctrica, siempre que tengamos un suministro de hidrógeno y una pila de combustible. De hecho, llegara antes a aparatos de telefonía móvil y ordenadores portátiles, aunque en estos casos las pilas de combustible, tampoco van a mejorar tanto el rendimiento de las baterías actuales, si exceptuamos que no necesitaran de la red eléctrica para recargarse.

Guerras, Huracanes, decisiones políticas. En la extracción del petróleo juegan múltiples factores y, cada día resulta más cara su extracción. Por si fuera poco, ha empezado la cuenta regresiva para Kyoto: el gran compromiso mundial para la reducción de emisiones de CO₂.

¿Que hacer? la solución esta en todas partes el Hidrógeno, sin embargo este elemento nunca aparece solo, siempre va aliado con otros elementos como el carbono, en el gas natural, por ejemplo, o como el oxígeno en el agua. Por eso se han desarrollado pilas de combustible, una especie de membrana que separa el hidrógeno y lo utiliza para generar electricidad.

En la actualidad se estima que las reservas comprobadas de petróleo pueden durar los próximos 40 años según el informe del grupo Vd. que se realizó con el apoyo de la British Petroleum. En el caso del gas natural se calcula que existen reservas suficientes para los próximos 60 años y en cuanto al carbón la reserva del mineral alcanza para los próximos 230 años.

Según las cifras que barajan los expertos, en el 2010 comenzará la producción en serie de coches de hidrógeno. Cuando lleguen a las cadenas de montaje se abaratarán considerablemente así en el 2020.

1. IDENTIFICACION DEL HIDROGENO

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, el cual quema en aire con una llama casi invisible. A presión atmosférica, la temperatura de ignición de una mezcla hidrógeno-aire puede ser tan baja como 500° C. El límite de inflamabilidad de una mezcla aire - hidrógeno depende de la presión, temperatura y contenido de vapor de aire. A presión atmosférica, el rango de inflamabilidad es aproximadamente del 4 al 75% en volumen aire- hidrógeno. Debe identificarse con detectores especiales, por sus propiedades.

El hidrógeno es el más abundante de todos los elementos en el universo, y se cree que sigue construyéndose a partir de hidrógeno y helio. Se ha establecido que el hidrógeno hace parte de más del 90% de todos los átomos y de las $\frac{3}{4}$ partes de la masa del universo. Se ha hallado que en el sol y las otras estrellas juega un papel importante en la reacción protón-protón y el ciclo del carbón-nitrógeno, el cual es la energía de las estrellas. Se encuentra en estado libre en la atmósfera, pero solamente en una concentración de menos de 1% en volumen, es el más ligero de todos los gases y se combina con otros elementos, algunas veces explosivos, para formar compuestos.

Grandes cantidades de hidrógeno se requieren diariamente para producción de Amoniaco e hidrogenación de grasas y aceites. Se usa en grandes cantidades en la producción de metanol, en hidroalquelación, hidrocracking (Para la producción de crudos pesados), hidrotratamiento e hidrodessulfurización. Se usa como combustible de los cohetes, como combustible alternativa para la aviación y otros usos, para soldadura, para la producción de ácido clorhídrico y la reducción de menas metálicas. Se usa como energía fuente para la generación de potencia y transporte. La producción de Amoniaco y urea consume más hidrógeno que cualquier otra aplicación.

El hidrógeno es una mezcla de 75% ortho-hidrógeno (o-h₂) y 25% para-hidrógeno (p-h₂), a condiciones atmosféricas (15°C, 101.325 K Pa, el hidrógeno normal es gas orto-hidrogeno, a temperaturas por debajo de 200 oK, existe principalmente como para-hidrógeno.

La identificación del hidrógeno incluyendo sus propiedades físicas y químicas se muestra en la tabla No.1. Entre las propiedades mas importante¹³ para cálculos de diseño de líneas de Gas hidrógeno, a varias temperaturas y presiones son: Composición, densidad, volumen especifico, calor específico, conductividad, viscosidad, entalpía, entropía, coeficiente Joule Thompson y velocidad del sonido. Mientras que ninguna ecuación de estado se puede recomendar para predecir los anteriores itenes, los datos para hidrógeno gas (Puro y crudo), hay varias.

Presión (K/ps)	Temperatura (K)	Volumen Específico (m ³ /kg)	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad Térmica (W/K·m * 10 ⁻³)	Viscosidad (Kg/m.s. * 10 ⁷)	Entalpia (Kj/Kg)	Entropía (Kj/Kg-K)	Cv (Kj/Kg-K)	Cp (Kj/Kg-K)	Velocidad del sonido (m/s)	
100.0	160	6.60298	0.1514	118.66	63.00	2.297.6	62.014	8.70	12.83	987	
	180	7.42873	0.1346	128.16	66.17	2.558.3	63.549	9.09	13.22	1.040	
	200	8.25429	0.1211	136.62	69.01	2.825.9	64.959	9.40	13.53	1.090	
	220	9.07970	0.1101	144.33	71.66	3.099.2	66.261	9.65	13.78	1.139	
	240	9.90502	0.1010	151.40	74.14	3.376.8	67.470	9.85	13.97	1.186	
	260	10.73026	0.0932	157.97	76.04	3.657.9	68.595	9.99	14.12	1.232	
	280	11.55544	0.0865	164.19	79.04	3.941.5	69.645	10.10	14.23	1.276	
	300	12.37968	0.0808	170.01	81.41	4.226.9	70.629	10.18	14.31	1.319	
	350	14.44218	0.0692	183.67	87.23	4.945.8	72.846	10.30	14.43	1.423	
	400	16.50455	0.0606	196.50	92.97	5.668.5	74.777	10.35	14.48	1.520	
	160	0.66386	1.0563	119.03	63.01	2.294.2	52.474	8.71	12.93	996	
	180	0.74718	1.3384	128.53	66.22	2.556.6	54.020	9.10	13.30	1.048	
200	0.83031	1.2044	136.99	69.09	2.825.6	55.437	9.41	13.59	1.099		
220	0.91330	1.8949	144.70	71.76	3.099.9	56.744	9.66	13.83	1.147		
240	0.99620	1.0038	151.79	74.30	3.378.5	57.936	9.85	14.02	1.194		
260	1.07902	0.9268	158.37	76.77	3.660.3	59.084	10.00	14.16	1.240		
280	1.16179	0.8607	167.57	79.18	3.944.5	60.137	10.11	14.26	1.284		
300	1.2446	0.8036	170.45	81.56	4.230.7	61.124	10.19	14.33	1.327		
350	1.45108	0.6891	184.16	87.42	4.950.5	63.344	10.30	14.44	1.430		
400	1.65757	0.6033	197.06	93.20	5.673.9	65.276	10.35	14.49	1.527		
2.000	160	0.33405	2.9935	119.53	63.09	2.290.8	49.570	8.72	13.04	1.006	
	180	0.37609	2.6590	129.01	66.32	2.555.0	51.126	9.11	13.38	1.058	
	200	0.41794	2.3927	137.45	69.20	2.825.5	52.550	9.42	13.66	1.108	
	220	0.45968	2.1754	145.16	71.88	3.401.0	53.863	9.67	13.68	1.157	
	240	0.50131	1.9948	152.24	74.44	3.380.5	55.079	9.86	14.06	1.203	
	260	0.54288	1.8420	158.84	76.92	3.663.1	56.211	10.01	14.19	1.249	
	280	0.58439	1.7112	165.05	79.35	3.948.0	57.266	10.12	14.29	1.293	
	300	0.62587	1.5978	170.94	81.75	4.234.9	58.255	10.20	14.36	1.336	
	350	0.72937	1.3718	184.72	87.64	4.955.8	60.478	10.31	14.46	1.438	
	400	0.83275	1.2008	197.68	93.45	5.680.0	62.412	10.36	14.50	1.534	
	3.000	160	0.22424	4.4602	120.12	63.21	2.287.9	47.853	8.74	13.13	1.016
		180	0.25246	3.9610	129.54	66.45	2.553.9	49.419	9.13	13.46	1.068
200		0.28054	3.5646	137.95	69.35	2.825.7	50.851	9.43	13.72	1.118	
220		0.30851	3.2414	145.64	72.03	3.102.3	52.169	9.68	13.93	1.166	

Tabla No. 1. Propiedades del Hidrogeno puro

correlaciones analíticas que se suministran para soluciones con computador. Debe conocerse la composición detallada de la mezcla a ciertas condiciones,

Para aplicaciones en tubería una ecuación de estado recomendada es dada por Rohleder (1972). Una mas exacta es la de McCarthy 1979, Esta es una ecuación modificada de Benedict, Webb Rubín (MBWR). El método para la predicción de varias propiedades de Hidrógeno, incluyendo viscosidad del gas hidrogeno, la suministra McCarthy y Matveev (1984).

Las propiedades del Hidrogeno puro (útiles para diseño de gasoductos) a las siguientes condiciones, se dan en la tabla 1.

Adicionalmente se dan los siguientes puntos de equilibrio, para el hidrógeno:

Punto triple

- Temperatura= - 259.203 °C
- Presión= 7.259 kPa
- Calor Latente de fusión= 13.91 Kcal. /Kg.
Punto de ebullición a (1atm)
- Temperatura= - 252.766 °C
- Presión= 7.259 kPa
- Calor Latente = 105.5 Kcal. /Kg.

Las propiedades del hidrógeno⁴⁴ puro útil para el diseño de gasoductos, se muestra en la figura No. 1.

Masa molecular de la mezcla: 2.016

Temperatura base: 0 °C

Presión base: 101.325 kPa- abs.

Densidad a condición base: 0.08 Kg. /cm³.

6.1. Propiedades físicas y químicas

ESTADO DE EMBARQUE: GAS COMPRIMIDO	ETIQUETA: COLOR ROJO	GRADO O PUREZA TÉCNICA: PURO
Líquido (gas comprimido)	GAS INFLAMABLE: clase 2.1	Desde 99.8 a ultra puro
Clasificación: gas inflamable	Almacenamiento a temperatura ambiente	
		Recipientes y materiales: como gas en cilindro y líquido en tanques portátiles.
Atmósfera inerte: no requerida	Tipo de manguera: gas – trenzada para altas tensión	

Tabla No. 2. Identificación del hidrogeno y sus características⁴⁴

ESTADO FISICO (20 °C Y 1 atm): GAS	FLOTABILIDAD (agua: flota y hierve)	Color: Incoloro
Solubilidad (agua): 0.00015 g/ 100 m Hidrógeno 20 °C	OLOR: Inodoro. Punto de llama (flash point) ≤ - 50 °C	Limite de explosividad: 4% al 75% (en aire)
Peso molecular: 2	Densidad del vapor: 0.07 (Gas) 25 °C.	Punto de fusión – 259.2 °C
Presión de vapor 8,59 mmHg (- 241 °C)	Gravedad específica (liquido 0.07 – 250 °C)	
Punto de ebullición – 252.8°C		

Tabla No.3. Características físicas y químicas⁴⁴

Presión 7.259 KPa, calor latente de fusión 13.91 Kcal. / Kg.

Punto de ebullición a 1 atm temperatura de – 252.766 °C

Calor latente 108.5 Kcal/ Kg.

El diagrama temperatura- entropía para hidrógeno se muestra en la figura No. 1.

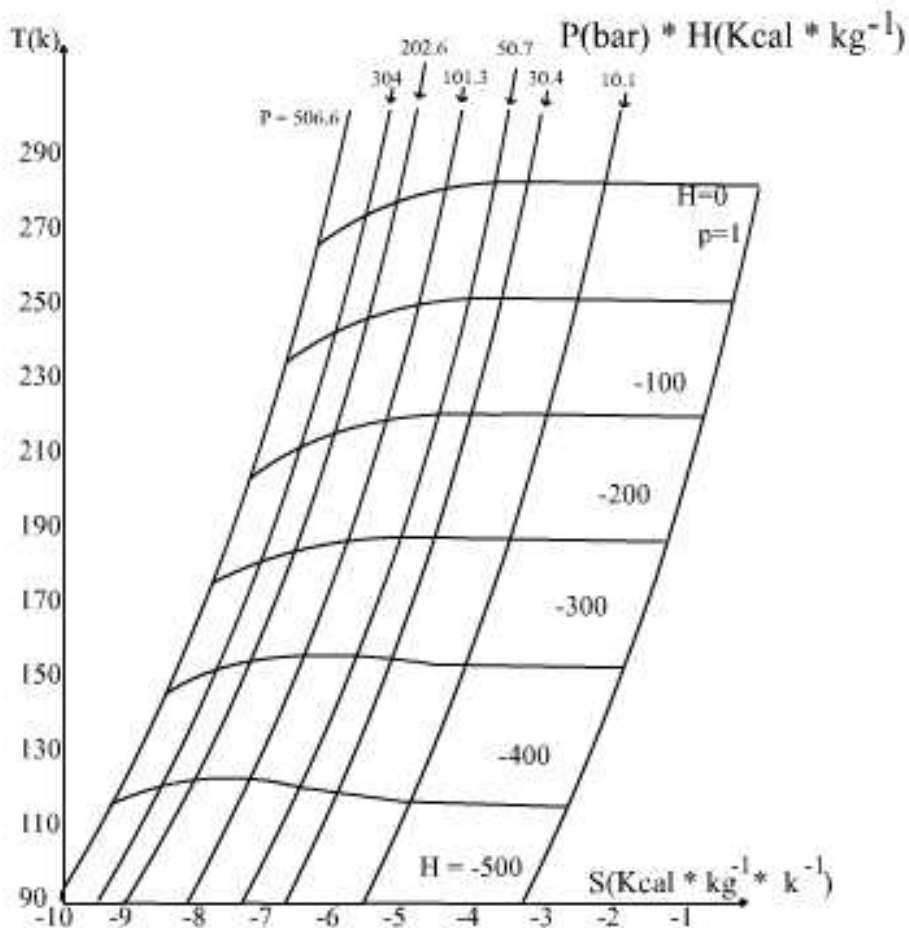


Figura No. 1. Diagrama TS para hidrogeno normal (-10 < S < -1).

Unidades (Kcal. kg⁻¹ . K⁻¹). (Michel, et al, 1959, reimpresso de PHYSICAL, Courtesy of Elsevier Scientific Publishing Company)

2. PRINCIPALES REACCIONES DE COMBUSTIÓN DEL HIDROGENO.

El hidrógeno es un combustible limpio. Cuando quema con el aire produce calor sin la producción simultánea de contaminación, el producto de combustión es solamente agua.

Se usa comercialmente en la industria química para varios procesos de reducción para amoniaco y producción de metanol, disminuir el API de crudos pesados, su uso más grande es en la producción de amonio y urea, para adelgazar crudos, se usa en hidrotratamiento para la producción de productos livianos: gasolina, combustible diesel y sustancias petroleras.

El hidrógeno comercial se usa para la generación de potencia, se observa para el futuro que será un gas de mucha demanda para sustituir los combustibles fósiles, además para adelgazar los crudos pesados para que sirvan para alimentar las refinerías. Grandes cantidades de hidrógeno se trasportan diariamente por líneas.

2.1 La química del hidrógeno

El Hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido, altamente inflamable y no es tóxico, este quema en el aire formando una llama azul pálida casi invisible. El hidrógeno es el más ligero de los gases conocidos en función a su bajo peso específico con relación al aire. Por esta razón, su manipulación requiere de cuidados especiales, para evitar accidentes. El hidrógeno es particularmente propenso a fugas debido a su baja viscosidad y a su bajo peso molecular.

El combustible debe llevarse arriba de su temperatura de ignición para iniciar la combustión. Las temperaturas de ignición mínimas aproximadas de varias sustancias del aire atmosférico son 260° C para la gasolina, 400 °C para el carbono, 580 °C para el hidrógeno, 610 °C para el monóxido de carbono y 610 °C para el metano. Además, las proporciones del combustible y del aire deben estar en un nivel adecuado para que comience la combustión. Por ejemplo el gas natural no se quemara en el aire en concentraciones menores a 5 % o mayores a 15 % aproximadamente. El hidrógeno se quema en el aire libre cuando hay concentraciones entre el 4 y 75 % de su volumen.

El gas natural explota en concentraciones de 6.3% al 14 %, mientras que el hidrógeno requiere concentraciones entre el 13% y el 64 %, por lo que el gas natural es más explosivo que el hidrógeno.

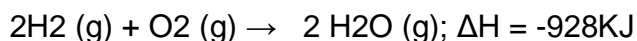
El hidrógeno es el combustible químico más sencillo. Al mezclarlo con oxígeno se produce una reacción muy oxidante altamente exotérmica con una capacidad calorífica muy superior a la combustión de materia orgánica o combustibles fósiles.

El hidrógeno es un portador de energía como la electricidad y puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes de energía tales como: el gas natural, el carbón, la biomasa, el agua, etc., así como de las aguas negras, de los residuos sólidos, llantas y desechos de petróleo.

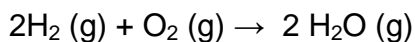
El problema radica en encontrar una fuente de electricidad barata para descomponer el agua. Una solución sería utilizar los excedentes de energía que resulta en la producción de algunas energías primarias renovables (eólica, solar e hidroelectricidad) cuando los flujos de sol o viento son intensos y que no es almacenable o cuando hallan excedentes de electricidad en la red eléctrica nacional. Se haría conectando a la red general cuando la demanda energética fuese alta y produciendo hidrógeno cuando no lo fuera.

El hidrógeno producido podría estar conectado mediante conducciones a un sistema de distribución de ámbito local, como actualmente se hace con el gas natural, para ser utilizado en múltiples usos: industrial, doméstico, etc. Igualmente podría ser transportado a grandes distancias, a través de conducciones semejantes a las que hoy día se utilizan para transportar petróleo o gas. Durante la etapa de transición se podría usar esa infraestructura y mezclar hidrógeno con gas natural, una mezcla de combustión limpia llamada **hitano**⁶¹

Esta combustión hace del H. un combustible muy interesante pues no hay productos relacionados con el efecto invernadero.



Esta reacción esta entrópicamente desfavorecida pero entálpicamente favorecida. La gran energía del enlace O-H (464kJ/mol) compensa sobradamente el alto coste que supone la ruptura del enlace H-H y hace que esta reacción sea termodinámicamente posible. Si en la reacción interviene gran cantidad de H. la reacción es explosiva. Los sopletes O_2/H_2 consiguen gracias a esta reacción temperaturas de hasta 3000 °C



El hidrógeno es un combustible limpio cuando se quema con aire y produce emisiones no contaminantes, excepto para algunas relaciones hidrógeno / aire donde la temperatura elevada de la llama produce concentraciones significativas de NOx en la combustión, además, de la combustión directa muy recientemente se ha empezado a desarrollar una tecnología basada en pilas de combustible en las que se transforma energía química almacenada en el enlace H – H de la molécula H_2 , en energía eléctrica y vapor de agua.

La posibilidad de alimentar hidrógeno gaseoso como combustible en automoción ha focalizado la atención debido a que reduce la formación de contaminantes durante la combustión: solamente se forma H_2O , y cantidades mínimas de NO_x cuando se utiliza aire como oxidante, pero no se forman óxidos de carbono.

Los ensayos realizados con un motor provisto de un sólo cilindro y utilizando bien isoctano puro o H_2 gaseoso revelaron diferencias sustanciales. La operación con H_2 gaseoso se estudió en regiones muy amplias de la relación H_2 /aire. Se observó que en condiciones de alimentación correspondientes a relaciones de equivalencia inferiores a 0.55 las emisiones de NO_x resultaron extraordinariamente bajas. A ello hay que añadir la mayor eficiencia térmica del hidrógeno que del isoctano o la gasolina debido a que la combustión del H_2 es más fácil en exceso de aire y también permite el uso de relaciones de compresión más elevadas.

En promedio, los automóviles que utilizan H_2 como combustible son 22% más eficientes que los movidos por gasolina. Tal como se ha indicado en el apartado anterior, la producción de hidrógeno a bordo del automóvil, a partir de metanol, para su consumo *in situ* es una alternativa idónea.

3. USO DEL HIDROGENO EN MOTORES, MOTORES TERMICOS, CICLO DE OTTO, CICLO DIESEL.

Un modo de utilizar el hidrógeno directamente como combustible es usarlo en un motor clásico de combustión interna. En este motor se transforma la energía química del combustible en trabajo mecánico que mueve las ruedas. Está preparado para funcionar tanto con gasolina como con hidrógeno, pero la autonomía con este gas es mucho menor: por el momento, 60 kilómetros. El límite lo da la capacidad de almacenamiento del gas a presión en un tanque resistente a alta presión ubicado en el baúl.

3.1. Uso directo en motores

3.1.1. El ciclo de Otto

Es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes de encendido de chispa. Estas reciben el nombre de máquinas de combustión interna de cuatro tiempos.

En los motores de encendido de chispa conocido como motores de gasolina, la mezcla de aire combustible se comprime hasta una temperatura inferior a la temperatura de auto encendido del combustible, y el proceso de combustión se inicia al encender una bujía.

Para que un motor trabaje con hidrógeno no se requiere muchas modificaciones en el motor, los vehículos movidos por hidrógeno ruedan por las ciudades y a su rastro solo dejan vapor de agua.

Se han hecho estudios sobre un motor de Hidrógeno de la Ford Motor Co., Le están perfeccionando el funcionamiento, e identificando las causas primarias de las anomalías en la combustión, Estos problemas son más pronunciados a velocidades altas y con cargas elevadas. Los investigadores toman 50 mediciones del funcionamiento, durante cada prueba del motor. El motor de combustión interna de hidrógeno se parece mucho a los motores a gasolina, exceptuando que el combustible es gaseoso en lugar de líquido.

Un automóvil de hidrógeno no necesita del tratamiento a los gases de escape, cuando opera correctamente. La alta velocidad de combustión del hidrógeno ofrece la oportunidad de aumentar el rendimiento de potencia sin incrementar el tamaño del motor. Usando inyección directa de hidrógeno, la densidad de potencia es aproximadamente 117% superior con respecto a un motor de gasolina equivalente. Y los motores de combustión interna de hidrógeno, pueden arrancar fácilmente aun con muy bajas temperaturas ambiente. Sin embargo a diferencia de los combustibles líquidos, el hidrógeno tiene una baja densidad de energía por

unidad de volumen, lo que significa que el vehículo, estará un poco limitado en su autonomía en comparación con los actuales. El aumento significativo de la eficiencia ayudará a mitigar esta desventaja.

Un ejemplo de aplicación de hidrógeno en motores de combustión directa en un motor producido por Mazda. Mazda desarrolla un motor rotativo propulsado con hidrógeno que lanzará en 2008 y cuya producción costará una fracción de la de los vehículos actuales de ese sistema fabricados por Toyota y Honda, informó un diario económico local³²

El prototipo del nuevo motor, que tendrá una potencia de unos 150 caballos y se instalará en un vehículo similar al deportivo RX-8 de Mazda, será presentado en el 'Tokio Motor Show' de octubre próximo, dice el periódico 'Nihon Keizai'.

Debido a que el futuro vehículo de Mazda podrá usar componentes de los modelos existentes de gasolina, su costo de producción rondará los 3 millones de yenes (unos 25.000 dólares), frente a los 200 y 300 millones de yenes (1,6 y 2,5 millones de dólares) que demanda la fabricación de los actuales vehículos de hidrógeno de las también japonesas Toyota y Honda, agrega el diario.

Según la información, aunque los motores rotativos impulsados con gasolina son menos eficaces en lo que al consumo se refiere, al funcionar con hidrógeno ofrecen mejor rendimiento y se espera que el nuevo motor de Mazda recorra 200 kilómetros con un solo tanque de combustible.

El actual motor rotativo de gasolina de Mazda, dotado con un sistema que elimina el solapamiento entre los puertos de admisión y escape, fue elegido el 'Motor Internacional del Año 2003' en la feria Engine Expo 2003 de Stuttgart (Alemania), en junio pasado³²

3.1.2. El ciclo diesel

El ciclo DIESEL, es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes, la diferencia principal con los motores que trabajan con gasolina que es el Ciclo Otto, está en el método de inicio de la combustión, en los motores EC (también conocidos como motores DIESEL) el aire se comprime hasta una temperatura superior a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de este aire caliente. En consecuencia, la bujía y el carburador son sustituidos por un inyector de combustible en los motores DIESEL, el diagrama se observa en la figura No 2.

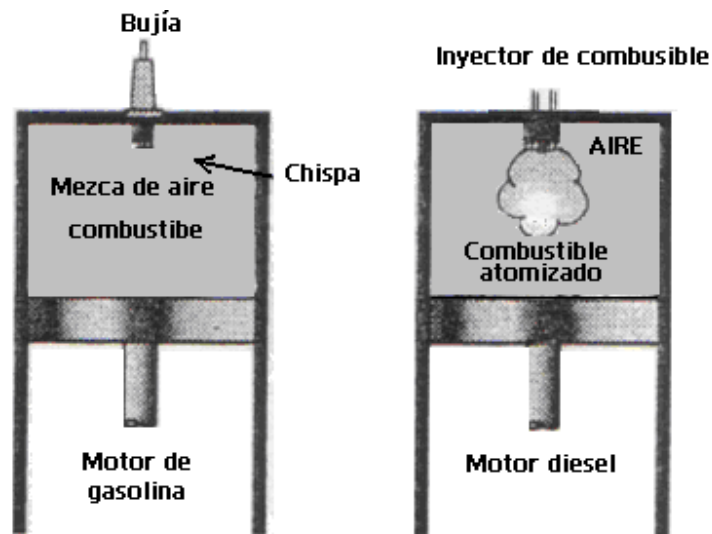


Figura No. 2. En los motores Diesel, la bujía se reemplaza por un inyector de combustible y solo se comprime el aire durante el proceso de compresión 35 y 36.

En los motores de gasolina una mezcla de aire combustible se comprime durante el tiempo de compresión, y las relaciones de compresión están limitadas por el comienzo de autoencendido o golpeteo del motor.

En los motores DIESEL, solo el aire se comprime durante el tiempo de compresión con lo cual se elimina la posibilidad de autoencendido, por lo tanto los motores DIESEL son diseñados para operar a relaciones de compresión mucho más altas, por lo común entre 12 y 24. Evitar el problema del autoencendido tiene otro beneficio muchos de los requerimientos impuestos a la gasolina se eliminan en este caso y los combustibles menos refinados y en consecuencia menos costosos pueden utilizarse en los motores DIESEL.

En el ciclo DIESEL, como en el ciclo de Otto se ejecuta en un dispositivo de cilindro embolo, que forma un sistema cerrado. La eficiencia en un motor DIESEL es mayor que en un motor de encendido de chispa (gasolina) porque los DIESEL operan con relaciones de compresión mucho más altas.

Los motores DIESEL queman el combustible de manera más completa, porque suelen operar a menores revoluciones por minuto que los motores de encendido de chispa las eficiencias térmicas en los motores DIESEL varían aproximadamente entre un 35% a 40%.

El motor DIESEL es el indicado para dispositivos que requieren grandes cantidades de potencia como los motores de las locomotoras, las unidades de generación de electricidad grandes barcos y pesados camiones. Pero la desventaja del motor DIESEL son las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Las emisiones en los gases de escape de los motores tales como hidrocarburos no quemados tales como (HC, CO, NOx) son los responsables de la

contaminación. La eficiencia de un motor a gasolina esta de un 12% a 15% y esta se debe mejorar para que se reduzcan las emisiones de CO₂, con dispositivos catalíticos se elimina del 90% al 95% las emisiones de HC, CO, NO_x. Con la tecnología del hidrogeno se eliminan todos los problemas de contaminación ambiental, porque la combustión solo producirá vapor de agua.

Parece ser que la mejor aplicación del hidrogeno como combustible es por medio de celdas de combustible porque en un motor de combustión interna la mayor parte de la energía generada en la combustión se pierde como calor que se cede al medio ambiente y una fracción muy pequeña de esta energía se convierte en energía mecánica útil.

Para utilizar el hidrogeno en transporte automotor pesado, en reemplazo del Diesel se plantean varias alternativas: Modificar los motores para que consuman como combustible GNC e Hidrógeno, mezcla llamada **HITANE₆₁**. Un ejemplo de esta conversión para vehículos pesados se da en el siguiente ejemplo ver figura No. 3:

3.2. Ejemplo de la conversión de vehículos diesel a gas natural de hidrogeno



Figura No 3. Bus a gas natural e hidrogeno⁵⁹

Natural Gas conjuntamente con uno de los mayores fabricantes de autobuses del mundo, Cummins Westport de Estados Unidos, firmaron un acuerdo para desarrollar una investigación de campo destinada a conocer las ventajas de la mezcla GNV e hidrógeno como combustible para autobuses del servicio público. El acuerdo, donde participará también el laboratorio del Department Of. Energy's National Renewable Energy (SCAQMD), tendrá un costo de US\$ 476.000, tiene como principal objetivo verificar su una mezcla de gas natural vehicular e hidrogeno puede ser utilizada bajo condiciones de trabajo cotidianas del transporte público, mientras se reduce la contaminación, las emisiones de gases de invernadero y la dependencia de combustibles fósiles y se prepara el terreno para el desarrollo de la infraestructura necesaria de las futuras celdas de

combustible para vehículos, aseguró Barry Wallerstein, funcionario oficial del (SCAQMD).

La prueba de campo del autobús bautizado como ThunderPower comenzará a finales de mes, luego que Cummins Westport complete sus pruebas sobre motores. SunLine Services Group espera utilizar igualmente dos autobuses de transporte colectivo equipados con máquina B Gas Plus en el servicio público utilizando la mezcla GNV-Hidrógeno conjuntamente con dos unidades adicionales operadas sólo a gas natural. El programa de pruebas en carretera tendrá una duración de tres meses o 24 mil millas. En caso de que la prueba de manejo alcance el éxito, SunLine Services Group podría convertir toda su flota a la mezcla GNV-Hidrógeno o HGNC como ya comienza a conocerse. En noviembre último SunLine Transit Agency comenzó a trabajar con las pruebas.

3.3 Uso del hidrógeno en celdas de combustión

3.3.1 Definición de una celda de combustible

Las celdas de combustible ver figura No 8 son equipos que a través de reacciones electroquímicas, la reducción del oxígeno y la oxidación del combustible (Generalmente Hidrógeno), transforman la energía química de estos elementos en eléctrica y calorífica. El combustible al fluir en la celda a través del electrodo negativo, y mediante un catalizador de platino que propicia la separación del Hidrogeno en iones, que son transportados.

En principio, una celda de combustible opera como una batería. Genera electricidad, combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión. A diferencia de las baterías, una celda de combustible no se agota ni requiere recarga. Producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de combustible. El único subproducto que se genera es agua 100% pura. Una celda de combustible consiste en dos electrodos separados por un electrolito. Oxígeno pasa sobre un electrodo e hidrógeno sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado pierde un electrón y al ocurrir esto ambos (hidrógeno y electrón) toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor. Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y calor útil. Para generar cantidades utilizables de corriente las celdas de combustibles se amontonan en un emparedado de varias capas.

Las celdas de combustible son una familia de tecnologías que usan diferentes electrolitos y que operan a diferentes temperaturas. Cada miembro de esa familia 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. La figura No 4 representa el almacenamiento de la energía solar para producir hidrógeno, almacenar esa energía y utilizarla para transporte, La figura No 5 es la

representación³⁶ del funcionamiento de una celda de combustible, La figura No 6, es la utilización futura de una celda de combustible, para teléfonos móviles, cámaras de video, utilizando la técnica de la Nanotecnología. La figura No 6, es la representación futura de las celdas de combustible en dispositivos portátiles, La figura No 7 representa los estudios que se hacen sobre el tema del almacenamiento de hidrógeno, utilizando la nanotecnología³⁴.

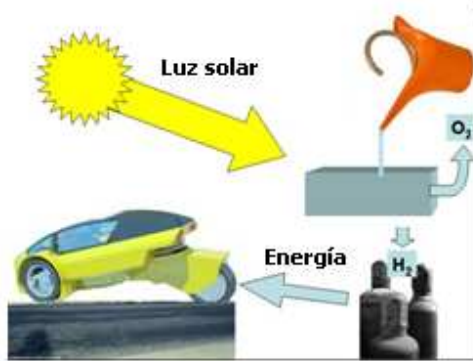


Figura No. 4. Electrólisis del agua³⁴.

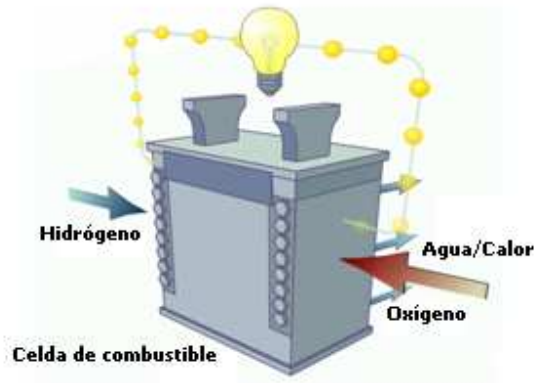


Figura No. 5. Esquema de funcionamiento de una celda de combustible



Figura No. 6. Aplicaciones futuras de las celdas De combustible³⁴

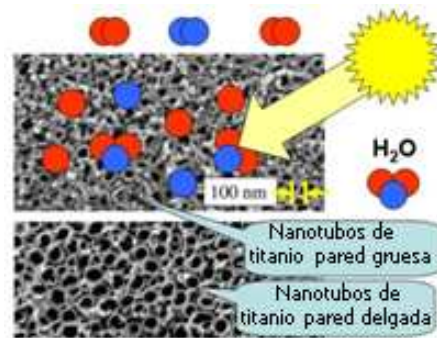


Figura No. 7. Almacenamiento de Hidrógeno por nanotubos de carbono³⁴

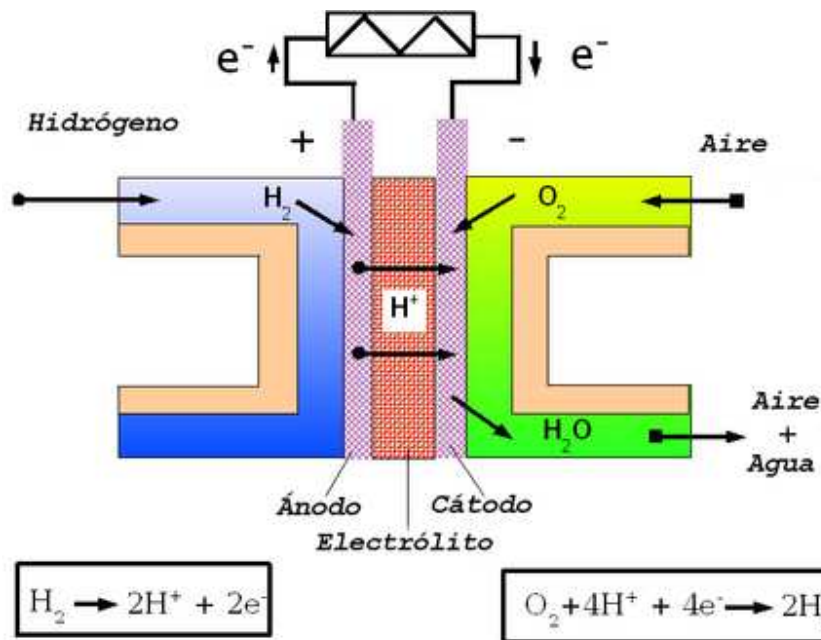


Figura No. 8. Esquema de una celda de combustible³⁶

Los reactivos típicos utilizados en una celda de combustible son Hidrógeno en el lado de ánodo y oxígeno en el lado del cátodo (si se trata de una celda de Hidrógeno) por otra parte las baterías convencionales consumen reactivos sólidos y una vez que se han agotado deben ser eliminadas o recargadas con electricidad. Generalmente los reactivos “fluyen hacia adentro” y los productos de la reacción “fluyen hacia fuera”. La operación a lo largo virtualmente continua es factible mientras se mantengan estos flujos, en el ejemplo típico de una célula de membrana intercambiadora de protones (o electrolito polimérico) Hidrógeno/Oxígeno de una celda de combustible (PEMFC, en inglés: proto Exchange membrane fuel cell) una membrana polimérica conductora de protones (electrolito), separa el lado del ánodo del lado del cátodo.

En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega al ánodo catalizador se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo produciendo energía ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y los protones para formar el agua. En este ejemplo el único residuo es vapor de agua o agua líquida. Además de hidrógeno puro también se tiene el hidrógeno contenido de otras moléculas de combustible incluyendo el Diesel, metanol (DMFC) “Direct metanol fuel cell” y los hidruros químicos, el residuo producido por este tipo de combustible a demás de agua es dióxido de carbono entre otros.

Voltaje: Una celda de combustible típica produce aproximadamente 0.8 voltios; para crear suficiente voltaje las celdas se agrupan combinándolas en serie y en paralelo “Fuel cell stack” (pila de células de combustible). El número de celdas que se usan es generalmente superior a 45 y varía según el diseño.

Materiales: los materiales usados en celdas de combustible varían según el tipo. Las placas del electrodo / bipolar se hacen generalmente de nanotubos de metal de Níquel o de carbón y están cubiertas por un catalizador (como el platino o el paladio) para conseguir una eficacia más alta. El electrolito puede ser una cerámica o bien una membrana.

3.3.2 Tipos de celdas de combustible

3.3.2.1. Ácido fosfórico (PAFCs) “phosphoric – acid fuel cellphosphoric acid fuel cell”.

El voltaje es superior a 10 Mw., temperatura de trabajo 200° C, eficiencia eléctrica de la celda 55% y del sistema 40%.

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, hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una Terminal aeroportuaria. Las Celdas de Combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia – y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado 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 400 °F. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras.⁶⁷ <http://www.hydrogenllc.net/hydrov2/>

3.3.2.2 Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

El voltaje es de un rango de 0.1 a 500 Kw, temperatura de trabajo 70° C a 200° C, eficiencia eléctrica de la celda del 50% al 70% y del sistema del 30% al 40%.

Estas celdas operan a relativamente bajas temperaturas (unos 200 °F), 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 vídeo cámaras". Tiene aplicaciones en la aviación, como es el caso del primer avión tripulado que se probó funcionando con pila de combustible, ver refe⁷⁹.

3.3.2.3 Carbonato Fundido (MCFCs) “Molten carbonate fuel cell”

El voltaje es de un rango de 100 MW., temperatura de trabajo 650° C, eficiencia eléctrica de la celda del 55% y del sistema del 47%. Las Celdas de Combustible de Carbonato Fundido. Prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir. Combustibles base carbón. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 1,200 °F. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California en 1996.

3.3.2.4 Óxido Sólido (SOFCs) “Solid oxide fuel cell”

El voltaje es superior a 100 MW., temperatura de trabajo 650° C, eficiencia eléctrica de la celda del 55% y del sistema del 47%.

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 motores de vehículos. 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 1,800 grados F. 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 semejando la parte superior de una lata de sopa.

3.3.2.5 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.

3.3.2.6 Otras Celdas de Combustible

Nuevos miembros de la familia de Celdas de Combustible, tales como las de **Metanol Directo**, (DMFC) “Direct metanol fuel cell” pueden surgir como resultado del presente trabajo llevado a cabo en laboratorios privados y gubernamentales.

El voltaje es de pocos mW a 100 KW., temperatura de trabajo 90° C a 120 °C, eficiencia eléctrica de la celda del 20% al 30%. El electrolito es una membrana polimérica.

La densidad de energía de metanol que es la cantidad de energía contenida en un volumen de metanol es de una magnitud más grande que cualquier hidrogeno comprimido. La corriente de la DMFCS es limitada en la potencia que ella puede producir pero todavía almacena una alta energía en un pequeño espacio. Esto significa que ella puede producir una pequeña cantidad de potencia sobre un largo periodo de tiempo. Esto hace que no sea aconsejable para la potencia de vehículos, pero es ideal para mecanismos tales como teléfonos móviles, celulares o computadores portátiles.

En junio del 2004 la compañía DELPHI, alcanzo una densidad de potencia de alrededor de 0.6 w/cm², demostró su SOSC 3ERA generación SECA, utilizando gas combustible extraído del carbón. Esta es la segunda prueba en demostrar el uso exitoso del gas del carbón para demostrar el uso exitoso del gas de carbono para producir potencia limpia y eficiente con tecnología de celdas de combustible SECA.

Los mayores fabricantes de camiones y automóviles están colaborando con grupos industriales para perseguir crecimiento en aplicaciones de unidades auxiliares de potencia (auxiliary power unit- APU). BMW tiene un arreglo con DELPHI para colocar una APU, compacta de celda de combustible en sus camiones para el 2007. El interés de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), en tecnología SECA, ha conducido a una colaboración extensa para utilizar celdas de combustible como APUS, para aviones y eventualmente una propulsión en el Programa de Potencia de Aviones limpia de Nueva Generación (NEXCAP).

3.3.2.7 Avances de Equipos Industriales

SECA tiene seis equipos industriales trabajando sobre diseños y manufactura que puedan ser producidos a escala masiva, a costos que sean 10 veces menores que los costos actuales. Sobre todo, el programa SECA está progresando extremadamente bien hacia la prueba de prototipos Fase I, iniciados en el año fiscal 2005. Todos los equipos industriales tuvieron avances excepcionales en el 2004 al completar diseños conceptuales y configuraciones de conjuntos ó stacks de prueba, mostrando mayores densidades de potencia y utilización de combustible, diseños de referencia de sistemas de control y reformadores que demuestran salida sostenida y capacidad cíclica térmica.

- En mayo 2004, Acumentrics probó una unidad en campo alimentada con Propano que incluye avances desarrollados dentro del programa SECA.

- Avances de Siemens Westinghouse condujeron hacia una capa electrolítica más delgada y más conductora, que podría reducir la temperatura, al mismo tiempo que podría incrementar la potencia para una mayor vida útil y un menor costo. El equipo ha alcanzado más de $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ con sus diseños de alta densidad de potencia, casi el doble de diseños tubulares.
- General Electric alcanzó una densidad de potencia de más de $0.4\text{ W}/\text{cm}^2$ a 0.7 V , manteniendo una utilización de combustible del 88 por ciento. Esto es más de $0.6\text{GW}/\text{cm}^2$ arriba de los requerimientos de la Fase I.
- El equipo Cummins-SOFCo demostró capacidad sostenida de salida y de ciclo térmico de su proceso de reformación. El reformador Cummins operó durante 2,900 horas en estado estacionario y en operación cíclica, cumpliendo con todos los requerimientos de la Fase I. SOFCo alcanzó 2,000 horas de operación estacionaria ininterrumpida, mientras alimentaba a una unidad de 1-kW SECA con gas natural.
- Al inicio del 2005, FuelCell Energy combinó sus operaciones de SOFC Canadienses, anteriormente conocidas como Global Thermoelectric Corporation, en su subcontratista líder de desarrollo de productos, Versa Power Systems.
- Delhi alcanzó una densidad de potencia de alrededor de $0.6\text{ W}/\text{cm}^2$ En Julio 2004, la compañía demostró su SOFC 3era Generación SECA utilizando gas combustible extraído del carbón. Esta es la segunda prueba en demostrar el uso exitoso de gas de carbón para producir potencia limpia y eficiente con tecnología de celdas de combustible SECA.

3.3.2.8 Selección de la mejor Celda de Combustible

De acuerdo a un reciente estudio realizado por Arthur D. Little Inc., no hay un solo "ganador" que eclipse a otras celdas de combustible. Este resultado es esencialmente debido a que el mercado para celdas de combustible es muy variado yendo de estaciones generadoras de gran tamaño hasta automóviles. Cada segmento de este mercado puede ser satisfecho con una variada mezcla de tecnologías.

3.3.2.9 Tipo de combustibles pueden usarse en Celdas de Combustible

Las celdas de combustible permiten promover una diversidad de energía y una transición hacia fuentes de energía renovables. Así, una variedad de distintos combustibles pueden ser usados en éstas, combustibles tales como hidrógeno, metanol, etanol, gas natural así como gas licuado (LPG). La energía también podría ser provista a partir de biomasa, sistemas eólicos ó bien solares.

3.3.2.10 Comparación entre un auto movido por Celdas de Combustible con uno movido por baterías

Autos movidos a partir de celdas de combustibles se encuentran en una etapa temprana de desarrollo comparados con autos eléctricos movidos con baterías pero son considerados como una alternativa muy atractiva. Los primeros ofrecen las ventajas de un auto eléctrico provisto de baterías, pero pueden ser reabastecidos de combustible muy rápidamente y su rango de alcance es mayor que aquellos con baterías.

Adicionalmente, autos con celdas de combustible producirían menos emisiones de gases que producen efecto invernadero (considerando las emisiones asociadas con la recuperación de la fuente primaria). Daimler-Benz ha concluido que los problemas técnicos fundamentales asociados al uso de celdas de combustible en autos pueden ser resueltos. Un estudio reciente de General Motors hizo notar que motores de autos con celdas de combustible podrían ser construidos casi por mismo precio que los de combustión interna.

3.3.2.11 Posición del gobierno de los Estados Unidos ¿Qué está haciendo con respecto a esta tecnología?

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE) gasta unos \$50 millones de U.S. dólares en investigación en celdas de combustible de carbonato fundido y del tipo de óxido sólido para aplicaciones de tipo estacionario. También el DOE gasta cerca de \$20 millones de US dólares en aplicaciones de celdas de combustible en transporte.

El departamento de la Defensa de los EU. Está gastando alrededor de \$24 millones de US dólares para comprar una planta generadora a base de celdas de combustible para demostración, la cual proveerá calor y energía a algunas bases militares seleccionadas a lo largo de ese país. La primera de estas plantas fue instalada recientemente en la base de la Fuerza Aérea Vandenberg en California.

Vehículos provistos de celdas de combustible podrían transportar tropas americanas en los campos de batalla en un futuro y podrían servir como fuente vital de energía auxiliar en combate. Esto se debe a que las celdas de combustible son silenciosas, flexibles y operan a bajas temperaturas haciéndolas ideales para su uso en vehículos no-detectables. Las celdas de combustible están también siendo desarrolladas para submarinos, barcos y una gran variedad de otros usos militares.

El Departamento del Transporte de los EU. Mantiene un pequeño programa de investigación en celdas de combustible gastando \$5 millones de U.S.D. en 1996 para desarrollar autobuses con celdas de combustible.

3.3.2.12 Celdas de Combustible en el Transporte. Qué es lo que está ocurriendo en el mundo EU. Y Canadá Europa Asia

Las Celdas de Combustible podrían reemplazar a los motores de combustión interna en automóviles, autobuses, camiones y aún embarcaciones y locomotoras. Autobuses y autos trabajando con celdas de combustibles se encuentran ya funcionando y más aún están en camino de hacer lo mismo. Las Celdas de Combustible podrían dar la potencia del superauto del mañana – más limpios, silenciosos y más eficientes que los autos a gasolina y con un mayor rango y menores tiempos de recarga de combustible que los autos eléctricos movidos por baterías. Los beneficios serían extraordinarios en términos de seguridad de energía, aire limpio y la creación de cientos de miles de empleos.

Cientos de compañías en todo el mundo están trabajando en celdas de combustible. Las bases son fuertes. El país que desarrolle tecnología para Celdas de Combustible tendrá la llave para la siguiente generación de producción de energía. Los de celda de combustible usan hidrógeno: la celda transforma la energía química almacenada en este gas en electricidad. Así se logra tanta autonomía como en los autos comunes.

Consientes del impacto sobre el medio ambiente de los motores de combustión interna, los fabricantes de automóviles (Toyota, Mercedes, Volkswagen, Volvo, Fiat etc.), vienen concentrando esfuerzos desde 1996 con el objetivo de desarrollar automóviles eléctricos o híbridos basados en celdas de combustible. En 1997, Daimler – Benz y Toyota han presentado sus primeros automóviles eléctricos, en que la energía eléctrica se produce en una pila de polímero sólido (SPFC) Solipolymer fuel cell.

El prototipo de Daimler-Benz (Mercedes Clase A) está alimentado completamente por una pila SPFC, mientras que el de Toyota (Rav 4) usa un sistema híbrido pila de combustible/batería.

Ejemplo de generación de Hidrógeno a bordo del vehículo a partir del Metanol: En ambos casos, se utiliza metanol líquido, como fuente de hidrógeno, que debe procesarse por vía catalítica a bordo del propio automóvil para generar el hidrógeno gaseoso que consume la pila de combustible.

El concepto de generar hidrógeno a bordo del propio automóvil durante la conducción parece la respuesta idónea al problema de disponer hidrógeno gaseoso de forma cómoda, económica y segura. Sin embargo, la elección del combustible generador de hidrógeno aún está sujeta a debate. Algunas compañías, como las mencionadas Daimler-Benz y Toyota, han optado por el metanol. Ello se debe a que el metanol es el tercer producto químico de partida, después del etileno y el amoníaco, con una producción superior a los 25 MTm, bastante superior a la demanda actual.

Otras compañías consideran la propia gasolina o el Diesel como fuentes idóneas de hidrógeno. Así, Arthur D. Little ha construido recientemente una pila de combustible compacta, alimentada por el hidrógeno generado en el proceso de oxidación parcial de la gasolina con aire. Varias tecnologías de procesado de combustible están diseñadas y basadas en la oxidación parcial y en el reformado de metanol con vapor de agua.

La posibilidad de alimentar hidrógeno gaseoso como combustible en automoción ha focalizado la atención debido a que reduce la formación de contaminantes durante la combustión: solamente se forma H₂O, y cantidades mínimas de NO_x cuando se utiliza aire como oxidante, pero no se forman óxidos de carbono.

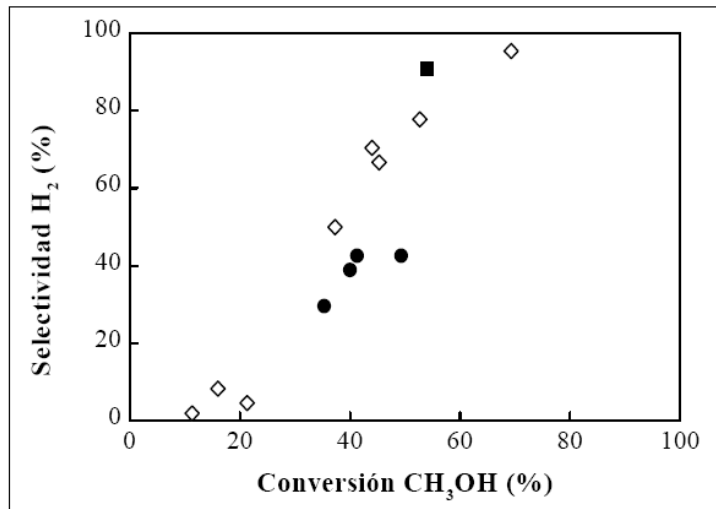
Los ensayos realizados con un motor provisto de un sólo cilindro y utilizando bien isooctano puro o H₂ gaseoso revelaron diferencias sustanciales [5]. La operación con H₂ gaseoso se estudió en regiones muy amplias de la relación H₂ /aire. Se observó que en condiciones de alimentación correspondientes a relaciones de equivalencia inferiores a 0.55 las emisiones de NO_x resultaron extraordinariamente bajas.

A ello hay que añadir la mayor eficiencia térmica del hidrógeno que del isooctano o la gasolina debido a que la combustión del H₂ es más fácil en exceso de aire y también permite el uso de relaciones de compresión más elevadas. En promedio, los automóviles que utilizan H₂ como combustible son 22% más eficientes que los movidos por gasolina. Tal como se ha indicado en el apartado anterior, la producción de hidrógeno a bordo del automóvil, a partir de metanol, para su consumo *in situ* es una alternativa.

El hidrógeno puede obtenerse por tres vías catalíticas diferentes a partir del metanol: (i) oxidación parcial con oxígeno o aire (Ec.1); (i.e.), reformado con vapor de agua (Ec. 2); y (i.e.), descomposición (Ec. 3):



Selectividad a H₂ en función de la conversión de CH₃OH sobre varios catalizadores: 1% Pd/ZnO;() 1% Pd/ZrO₂. Para comparación se incluye un catalizador comercial Cu/ZnO de síntesis de metanol. De estas tres alternativas, la oxidación parcial (Ec. 1) ofrece algunas ventajas claras con respecto al reformado con vapor en cuanto que utiliza aire en vez de vapor y es una reacción exotérmica por lo que no requiere un aporte de energía externa durante la operación.



Selectividad a H₂ en función de la conversión de CH₃OH sobre varios catalizadores: (◊) 1% Pd/ZnO; (●) 1% Pd/ZrO₂. Para comparación se incluye un catalizador comercial Cu/ZnO de síntesis de metanol (■)

Figura No. 9. Conversión de metanol a Hidrógeno con varios catalizadores

Para tener una idea del estado y del alcance de estas tecnologías. En la Fig. No. 9 se representa la selectividad a H₂ que se alcanza sobre diferentes catalizadores que operan con una relación O₂ /CH₃ OH = 0.3 en la alimentación⁶³. Se observa que la selectividad a H₂ aumenta conforme lo hace la conversión de metanol, alcanzando selectividad prácticamente total para conversiones próximas al 80%.

Además, para un determinado catalizador la selectividad a CO disminuye conforme aumenta la conversión. Resulta evidente que la incidencia de la catálisis debe estar en la dirección del desarrollo de sistemas y configuración de reactor que mejoren la conversión, al tiempo que rebajen los niveles de CO. La oxidación parcial de metanol (Ec. 1) tiene una eficiencia térmica próxima a 82.5% debido a que se trata de un proceso exotérmico. Esta desventaja puede salvarse mediante la combinación de los procesos de reformado con vapor (endotérmico) y oxidación parcial (exotérmico) con un balance energético prácticamente nulo y óptima eficiencia.

Este proceso puede llevarse a cabo tanto en ausencia como en presencia de catalizadores. El proceso no catalítico requiere temperaturas muy elevadas para conseguir las conversiones y distribuciones de productos que predice el equilibrio termodinámico, en cambio los catalizadores realizan la reacción a temperaturas mucho más bajas.

Los metales del Grupo 8, tales como Cu, Ni, Pd y Pt han resultado activos en la transformación del metanol, aunque el Pt y Pd son menos selectivos en el reformado con vapor, y producen principalmente los productos de descomposición H₂ y CO (Ec. 3).

En la Figura No. 10. Se ilustra, mediante un esquema sencillo, el ensamblaje de los procesos individuales que integran un dispositivo completo de producción de energía eléctrica para accionar el motor del automóvil. El metanol se transforma en una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono en un primer reactor mediante un proceso catalítico. La mezcla resultante contiene pequeñas cantidades de monóxido de carbono, resultantes no solamente de la contribución de la reacción de descomposición (Ec. 3), sino también de la reacción inversa del gas de agua.

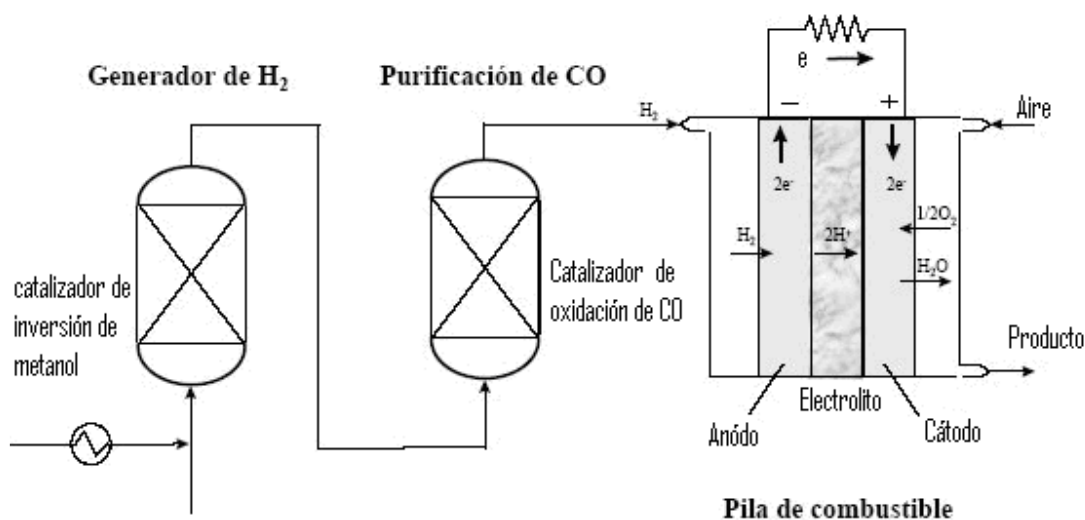
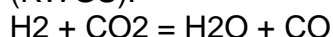


Figura No.10. Esquema simplificado del generador de H₂ y pila de combustible⁶²

(RWGS):



(4)

El CO producido, aún en cantidades muy pequeñas, se debe reducir hasta niveles de ppm en la corriente gaseosa que alimenta la pila puesto que el CO es un veneno de la función metálica que actúa como electro catalizador en ánodo de la pila. Las alternativas propuestas para reducir, o eliminar, el CO de esta corriente se basan tanto en procesos químicos como físicos. Dentro de estas alternativas, la oxidación catalítica selectiva de CO parece muy atractiva, sin embargo se debe resaltar el hecho de que la oxidación del CO se debe producir sin que el agente oxidante (aire) logre la oxidación del H₂, principal componente de la corriente gaseosa que alimenta la pila.

El proceso de oxidación parcial de metanol con oxígeno o aire se viene estudiando con intensidad en los últimos años con el objetivo de implantar esta tecnología en los automóviles eléctricos, aunque todavía se requieren esfuerzos importantes.

En primer lugar, se deben desarrollar sistemas catalíticos que operen a temperaturas suficientemente bajas, al mismo tiempo que sean altamente selectivos hacia H_2 y CO_2 .

Otra opción que debe explorarse es la utilización de etanol en lugar de metanol como fuente de hidrógeno. No hay duda que la molécula C_2H_5OH introduce una complejidad mayor que la de metanol en el proceso de reformado. La reacción de oxidación parcial viene complicada por la posibilidad de formación de productos intermedios oxidados, tales como acetaldehído, ácido acético, formaldehído, ácido fórmico y dimetiléter, compuestos que, por otra parte, raramente se detectan en la oxidación parcial de metanol.

Es en este punto donde la contribución de la catálisis e ingeniería deben aportar respuestas efectivas. La optimización de la relación O_2 /etanol y presencia de vapor de agua deben desempeñar un papel esencial en la eliminación de los compuestos de oxidación parcial. Se están consiguiendo resultados satisfactorios con el uso de aleaciones de metales de transición (PdPt, PdNi) que son capaces de catalizar la oxidación selectiva de CO a CO_2 , pero al mismo tiempo no oxidan de forma significativa el H_2 a H_2O . No hay duda que los desarrollos con mayor incidencia sobre esta tecnología deben venir con la incorporación de membranas porosas.

La separación del H_2 de la corriente gaseosa que llega del reformador de metanol mediante una membrana, diseñada de forma específica con un tamaño de poro tan ajustado como para dejar pasar a través de la red porosa solamente las moléculas de H_2 pero no las de CO_2 y CO , parece una alternativa simple y elegante. No obstante, la fabricación de membranas inorgánicas y poliméricas con una porosidad muy bien definida, con dimensiones de poro de unas décimas de nm y distribución de tamaños de poro muy estrecha, es uno de los retos planteados.

La Mercedes Benz ha aplicado todos estos procesos y ha desarrollado una pila de combustible llamada Necar la cuál emplea el metanol como fuente de hidrógeno, este desarrolla 75 KW (102 CV) y alcanza 450 Km de autonomía.

El metanol puede obtenerse fácilmente a través del gas natural, del carbón o a través de la descomposición de materia orgánica, por eso las emisiones de CO_2 se consideran mucho más limpias.

La nueva tecnología esbozada aquí de utilización del hidrógeno como nuevo vector energético abre unas posibilidades enormes en automoción. La producción a bordo del propio vehículo durante la conducción, utilizando procesos catalíticos de oxidación de metanol, tiene unas ventajas claras frente a la tecnología establecida de los motores de combustión interna.

Por una parte, la eficiencia del motor eléctrico es sustancialmente más elevada que la de un motor térmico, estimada entre 2-3 veces superior. Por otra parte, la operación del proceso global, esbozada esquemáticamente en la Figura No. 9, se

realiza a temperaturas bajas, típicamente 120-240 °C, muy inferiores a las temperaturas y a las condiciones de trabajo de los motores de combustión interna, en los que se producen cantidades sustanciales de óxidos de nitrógeno (NOx) y CO.

La particularidad de esta nueva tecnología de oxidación de hidrógeno a baja temperatura en una pila de combustible, es incrementar la eficiencia y disminuir las emisiones gaseosas, esta perfila como una opción extraordinariamente atractiva con ventajas energéticas y medioambientales evidentes.

No obstante, por tratarse de una tecnología emergente, cabe esperar y se deben producir desarrollos importantes tanto en la integración energética de los diferentes procesos implicados como en la implementación de las tecnologías catalíticas y electro catalíticas existentes.

3.3.2.13. Costos de las celdas de combustible

Los mercados de potencia de respaldo y estacionaria emergieron el mundo en el 2004, con dos grandes compañías japonesas, como la TOKIO GAS, con EBARA-BALARD, y SHIN- NICON-SEKIYU (new Japan petróleo).

Estas instalaciones básicamente comprenden la celda de combustible de 250 Kw DFC 300 de carbonatos fundidos, en aplicaciones de plantas de tratamiento de agua, industria, universidades, así como soporte de red eléctrica. La instalación y operación de la celda de combustible mas grande del mundo se está realizando en el condado King en Washington, es una planta de 1.0- MW., operando en un director de gas.

Las aplicaciones al transporte: el proyecto de la unión europea de transporte urbano limpio para Europa (Clean urban transport for Europe- CUTE), realizo pruebas exitosas en nueve ciudades europeas cubriendo una distancia de 40.000 kilómetros en el 2004. Conceptos de autos con celda de combustible fueron fabricados y probados por casi todos los fabricantes de autos más importantes. También, varios fabricantes han anunciado avances técnicos significativos de arranque y operación el clima frío, con celdas de combustible tipo PEM.

- Los costos de las celdas automotrices han rebajado de \$US 275, /Kw (2002), a \$US 200/Kw (2004), utilizando procesos innovadores desarrollados por laboratorios nacionales y desarrolladores de celdas de combustibles para el depósitos de catalizador de platino.
- Se han reducido los costos de la producción de hidrogeno a partir del gas natural, de \$ US 5/por galón de gasolina equivalente (gge), en 2003 a \$ US 3.6 (gge), utilizando tecnologías innovadoras de reformación y purificación, este costo incluye la coproducción de electricidad.

- Se ha desarrollado un sistema de purificación de hidrógeno llamado PSA (PRESSURE SWING AD- SORTIUN), El cual produce hidrogeno con una pureza de 99.999 %, a partir de un transformador de metano a vapor que al caso una reducción de dos a cuatro veces comparadas con unidades comercialmente disponibles.
- Actualmente la durabilidad de las membranas de celdas de combustible tipo (MEA), alcanzan la meta de 5000 horas.
- El proyecto de celdas de combustibles del cambio climático Doe, iniciado por el congreso de los Estados Unidos ERDC-CERL, provee descuentos de \$US 1000/Kw, has un tercio del costo de compra de la celda del combustible, a solicitudes que utilicen a celdas de combustibles fabricados en los EUA, el propósito de este proyecto es acelerar la introducción en mercados de celdas de combustibles. A la fecha los solicitantes han recibido más de \$ US 30 millones en financiamiento a través de este proyecto para plantas de potencia de celdas de combustible instaladas en numerosos sitios alrededor del mundo. Un total de 234 celdas de combustibles han sido financiadas en este proyecto, las cuales incluyen tecnologías, PAFC, PEM, y MCFC, en el año 2005 aproximadamente \$ US 2.1 millones, estarán disponibles para descuentos.
- Un ejemplo del costo de una hidrogenera en España en la ciudad de Barcelona dentro del proyecto CUTE64 (transporte urbano limpio para Europa), fue de 3 millones de Euros. En este proyecto se sustituyó un motor Diesel convencional por una celda de combustible, se elevó el precio del autobús a 1.5 millones de Euros, frente al costo de un bus convencional de 168 mil Euros, pero a cambio de que la pila de combustible sólo emita a la atmósfera vapor de agua y elimine los ruidos del motor.
- Ver costo de una celda de combustible ref62

4. OBTENCION DEL HIDROGENO

Debido a que el hidrógeno es escaso en forma libre y la mayor parte de él se encuentra combinado con otros elementos, no es una fuente de energía primaria, como sí lo son el gas natural, el petróleo y el carbón. En realidad el hidrógeno es un vector energético, es decir un portador de energía que se debe producir a partir de fuentes primarias. La fuente más común de hidrógeno es el agua, compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Otras fuentes son la mayor parte de los compuestos orgánicos, incluyendo todas las formas de vida conocidas, los combustibles fósiles y el gas natural. El metano, producto de la descomposición orgánica, está adquiriendo una creciente importancia como fuente de hidrógeno⁷⁵

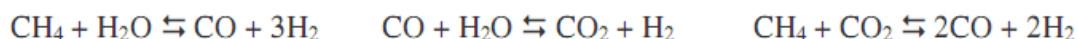
El hidrógeno se obtiene de distintas formas:

- Electrólisis del agua.
- Reformado de hidrocarburos con vapor de agua⁷⁵. <http://www.h2gen.com/>
- Ataque de metales con hidróxido sódico, potásico.
- Ataque de metales (Zn y Al) con ácidos sulfúrico o clorhídrico.
- Acción del vapor sobre carbón caliente.
- Desplazamiento de ácidos por ciertos metales.
- Acción de sodio o hidróxido de potasio sobre Aluminio.

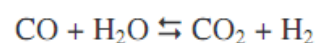
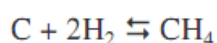
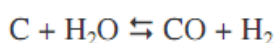
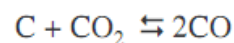
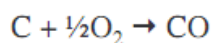
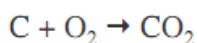
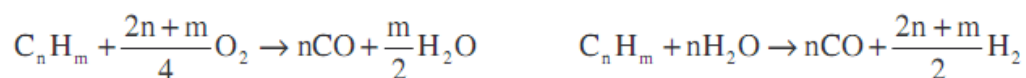
4.1. A partir de combustibles fósiles

En la actualidad, aproximadamente el 96% de la producción mundial de hidrógeno se obtiene a partir de materias primas fósiles. Todos estos métodos pasan por la obtención de gas de síntesis mediante alguno de los siguientes procesos, cuyas reacciones principales se describen a continuación:

- Reformado con vapor de gas natural o naftas ligeras:



- Oxidación de fracciones petrolíferas pesadas y (gasificación) carbón



Como se puede ver, el gas de síntesis consiste en mezclas de hidrógeno, monóxido de carbono (productos principales), dióxido de carbono, vapor de agua añadido en exceso y otros productos formados en reacciones secundarias.

La proporción entre los distintos componentes depende tanto de las materias primas empleadas como del proceso de obtención. Es necesario eliminar los componentes restantes hasta conseguir el hidrógeno de suficiente pureza para las posteriores aplicaciones, que pueden ser tan exigentes como algunas células de combustible que requieren valores muy altos. En la Figura N0. 11 se muestra un diagrama de bloques donde se resumen las etapas habituales del proceso global de purificación. En la última de ellas se recogen las dos operaciones 4 habituales, metanación y PSA (pressure swing adsorption), aunque recientemente se ha desarrollado la oxidación selectiva de CO.

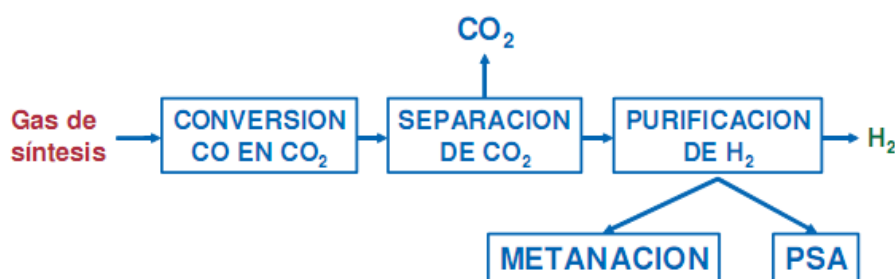
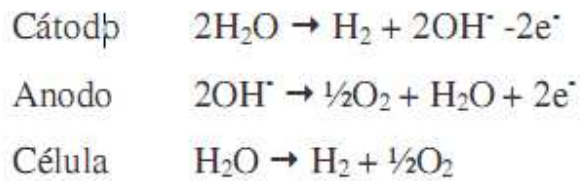


Figura No. 11. Etapas habituales del proceso de obtención y purificación de hidrógeno

Un proceso alternativo que actualmente supone el 4% de la producción mundial de hidrógeno es mediante electrólisis del agua. No obstante, se prevé un aumento importante de esta vía, ya que actualmente se pretende que el hidrógeno sustituya a los combustibles fósiles como fuente de energía. Por tanto, es lógico intentar desligar completamente el hidrógeno de dicho tipo de materias primas. Un factor a considerar son los recientes desarrollos de aplicar energías baratas a la electrólisis del agua, como la fotovoltaica (W. Pyle y col., 1994; P. A. Lehman y col., 1994; R. J. Friedland y A. J. Speranza, 2002) o la eólica (R. Bocci, 2003).

Los equipos más utilizados son los electrolizadores alcalinos, que emplean como electrolito una disolución alcalina, típicamente disoluciones de hidróxido potásico. Las reacciones que tienen lugar en estos sistemas son las siguientes:



Las investigaciones sobre la electrólisis clásica se dirigen al desarrollo de electrolizadores de halogenados y de membrana de intercambio protónico (R. J. Friedland y A. J. Speranza, 2002).

También existen líneas de investigación sobre métodos electrolíticos no convencionales como la electrólisis de vapor a alta temperatura (900 - 1.000 °C). Este método tiene la ventaja de que proporciona la energía de reacción necesaria en forma de calor y electricidad.

Otras investigaciones se dirigen a la electrólisis reversible del ácido bromhídrico. La energía eléctrica necesaria para disociar esta molécula es la mitad que en el caso de la molécula de agua. Una línea que está despertando especial interés en EE.UU. es la producción foto electroquímica. Este sistema es capaz de dividir la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, usando sólo la luz solar. A diferencia de los sistemas fotovoltaicos, éstos no necesitan cableado o convertidores externos. El sistema de recolección de radiación solar es capaz de generar suficiente voltaje para descomponer el agua.

En Norteamérica, el hidrógeno que se usa en procesos de refinación se produce ya sea por reformado catalítico de fracciones de gasolina o por reformado del gas natural por vapor. Oxidación reformada del gas natural "Steam Reforming Oxidation From Natural Gas (SMR Hydrogen)", la mayoría del hidrógeno para la producción de amoníaco se fabrica ya sea por oxidación parcial del gas natural o por reformado del vapor del gas natural a una mezcla de hidrogeno y oxido del carbono. Durante la oxidación parcial del gas natural para producir hidrogeno y óxidos de carbono los resultados también se logran de una relación cambiante del agua y del gas:

La relación cambiante agua gas convierte la mayor parte del monóxido del carbono en CO₂ y H₂. El CO₂ se remueve por filtrado alcalino, ya sea por solución de aminas o solución cáustica regenerativa. El gas rico en hidrogeno se refrigera para disminuirle la temperatura y se purifica para fraccionamiento. La licuefacción final del hidrogeno ocurre a temperatura de por debajo de -230 °C, adicionalmente el calor de licuefacción el cual se ha removido hay una alta transición de calor implicada (resultado del cambio catalizado en la molécula de hidrógeno).

Hidrocracking: el hidrógeno se puede producir a partir del cracking (disociación) de amoníaco. Además, se obtiene frecuentemente como un subproducto de las

operaciones de cracking usando líquidos del petróleo o vapores de las corrientes de alimentación que se generan para producir otros productos más valiosos.

4.2 Por biomasa

Científicos están explorando los métodos para aprovechar los desechos sólidos municipales en la obtención de Hidrógeno, con una eficiencia térmica anticipada del 50%, (Valor del calentamiento de los productos del Hidrógeno, sobre el valor calorífico del alimento).

Procesos termoquímicos mejorados, podrían convertir 200 millones de toneladas de desechos sólidos municipales producidos anualmente en los Estados Unidos en suficiente combustible Hidrógeno, para satisfacer el 7% de la demanda de energía requerida por el transporte en los Estados Unidos. Usando solo la mitad de los desechos de la agricultura, se podría satisfacer, la totalidad del sector transporte. La conversión de desechos a Hidrógeno, es económicamente ventajosa, a causa de que el manejo y la disposición de los desechos, es costosa y estos costos podrían ir a favor de los costos del Hidrógeno.

Se distinguen principalmente dos métodos: **a.** Métodos bacteriológicos con rendimientos superiores al 20% y, **b.** Métodos piro líticos o procesos de gasificación análogos a los usados para insumos fósiles. La utilización de desechos orgánicos es una opción económicamente atractiva, especialmente en vastas regiones rurales del mundo en desarrollo, donde la biomasa en exceso es un recurso relativamente abundante. Otras posibilidades son la producción biológica de alcoholes o metano por fermentación u otros procesos anaeróbicos para luego ser convertidos a H₂ por métodos convencionales.

4.3 Por electrólisis del agua

La principal es la electrólisis, que consiste en el uso de electricidad para romper la molécula de agua. Es común tener eficiencias del 65%, aunque los electrolizadores avanzados pueden alcanzar hasta el 85%.

Actualmente, el 4% del H₂ mundial se obtiene de esta forma, pero se espera sea el método de producción en el futuro.⁷⁷<http://www.electrolysers.com/>

Para la producción en pequeñas cantidades, el costo se ubica entre 2,40 – 2,60 dólares por Kg. y para la producción en gran escala, los mismos pueden ser de hasta 5 veces más que la producción a partir de fuentes fósiles, principalmente por el costo de la electricidad. No obstante, se espera que los costos declinen en el curso de la próxima década con mejoras en la tecnología de conversión, con la producción masiva de pequeños electrolizadores y con el uso de electricidad barata (Kreuter, 1998). (Ver referencia 29)

La electrólisis usando el viento o energía solar, promete ser una fuente limpia de hidrógeno, con aun más bajo impacto ambiental que la obtención por desechos municipales Electrólisis en Casa o Generación local de hidrógeno en estaciones de Tanqueo. La principal alternativa es desarrollar facilidades para la producción local de Hidrogeno a pequeña escala, para consumidores individuales, flotas de vehículos, estaciones de tanqueo y hacer uso de las redes de distribución de gas natural y electricidad que existen ya.

Producir H_2 por electrólisis, con fuente de electricidad desde cualquier forma de energía solar indirecta. En su forma original y más simple, este sistema contiene un sistema de celdas FV y un electrolizador; sin embargo se han diseñado y operado exitosamente sistemas más sofisticados y más eficientes.

Otro método propuesto para obtener electricidad en forma limpia es por medio de un satélite concentrador de la energía del sol situado en órbita geoestacionaria⁶⁸, que enviará la luz del sol al mar, se rompería el enlace hidrógeno-oxígeno, una vez obtenido el hidrogeno, se distribuiría a los usuarios en forma de gas hidrogeno por línea o en forma de hidrogeno liquido, como se observa en la figura adjunta:

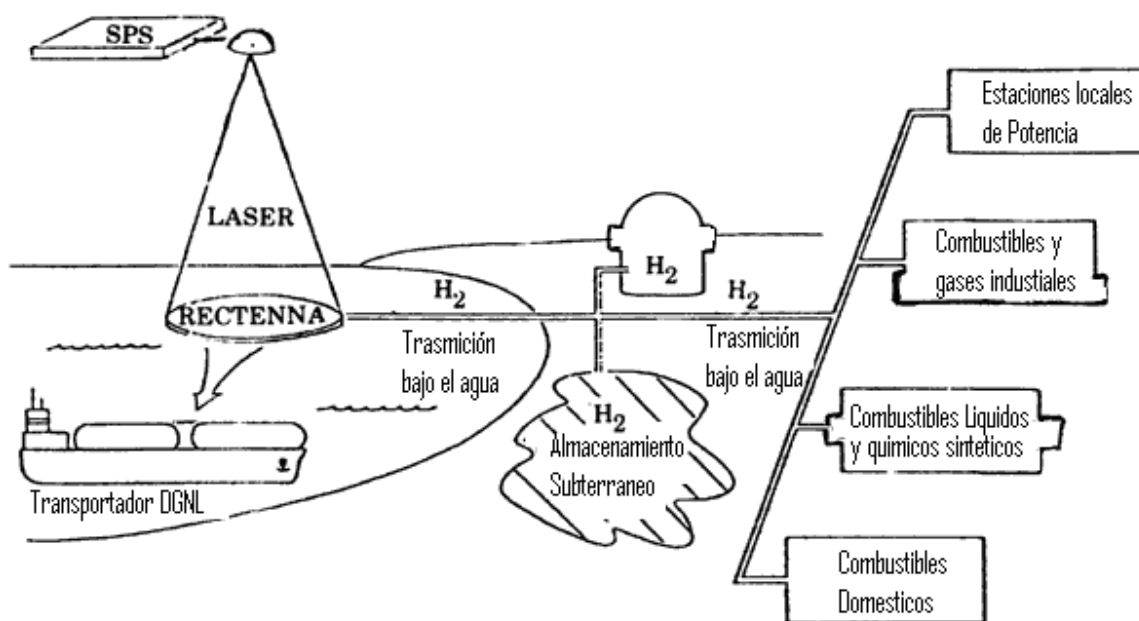


Figura No. 12. Electrólisis del agua aprovechando la energía solar con el satélite rayo láser⁶⁸.

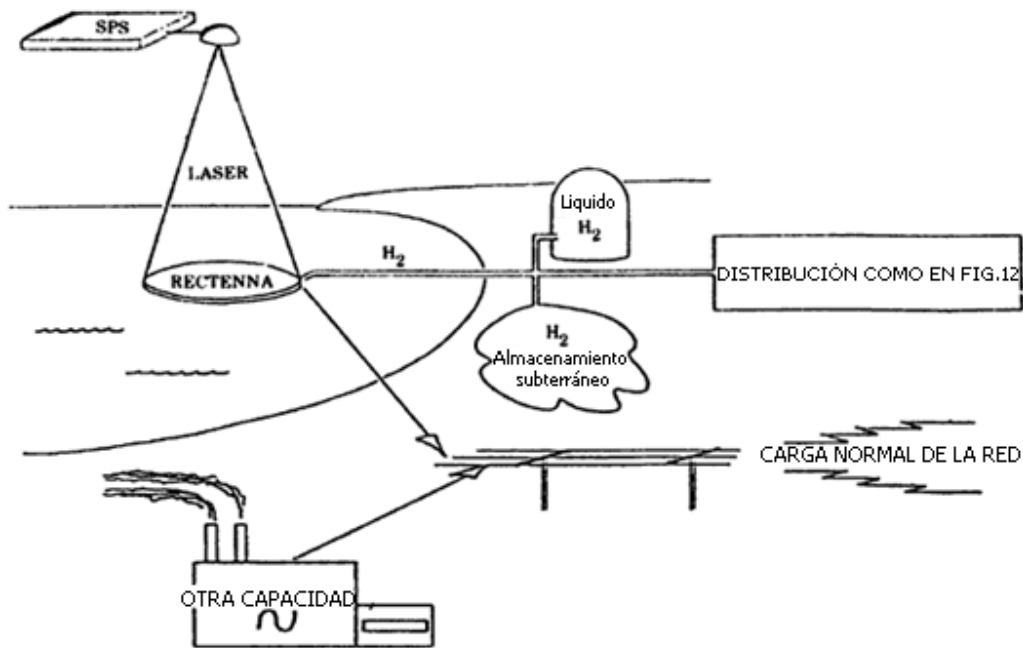


Figura. No. 13. Electrólisis del agua aprovechando la energía solar con el satélite. Por microondas68.

4.4 Por energía nuclear

Uniendo sus núcleos dentro de un reactor denominado *Tokamak*, durante el proceso conocido como fusión nuclear. La energía nuclear se utilizaría para producir energía eléctrica y luego producir hidrógeno por electrólisis. El programa de generación de Hidrógeno a partir de la energía nuclear se inició en octubre de 1999 por el departamento de energía de los Estados Unidos (DOE) por recomendación de US Nuclear Research Committee, se denominará sistema de generación de cuarta generación (Generation IV), se invitó formalmente a través de los gobiernos a participar en el programa como resultado de esta invitación, Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea, Sudáfrica, Reino Unido, Suiza y Estados Unidos, crearon el denominado "Generation IV International Forum GIF". El objetivo de esta planta es asegurar que sea eficiente en la generación de electricidad, a la par que pueden ser útiles para otras aplicaciones, como calor, generación de H₂ y minimización de residuos.

4.5 Producción de H₂ a partir de energía solar

Puede darse de dos formas: **a.** Directa, mediante foto procesos. Actualmente, solo se producen pequeñas cantidades a escala de laboratorio; y **b.** Indirecta, que utiliza técnicas electrolíticas con suministro de electricidad a partir de celdas fotovoltaicas (FV). Se estima que el 0.5 % del área superficial de la tierra podría producir una cantidad de H₂ equivalente a 7.000 tce/km² (tce=tonelada de carbón

equivalente) por año, y que podría satisfacer el consumo de energía mundial en ese mismo lapso (Veziroglu, 2002). (Ver referencia 30)

Las celdas FV también pueden instalarse en sitios más cercanos y asequibles. Al usuario final, por ejemplo los techos de las casas podrían ser suficientes para la producción doméstica de H₂. El sistema solar/hidrógeno fue propuesto por Bockris (1985) para dar cuenta de un sistema que utiliza la energía solar y La que probablemente sea la primera aplicación comercial en el futuro cercano está asociada con el almacenamiento estacional: el H₂ producido en el verano, se almacena y se convierte a electricidad en CC en el invierno. Este sistema energético podría quizás satisfacer los requerimientos de energía del mundo, actual y futura.

El principal problema para la producción de hidrógeno por electrolisis es el alto costo de la energía eléctrica, actualmente el MIT está investigando sobre cómo obtener energía eléctrica a partir de la energía solar a un bajo costo, se está investigando sobre las nano-células solares (Nanos solar cells). Puede ser que el sol sea la única fuente con suficiente capacidad para hacer que no seamos dependientes de combustibles fósiles. No obstante, atrapar la energía solar, requiere de capas siliconas que aumentan los costos hasta 10 veces el costo de la generación de energía tradicional. A través de la **nanotecnología** se está desarrollando un material fotovoltaico que se extiende como el plástico o como pintura. No solo se podrá integrar con otros materiales de la construcción, sino que ofrece la promesa de costos de producción baratos que permitirán que la energía solar se convierta en una alternativa barata y factible.

La tecnología nanosolar implica una delgada capa de cobre, indio, galio y selenio (CIGS) que absorbe la luz del sol y la convierte en electricidad. La tecnología básica ha estado alrededor de nosotros por décadas, pero ha sido difícil de producir por su alto costo. Se ha desarrollado un modo para hacer que estas celdas se usen como una tecnología similar a las impresoras, similares a la usada para imprimir periódicos más que diferentes que los costosos métodos basados en el vacío.

4.6 Otros métodos de obtención del hidrógeno

Algunos otros métodos para la producción de hidrógeno son los siguientes: Pasando vapor sobre hierro caliente, el cual reduce el vapor a hidrógeno acompañado de la formación de óxido de hierro. Varias variaciones de este proceso fundamental "Steam-iron", se practica en la industria.

La reacción del vapor con Coque incandescente o carbón (reacción agua-gas) se usa algunas veces como fuente de hidrógeno. El monóxido de carbono es otro de los productos de este proceso. Hay también un proceso catalítico de agua-gas que implica el uso de vapor en exceso, el cual se rompe para formar mas hidrógeno mientras se oxida el monóxido de carbón a dióxido de carbón.

Para uso en balones inflables, pequeñas cantidades de hidrógeno se generan en el sitio de pedazos de ferro silicón o aluminio y soda cáustica o de materiales tales como híbrido de litio.

Plantas de producción de hidrógeno de alta pureza: Una planta típica para la producción de hidrógeno de alta pureza ya sea desde gas natural, propano o butano consistirá de las siguientes 5 secciones.

1. Manejo de hidrocarburos y purificación.
2. Producción de hidrógeno
3. Purificación de hidrógeno
4. Reactivación de Aminas
5. Compresión de hidrógeno y almacenamiento

4.7. Composición del hidrógeno de alta pureza de una planta típica

COMPONENTES	PORCENTAJE EN MOL
CO ₂	0.01
CO	0.01
CH ₄	0.1
N ₂	0.01
H ₂	99.87
TOTAL	100

Tabla No. 4. Composición del hidrogeno de alta pureza de una planta típica

5. ESTRUCTURA PARA EL MANEJO DEL HIDRÓGENO.

Transporte del hidrógeno como combustible, por tuberías: La transmisión de hidrogeno por tubería difiere de la transmisión de gas natural, esto se refleja en el aspecto económico del proceso, en que se tienen en cuenta las propiedades de cada combustible: Si la tubería de gas se modifica para trasportar hidrógeno, estas solo pueden trasportar el 30% de la energía requerida, por lo tanto la energía gastada en la compresión del gas natural, discrepa en la usada para el hidrógeno, el transporte del hidrógeno costara entre un 30% y un 50% más que trasportar gas natural. Sin embargo los costos de mantenimiento serán aun más altos. Los costos de operación y mantenimiento son 50% -70% más para servicio de hidrógeno, debido al costo más alto del combustible y otras limitaciones operacionales.

- Aspectos económicos: La figura 14 presenta comparaciones económicas entre el hidrógeno y otros fluidos, para varias tasas de flujo. El costo relativo de la transmisión, asumiendo 100% de uso y 15% de carga fija, se observa en la figura 15.
- Estas figuras se incluyen para quienes quieran tener en cuenta los costos al diseñar una línea para transporte de gas.

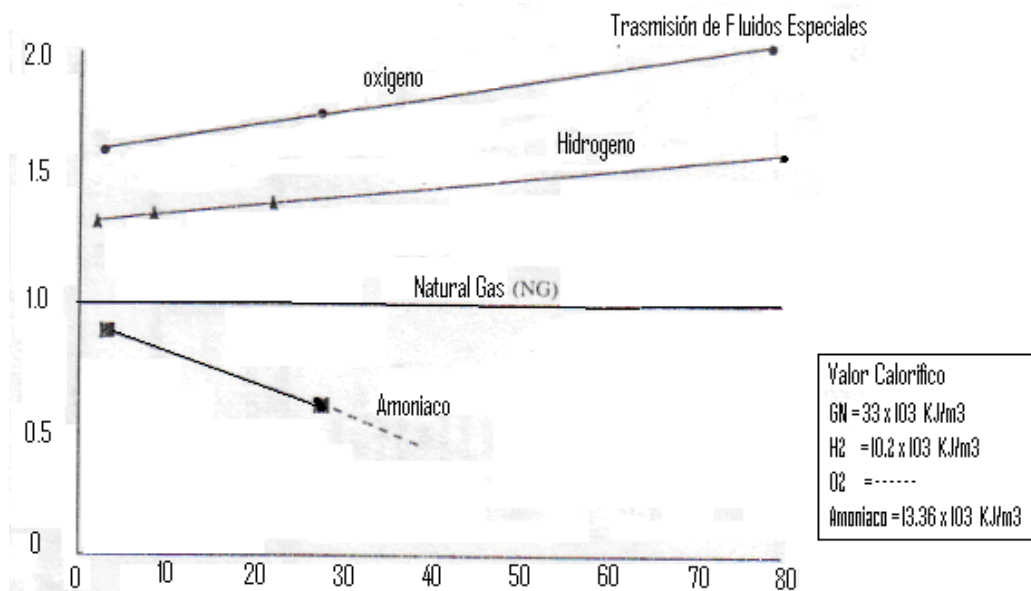


Figura No. 14. Costo relativo de transmisión de hidrogeno Vs. Otros fluidos.52

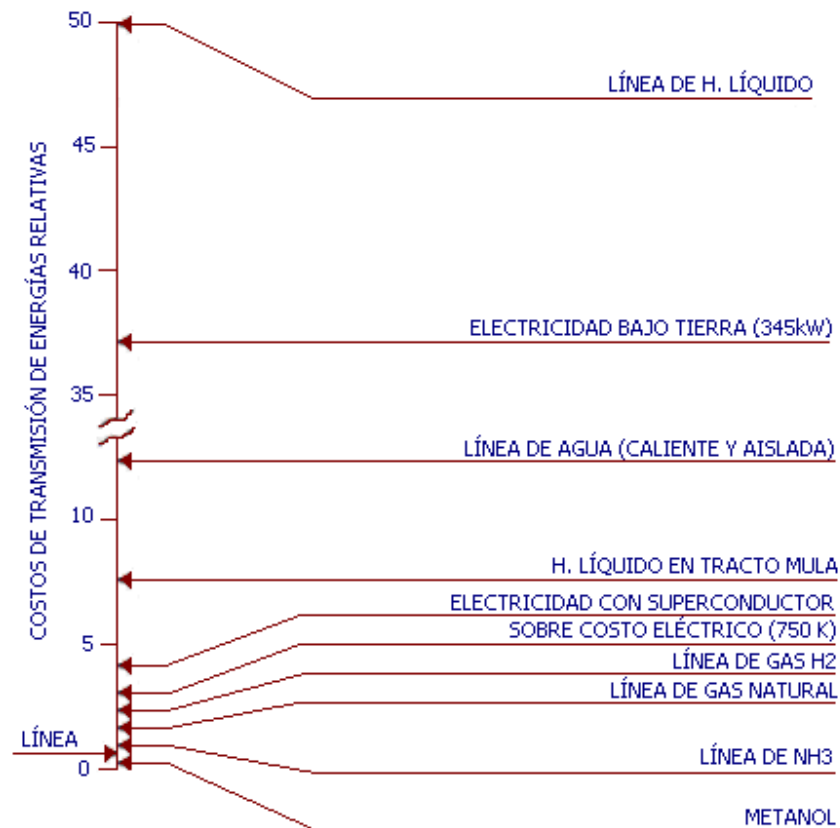


Figura No. 15. Costo relativo de transmisión de energía. 53

5.1 Líneas de transmisión de hidrógeno.

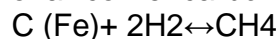
5.1.1 Consideraciones sobre materiales

- Fallas materiales: El hidrógeno tiende a reaccionar con el tipo de metal que se usa para construir las líneas, facilidades, almacenamientos. Esas reacciones pueden tener un efecto que causa detrimento sobre la dureza, ductilidad, Resistencia al estallido, disminución de la vida por fatiga de la línea.
- Los principales problemas asociados con exposición de la tubería a la alta presión del gas hidrógeno, son ataque del hidrógeno (**Hydrogen Attack**) o la **fragilización (Hydrogen Embrittlement)**. Para evitar la fragilización por causa del hidrógeno, se puede inhibir la línea por la presencia de impurezas gaseosas, tales como oxígeno o dióxido de carbón, tanto como el nivel de estas impurezas es aceptable, al uso del uso industrial que se le dé al hidrogeno. La presencia de monóxido de carbón en hidrógeno inhibe el material de la línea de la degradación por hidrógeno a todos los niveles de stress y grados de acero, incluyendo regiones soldadas y partes duras, la relación debe ser CO/H₂ sea más grande que 0,1. Si ya se ha iniciado el proceso de crack o crecimiento de este, ningún efecto inhibitorio se logra con la adición de N₂ o CH₄.

5.1.2 Ataque de Hidrógeno (Hydrogen Attack)

Ocurre a temperaturas mayores de 50 °C (200 °F), Los procesos durante los cuales el hidrógeno se difunde en el acero y la subsiguiente nucleación, crecimiento y coalescencia de burbujas de Metano empieza en los granos. El metano se produce por la reacción a elevada temperatura del gas hidrógeno con el carbón del acero.

El gas metano ejerce una presión interna la cual fisura o agranda los poros. El efecto global es que la Resistencia del acero se reduce. El hidrógeno penetra dentro del acero, puede reaccionar con el carbón, resultando en la formación del Metano:



Como esta reacción consume el carbón del acero algunas veces se llama "Decarburización". Las temperaturas típicas de operación para sistemas de tubería de gas hidrogeno están usualmente en el rango de - 45 °C a +50 °C. Por debajo de estas temperaturas el ataque de hidrogeno no tiene lugar.

5.1.3 Fragilización por hidrógeno (Hydrogen embrittlement)

(HE) Ocurre temperatura normal de operación, afecta las propiedades mecánicas y comportamiento del acero. Debido a la complejidad del problema, los mecanismos por los cuales ocurre este fenómeno no están completamente entendidas, Se cree que el hidrogeno se absorbe a la superficie del acero y también se difunde dentro del o es absorbido por él.

Cuando el hidrógeno se absorbe dentro de la superficie del acero, figura 13, su tenacidad se reduce en la superficie y se formara un crack. El hidrógeno difuso puede coalescer en los vacíos o inclusiones, resultando en una presión de hidrógeno en el acero que causa un incremento en el stress interno y axial se baja el stress para una aparente fractura. Esto reduce el stress de fractura aparente. El hidrógeno absorbido afecta la red ínter granular del material. Lo cual reduce la Resistencia a la cohesión. El resultado final es que el acero puede exhibir una pérdida en ductilidad, tenacidad, Resistencia a la fractura y capacidad de acarreo de carga.

En este proceso fragilización por hidrógeno (Hydrogen embrittlement). Ocurre en que varios metales, el más importante acero de alta Resistencia empieza a fragilizarse y craquearse. Esto ocasiona pérdidas económicas a la industria, puede ocurrir durante varias operaciones de manufactura o uso operacional, donde cualquier metal se ponga en contacto con hidrógeno atómico o molecular. En los procesos de soldadura se deben utilizar electrodos con bajo hidrogeno, cuando se suelden aceros de alta Resistencia.

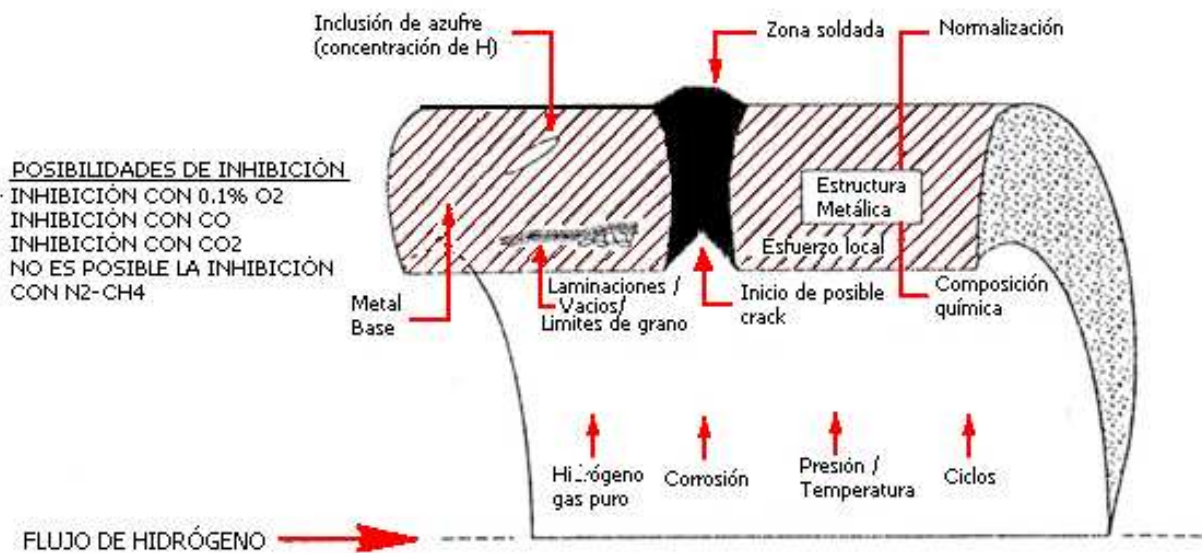


Figura No 16. Factores que afectan la fragilización del acero por el Hidrógeno 25

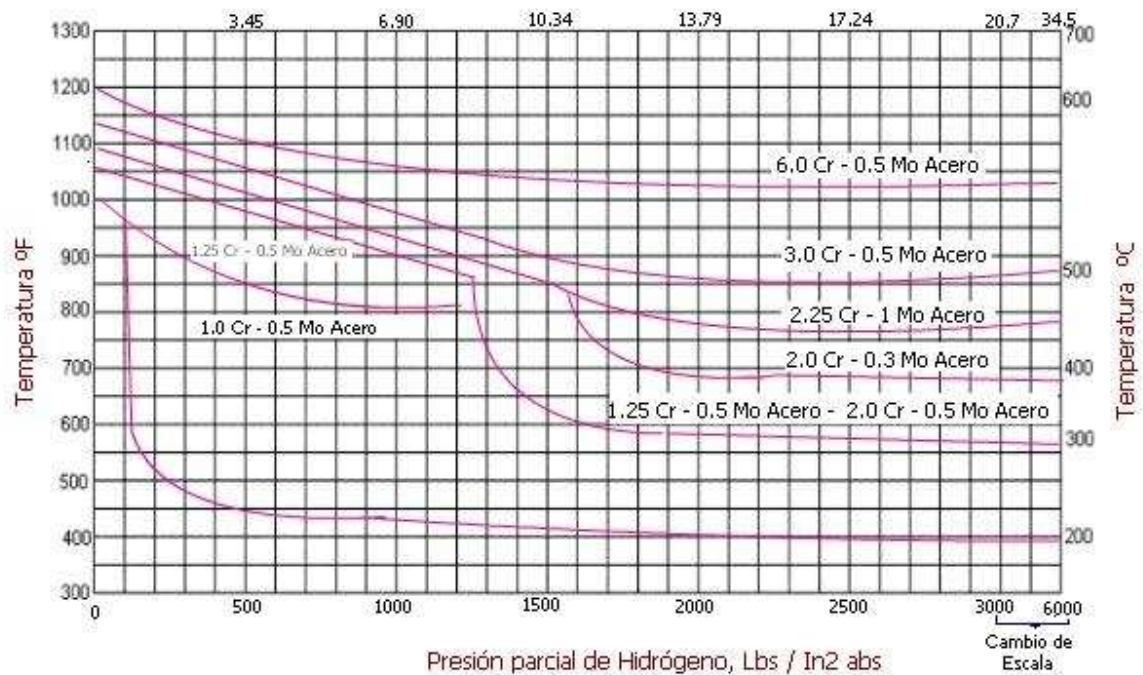


Figura No. 17. Límites de operación para aceros en servicio a alta presión para transporte de hidrogeno API (941,1983) (cortesía de reimpresión del Instituto Americano del Petróleo).

Mientras la temperatura normal de operación en una línea de transmisión de hidrógeno se recomienda que esté por debajo de los 50 grados centígrados ciertas facilidades de tubería pueden experimentar altas temperaturas y presiones.

Por ejemplo, la temperatura a la salida de un compresor puede ser muy alta también en plantas o refinerías o donde se produce hidrógeno y este es utilizado para muchos propósitos pueden experimentar temperaturas por encima de los 200 grados centígrados. A altas temperaturas el hidrógeno afecta las propiedades mecánicas de los aceros al carbón. Esto no solamente se aplica a altas temperaturas sino también a altas presiones. Un ejemplo pudiera ser los tubos de los calentadores en los reformadores catalíticos.

La exposición del hidrógeno a altas temperaturas puede resultar en la descarburación de la superficie o la descarburación interna, estas formas de daño de hidrógeno puede reducir significativamente la resistencia de los aceros al carbón. En la última figura es el diagrama de Nelson que sirve como una guía para seleccionar las aleaciones mínimas que debe tener una tubería y los accesorios que se deben usarse para servicio con hidrógeno, en este Diagrama sin embargo no especifica la dureza que debe tener el material para servicio en alta temperatura.

La mayoría de líneas de transmisión operan en el rango de 3.000 a 6.000 KPa y usan grados de acero bajos

Las experiencias de laboratorio han demostrado que la vida por fatiga de los aceros por servicio en acero se puede reducir por un factor de 3 a 6. Esas pruebas sobre recipientes de aceros (SMYS mayor que 550 Mpa) Indican que las fallas por fatiga podrían ser un problema después de 30000 ciclos de presión completos, a un nivel de aproximadamente el 40% del SMYS.

5.1.4 Materiales que se deben utilizar en el manejo del hidrógeno:

Bajo ciertas condiciones el hidrógeno puede degradar las propiedades mecánicas de la mayoría de aleaciones y puede ocasionar fracturas en ellas, sin embargo, tiene algunos efectos positivos, en metales. Actualmente en varias y potenciales aplicaciones de hidrógeno que aumentan la producción y rendimiento, los materiales deben revisarse. Esas incluyen procesos de termo hidrogenación (THP) y la formación de aleaciones refractarias, procesos de metales magnéticos en la zona de transición, por decrepitación de (HD), amorphización (HIA) y refinación micro estructural, extracción de elementos desde ores y aleaciones y el uso de hidrógeno como un reductor de gas para soldadura y brazing. En el hidrógeno se halla que aumenta la formación, de micro estructuras y que el modifica las propiedades de una gran variedad de materiales, incluyendo aceros, aleaciones en base al Titanio y compuestos con matriz compuesta (MMCs),

metales refractarios y aleaciones, aleaciones con metales raros de la zona de transición, metaloides que contienen vidrios metálicos, etc.

5.1.5 Transmisión de Hidrógeno por tubería

Más de 800 Km de tubería de Hidrógeno ha sido exitosamente diseñada y construida alrededor del mundo desde 1940. En la **tabla No 5**, se observan las principales líneas de hidrógeno construidas hasta el año 2000.

Air liquide opera líneas de conducción de hidrógeno en el norte de Europa y en el sector estadounidense del golfo de Méjico, que forman parte de la red mundial de 1700 km (1060) millas de la compañía. Esto representa un 10% de todas las líneas de conducción de hidrógeno del mundo. Las plantas de Antwerp en Bélgica y de Bayport en Texas, producen más de 100000 m³/hora (629000 bbl/hora), de hidrógeno a partir del gas natural, cada una. La mayor parte del hidrógeno producido en estas plantas se usa para remover el azufre contaminante de la gasolina y el combustible Diesel⁵⁹

6. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

Debido a la diferencia en propiedades físicas entre el hidrógeno y el gas natural, la transmisión de hidrógeno por tubería diferirá de la transmisión del gas natural.

La diferencia se refleja en la economía de las líneas de hidrógeno como un total, mientras el hidrógeno gaseoso se transporta como una fuente de combustible para otros usos, tales como la producción de Urea. Si las tuberías existentes de gas se modifican para entregar hidrógeno como una combustible fuente, estas tuberías podrían solamente ser capaces de entregar aproximadamente el 30% de la energía requerida.

Como resultado de esto los requerimientos de potencia para la compresión, la capacidad tiene que ser aumentada para compensar la energía que se usaba con el gas natural. Similares discrepancias serán evidentes si otros gases tales como el oxígeno o amoníaco se transporta.

Se ha estimado que para la mismo flujo de energía transportada, con el hidrógeno costara entre un 30% a un 50% más que para transportar, el gas natural. Los costos de almacenamiento para el hidrógeno sobre el gas natural serán del mismo orden que para el transporte. Sin embargo los costos de operación y mantenimiento serán aun más altos, debido al costo del combustible Hidrógeno y los límites operacionales.

Como cualquier sistema energético, el transporte por gasoducto de hidrógeno, es el método de transmisión de grandes ventajas. En las líneas de gas se consideran movimientos dinámicos, los costos del gas en la línea los análisis para las líneas de hidrógeno seguridad en la línea de hidrógeno y la experiencia operativa. Se ha hallado que la transmisión de hidrógeno gaseoso en una gran red de líneas es técnicamente y económicamente factible. Para grandes flujos de energía los costos de transmisión podrían ser 50% más grandes por unidad de energía que para gas natural. Suficiente experiencia está disponible para confirmar de que las líneas de hidrógeno pueden ser diseñadas, construidas, operadas con seguridad sobre una base rentable y comercial. Las modificaciones de las líneas que existen para gas natural, para transportar hidrógeno son completamente factibles. Ver tabla No. 5 siguiente.

Localización	Material de la línea	Años de Operación	Diámetro, Wt (mm)	Longitud (Km)	Presión (KPa) y pureza del gas %	Experiencia reportada	Estatus
AGEC, Alberta, Canadá	Cr. 290 (5 LX X 42)	Desde 1987	273 X 4.8 WT	3.7	3.790 k PA – 99.9	No	Operacional
Air Products, Houston area, TX		Desde 1969	114.3 - 324	100	34.5 – 5.516 (H2 puro)	No	Operacional
Air Products, Houston Louisiana	ASTM 106	Nuevo	101.6 – 304.8	48.3	3.447	Si	Operacional
Air Products, Samia (desde la planta de Dow a la planta Dome)	-	-	-	3		No	Operacional
Air Products, Texas	Línea convertida de Gas natural	> 23	114.3	8	5.500 puro H ₂	Si	Operacional
Air Products, Texas	Acero Schedule 40	>20	219.0	19	1.400 – puro H ₂	Si	Operacional
Chemische Werke Huis AG – Mari, Germany	línea sin costura Acero SAE 1016	Desde 1938	168.3 - 273	21.5	A 2500 Gas crudo (rendimiento anual = 300 x 10 ⁶ Cu m)	Si	Operacional
Cominco, British Columbia, Canadá	Acero al carbón (ASTM 210) Sin costura	Desde 1964	5" X 0.8125" WT	0.6	>30.000.62 hasta 100% puro H ₂	No	Standby
Gula Petroleum Canadá Petromont to Varnnes, Montreal east	Acero al carbón sin costura Schedule 40		168.3	16	93.5 % H ₂ , 7.5 % metano	No	Operacional
Hawkeye Chemical, Iowa	ASTM A 53 Gr B	>15	152.4	3.2	2.757.6	Si	Operacional
ICI Billingham, U.K.	Acero al Carbón	-	-	15	30.000 KPa Puro	No	-
L'Air liquide, France	Acero al carbón, sin costura	Desde 1966	Varios tamaños	290	6.484 – 10.000 KPa, puro y crudo	No	Operacional
LASI, NIM	ASME A 357-Gr 5	-	25.4	6.4	13.788	Si	Abandonada
Los Alamos, NIM	5 Cr. – Mo (ASME A 357 Gr 5)	>20	30	6	13.790 puro	Si	Abandonada
Linde	-	-	-	1.6 – 3.2	-	-	-
NASA – KS, FL	316 SS (austenítico)	>28	50	1.6 - 2	42.000 KPa	No	Operacional

Tabla No. 5. Resumen de las principales líneas de hidrogeno que operaban en el mundo hasta el año 2000.

Los códigos y estándares para las líneas de hidrógeno se pueden ver en la tabla No. 6, para el diseño de líneas de hidrógeno que atraviesan el campo. Generalmente son modificaciones que se le hacen a los códigos existentes relacionados al diseño de líneas de gas natural, tales como la ANSI Vll.8 y las regulaciones del departamento de transporte de gas natural y otros gases de los Estados Unidos por tubería y los estándares de seguridad mínimos (USDT)., aprobado por cuerpos regulatorios. Hay también varios códigos, regulaciones y estándares que gobiernan o están relacionados a la instalación de sistemas de manejo de hidrógeno.

También se citan los códigos para buenas prácticas que están relacionados al manejo de hidrógeno.

Código	Descripción
NFPA Estándar 50 A	Sistemas de Hidrógeno gaseoso en el sitio de consumo.
NFPA Estándar = 30	Estándar para tanques de vehículo para líquidos combustibles e inflamables.
NFPA Estándar = 386	Estándar para tanques de embarque portátil para líquidos combustibles e inflamables.
NFPA Estándar = 68	Guía para venteos explosivos

Códigos de buenas prácticas	
C-10	Recomendaciones para cambios de servicio para cilindros de gas comprimidos.
C-11	Prácticas recomendadas para inspección de cilindro de gas comprimido en el momento de fabricación.
C-14	Procedimiento para prueba de fuego del DOT en sistemas de válvula de alivio de cilindro.
C-15	Procedimiento para prueba de diseño de cilindros y pruebas de desempeño y servicio.
G-5	Asociación de gas comprimido (CGA) folleto No. 5 "Hidrógeno".
G-5.1	CGA "Estándar de Hidrógeno gaseoso en el sitio de consumo".
G-5.3	CGA "Especificaciones básicas para el Hidrógeno".
P-1	Manejo seguro de gas comprimido en contenedor.
P-6	Datos de densidad estándar para gases atmosféricos en Hidrógeno.
P-12	Seguridad en el manejo de líquidos criogénicos.
Aire líquido	Guía para seguridad del Hidrógeno
Código de práctica ICG	Estaciones de Hidrógeno gaseoso

Tabla No. 6. Códigos de diseño que se recomiendan para sistemas de hidrogeno gaseoso.

El almacenamiento constituye la principal dificultad para imponer la energía del H₂. Existen problemas técnicos no resueltos totalmente y ninguna opción califica como la mejor para todos los usos energéticos. La principal clasificación de los métodos de almacenamiento distingue un almacenamiento estacionario para generación de potencia y otro móvil para aplicaciones automotoras, para este caso, se tienen las siguientes alternativas en las versiones comerciales:

Hidrógeno gaseoso: usado por la industria Ballard, en buses de transporte Urbano.

Hidrógeno líquido: usado por la BMW en vehículos de pasajeros.

Hidruros metálicos: usados por Mazda y la Daimler-Benz en vehículos de pasajeros.

En la actualidad se está investigando diversos tipos de materiales para almacenar el hidrógeno como el propuesto por la *sociedad química Americana* que consiste en un Buckyball litio – revestido que puede contener el potencial de servir como recipiente de almacenaje para los átomos de hidrógeno. Un Buckyball es una nano partícula que contiene 60 átomos de carbono y ellos absorben el hidrógeno, lo que significa que un átomo de litio puede almacenar 5 moléculas de hidrógeno, 12 átomos de Litio puede almacenar 60 moléculas de hidrógeno.

Los estándares de la industria requieren que los materiales que almacenen hidrógeno deben tener una alta densidad gravimétrica como el 9 % en peso y una alta densidad volumétrica de 70 gramos por litro.

6.1. Métodos de almacenamiento

6.1.1. Hidrógeno gaseoso

Se usan sistemas de tamaños y presión variables, cilindros de acero y tanques cilíndricos o esféricos; se considera el método más adecuado para almacenamiento diario o semanal, pero no para los grandes volúmenes que involucra una amplia utilización energética del H₂. Una alternativa es el almacenamiento subterráneo, utilizando pozos de petróleo o de gas agotado, cavernas o antiguas minas. Para aplicaciones móviles, no es el mejor método, por los costos asociados con el almacenamiento a alta presión, potenciales peligros de explosión y por su alto volumen. Así, a una presión de 20 MPa y 20 ° C, es necesario un tanque con un volumen 5,5 veces mayor que para el caso de H₂ líquido (Veziroglu, 2002). [29]

6.1.2 Hidrógeno líquido

Se ha propuesto en varios prototipos de automóviles, sin embargo es muy costoso por las condiciones extremas necesarias para mantener la fase líquida, además de las pérdidas por fugas. Existen tanques de H₂ líquido desde 100 lt. Hasta 5.000 m³ para almacenamiento a largo plazo, el ejemplo más emblemático es un tanque con una capacidad de 3.800 m³, ubicado en el Centro Espacial Kennedy en Florida (Veziroglu, 2002). [29]

- Micro esferas de vidrio: es posible almacenar H₂ a alta presión en esferas de Vidrio huecas con un diámetro que oscila entre 25 y 500 micrones. Estas se llenan con H₂ a temperaturas entre 200 a 400 °C, al ser enfriadas hasta temperatura ambiente el H₂ queda atrapado y puede ser liberado cuando se necesite al volver a calentar las esferas. Para aplicaciones automotoras es una tecnología promisoría. Sin embargo tiene las mismas limitaciones de la baja densidad volumétrica del H₂ gaseoso (Veziroglu, 2002).

- Hidruros metálicos: constituye la forma más segura de almacenamiento. Se aprovecha la propiedad que tienen ciertos metales y aleaciones metálicas de formar enlaces covalentes reversibles cuando reaccionan con el H₂, formando hidruros metálicos. Se considera una gran promesa para aplicaciones vehiculares, sin embargo difícilmente puede satisfacer el criterio mínimo de 5% para la densidad gravimétrica propuesto por la Sociedad Americana Automotriz.

6.1.3 Adsorción en carbón

En esta técnica se almacena H₂ a presión en una Superficie de grafito supe activado altamente poroso. Es muy similar al caso del H₂ gaseoso, si bien es más pesado permite que se almacene más hidrógeno para la misma presión y tamaño del tanque. Los adsorbentes más promisorios son los nano carbonos, incluyendo los nanotubos, nano fibras y carbones supe activados (Veziroglu, 2002). Todo esto muestra que la etapa de almacenamiento dista bastante de estar definida en cuanto a la mejor manera y es uno de los problemas “abiertos” en el desarrollo de una economía basada en el hidrógeno H₂.

6.1.4 Subsistema: transporte y distribución

El transporte y distribución a gran escala en forma eficiente y confiable es vital para el éxito del H₂ como combustible para vehículos. Se tienen varias alternativas:

- Transporte y distribución por tuberías: Los sistemas en operación existentes en Varios países están dedicados al uso del H₂ como insumo químico, totalizan. Cerca de 2000 Km., conectan a varias plantas químicas y refinerías con aceptables record de seguridad y operan de manera similar a las redes de gas

natural. Una de sus limitaciones es que la velocidad de flujo del H₂ debe ser tres veces mayor que la del gas natural para satisfacer la misma demanda de energía, con el consiguiente incremento en los costos. Sin embargo, este tipo de transporte jugará un rol importante en la transición del gas natural al H₂, por lo que la mayoría de investigaciones se orientan a determinar las condiciones bajo las cuales las redes de distribución de gas natural pueden utilizarse para transportar H₂. En el caso del H₂ líquido, las líneas de distribución existentes están limitadas a la NASA para sus programas espaciales. Ver tabla 5

Se ha estimado que para transportar el mismo flujo energético, el hidrógeno costará entre 30% al 50% más que para transportar eso en gas natural. Los costos de almacenamiento para hidrógeno, sobre los de gas natural serán del mismo orden como el costo de transporte. Sin embargo los costos de operación y mantenimiento serán aún más altos.

Transporte por carretera y tren: el transporte de H₂ gaseoso en cilindros a presión es muy usado. Aunque no es el más eficiente, es el más conveniente ya que el tránsito por autopistas está limitado más por volumen que por peso. Una alternativa es el transporte en tanques criogénicos por tren.

Barcos tanqueros para hidrógeno líquido: es, quizás, la mejor manera de transportar el H₂ en gran escala. En el programa EQHHPP, se propone el Transporte intercontinental en tanqueros con una capacidad de 15.000 m³ y para 15 viajes al año. En el programa WE-NET, se han diseñado tanqueros para transportar 200.000 m³ de H₂, usando la tecnología para gas licuado de petróleo.

6.2. Gasolineras de hidrógeno, (hidrogeneras). Modelos construidos en varios países.

El abastecimiento de los vehículos será similar a la gasolina. Solo que para llenar el depósito tendremos que ir a una Hidrogenera en vez de a una gasolinera. Actualmente ya hay en varios países del mundo, como en Estados Unidos, España, Alemania, El suministro será similar al del GNCV, requerirá de una boquilla herméticamente cerrada que inyecte gas a presión⁷¹, En la referencia^{81,82} se puede observar el mapa de las hidrogeneras actualmente en el mundo.

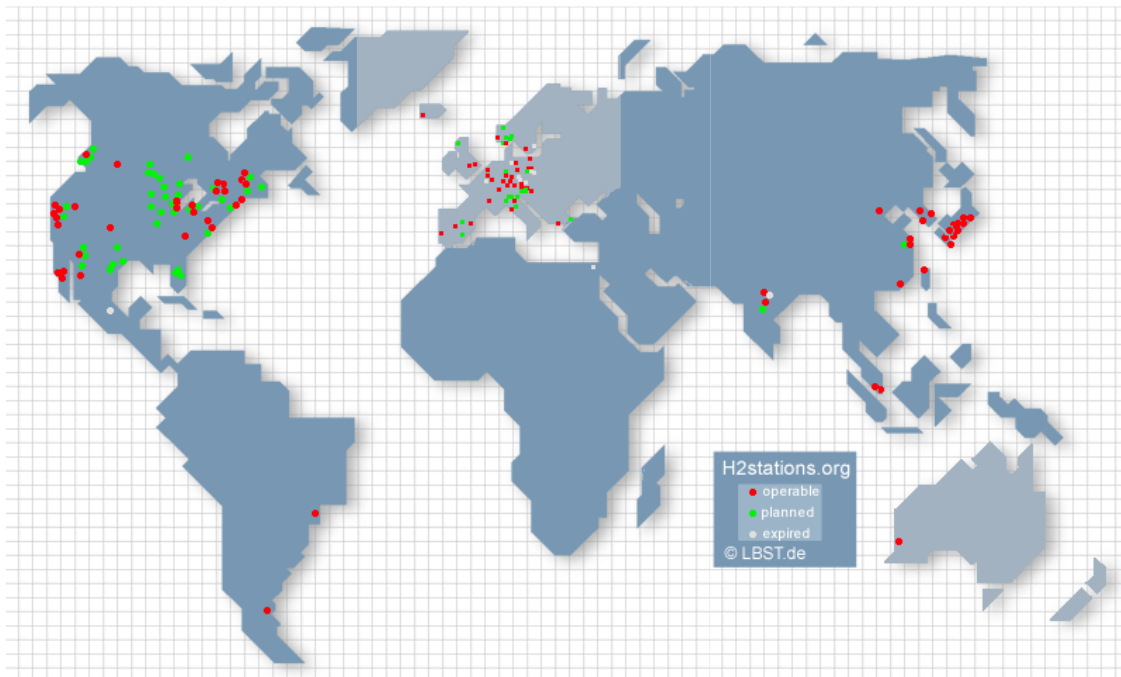


Figura No. 18. Principales hidrogeneras en el mundo. *Operando *Planeada *Cerrada81

Air Liquide, es el Mayor proveedor de Hidrogeneras en el mundo, lo mismo que el grupo Linde de Alemania.73.

El grupo Linde de Alemania también provee el servicio de instalación de Hidrogeneras 82.

El hidrógeno se abre paso para tanquear en el frente de los combustibles, el hidrógeno ha ganado mucho terreno (ver la figura No. 18). Los grandes problemas para que se le usara eran sus altos costos de desarrollo, el tamaño de las baterías y lo complejo de instalar estaciones abastecedoras del combustible. En varios países ya solucionaron el problema del tamaño de las baterías y su ubicación, Washington y Tokio ya cuentan con estaciones del combustible y la Agencia Internacional de Energía decidió no darle más largas al tema y apoyar el desarrollo del hidrógeno como combustible para lo cual destinó 1.200 millones de dólares, una parte de los cuales va directamente a las ensambladoras de carros para que los desarrollen. La industria automotriz durante muchos años renuente al tema ya muestra resultados: una flota de camionetas Ford funciona con celdas de combustible de hidrógeno.

En Tokio este año se realiza la revisión del segundo año de operación de su grupo de buses urbanos que funcionan con hidrógeno y Europa con menos buses también cumple un año de tener algunos vehículos en operación. Hasta el momento todo parece indicar que será el hidrógeno el combustible de los autos del futuro. La gente podrá acceder a carros movidos por ese combustible. En la

actualidad en los carros que lo usan, una carga del combustible les dura hasta 500 kilómetros.

La ciudad china de **Shanghái** podría ser la primera ciudad del mundo en contar con una completa red de abastecimiento de vehículos de hidrógeno. Calculan que será en **2010**, de esta forma estarían preparados para la llegada de los primeros modelos de coches de hidrógeno.

También se da la circunstancia de que en ese año se celebrará la Exposición internacional 2010 en Shanghái. Después de esta noticia quizá debíamos haber incluido a China en la encuesta sobre los países que serán los primeros en tener coches de hidrógeno circulando por sus calles. Hace tiempo ya se han hecho anuncios de este tipo que nos hacen pensar que la independencia de los hidrocarburos está cada vez más cerca. Tenemos la primera autopista de hidrógeno del mundo planificada para 2009-2010 y que irá desde Whistler a San Diego (EE.UU.). En Europa no será hasta 2030 cuando tengamos una autopista de este tipo, en este caso recorrerá desde Suecia hasta Algeciras (España). En España ya se cuenta con hidrogeneras para transporte público y cada vez en otras ciudades se están construyendo nuevas⁶⁹

Air Liquide es el mayor proveedor de hidrógeno en el mundo. Desde que aparecieron los primeros autobuses alimentados por hidrógeno en algunas ciudades los fabricantes de coches comenzaron a probar sus prototipos, Air Liquide se ha encargado de suministrar gran parte del hidrógeno que utilizan estos vehículos.

La particularidad de este tipo de estaciones (rápidas) está en que son capaces de llenar el depósito en sólo 3 minutos.

La unión Europea tiene un proyecto que se denomina PROCURA que comenzó en enero de 2006 y finalizará en el 2009. Su objetivo es difundir y primor el uso de vehículos de combustibles alternativos como el hidrógeno. A largo plazo las expectativas de la UEE, es que en el 2020 el 20% de los vehículos estén alimentados por biocombustibles y el 5% por hidrógeno.

6.2.1. Distribución del hidrógeno

7.2.1.1 Distribución a los usuarios.

Hidrógeno en forma líquida: Hidrógeno líquido por camión. Parece ser el método de distribución económicamente más efectivo y eficiente en la distribución de hidrogeno, podrían tanquearse en 60000 vehículos, usando solo el 10% de la infraestructura instalada para la producción y transporte en los Estados Unidos.

La mejor alternativa para la distribución del hidrógeno es en forma líquida transportada por medio del carro tanques. En un proyecto de instalar un sistema de distribución de hidrógeno se debe hacer un análisis para cada ciudad.

Tecnología de distribución	Vehículos soportados	Flexibilidad económica	Seguridad relativa	Tiempo perdido
Grandes gasoductos: 17 millones Kg./día	40 millones	Pobre	Media	Larga
Tren	900000	Media	Media	Media
Pequeños gasoductos: 100000 Kg./día	240000	Pobre	Media	Media
Camiones Tanqueros	6600	Buena	Baja	Corta
Electrólisis en casa o en estaciones de llenado	1 Vehículo a 36 Millones	Buena	Alta	Corta

Tabla No. 7. Una comparación de las tecnologías de distribución de Hidrógeno³

7.2.1.2 Costos de la producción y distribución de Hidrogeno.

En la figura 19 se observa un ejemplo del costo del hidrógeno en centavos de dólar por milla en una ciudad, **3** comparado con el costo de la gasolina como combustible, se puede deducir que en la entrega por carro tanque es aún más bajo que el costo de la gasolina.

En las figuras 14 y 15 se presentan las comparaciones económicas entre el costo relativo del transporte del hidrógeno y otros fluidos a diferentes tasas de flujo. Para profundizar sobre este tema ver la referencia⁶⁵. Con el tiempo, el costo del hidrógeno debería alcanzar el equivalente actual de U\$ 2 a U\$ 4 por Kg.⁷⁰

Fuente de energía	Costo de Energía Base	Costo of 1 kg de Hidrogeno
Viento, Nuclear, Solar	3 cents	\$1.24
Industrial	6 cents	\$2.47
Residencial	8 cents	\$3.29

Ahora consideremos las ramificaciones para el público en general. Para viajar 400 millas

- Gasolina Tradicional - 16 galones @ \$4.00/galón = **\$64.00**
- Hidrogeno - 9 kilogramos @ \$2.47/kg = **\$22.23** Ver Referencia70

Hidrógeno es ya una tecnología emergente en la industria energética.

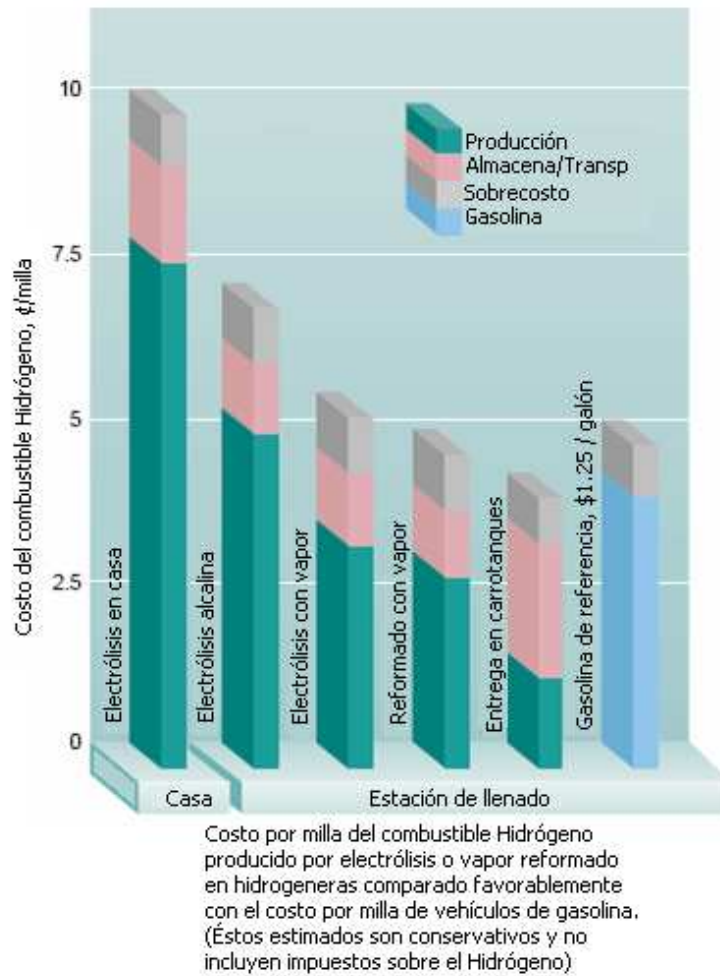


Figura. 19. Costo del Hidrógeno como combustible comparado con el costo de la gasolina65.

7. PRINCIPALES VEHICULOS OFRECIDOS POR LA INDUSTRIA

Entre las compañías más destacadas están la GHW, nacidas de la fusión de Mercedes MTU, la Norsk Hydro Electrolysers AS de Suecia y el astillero HEW BRAND que se dispone a venderle al mundo, además de submarinos, autobuses y automóviles, propulsados por hidrógeno, estaciones de servicio (Hidrogeneras) para recargarlos, ya tiene una en el aeropuerto de Munich que abastece los servicios de rampa y de pista, ver referencia 67,80

7.1 Revolucionario prototipo de hidrógeno

La figura No. 20 es la representación de un prototipo de automóvil movido por hidrógeno propuesto por la compañía General Motors, llamado Hy-Wire. Y del pasado, al futuro... que podría ser presente si hubiera voluntad real de desarrollarlo. La apuesta futurista de esta muestra de prototipos de GM se llama Hy-wire, un vehículo revolucionario que no se parece en casi nada a uno tradicional. Está propulsado por motores eléctricos que se alimentan de una pila que genera 94 kilovatios merced al hidrógeno almacenado en unos depósitos cilíndricos que contienen 2 kilogramos a 350 bares de presión.

Los elementos esenciales están ubicados en su chasis, que en apenas 28 centímetros de grosor aloja la transmisión, propulsión, dirección y frenos; no tiene radiador ni caja de cambios, por lo que dispone de un espacio interior prácticamente diáfano; no contamina y apenas mete ruido: el conductor no dispone de volante circular, sino de dos mandos, adosados a una consola, que engloban acelerador y freno, y que se pueden utilizar indistintamente.

En vez de conexiones mecánicas o hidráulicas, el Hy-wire emplea señales eléctricas que transmite al acelerador, frenos y resto de funciones, agrupadas en un sistema de cable desarrollado por la firma sueca SKF. En el centro de esa consola de conducción hay una pantalla de televisión que permite ver con mayor detalle la carretera, y dos cámaras laterales hacen las veces de retrovisores proyectando la imagen de lo que se deja atrás.

El Hy-wire es muy fácil de conducir, aunque transmite en un primer momento una extraña sensación, vinculada en buena medida a la ausencia de ruido y a la suavidad de reacciones tanto en aceleración como en frenada.

Este prototipo, presentado en el Salón de París de 2002, está revestido por una carrocería de 4,35 metros diseñada por Bertone, en la que el creador italiano ha

procurado resaltar al máximo el espacio y la luminosidad. Tiene grandes ventanillas y las cuatro puertas se abren desde el centro permitiendo un acceso total gracias a la ausencia de pilar de separación. La carencia de motor tradicional ofrece un interior diáfano y sin obstáculos intermedios.

En cualquier caso, lo revolucionario de este modelo está en lo que no se ve. En su falta de bloque motor, en la propulsión por hidrógeno y en la transmisión por cables. La plataforma está diseñada de tal manera que pueda ser ambivalente para su utilización con cualquier otra carrocería del mismo tamaño. De hecho, la de Bertone está anclada al chasis por una docena de pernos ajustables, que permiten montarla o desmontarla en cuestión de minutos. "La enorme ventaja de esta tecnología en este tipo de vehículos innovadores es que no ocupa apenas espacio", señala Bernd Muller, uno de los ingenieros que ha participado en el desarrollo del prototipo. La transmisión de las órdenes podría realizarse sin hilos, "pero esa tecnología no es todavía suficientemente fiable".

¿Tendrá futuro este tipo de vehículos? Aparte de los riesgos que todavía entraña hoy el hidrógeno a presión, los factores clave residen en el coste y la voluntad de los fabricantes de llevarlos a cabo. Las previsiones de GM apuntan a que pueda producirse en 2010. De forma experimental, algunas compañías de distribución están utilizando vehículos con esa tecnología en Washington y Tokio.

1	Los frenos son activados por un computador que recibe señales, no por presión hidráulica.
2	El stock de celdas de combustible crea electricidad del hidrógeno, el cual libera el exceso de calor y vapor de agua en los paneles del radiador.
3	Se obtiene el hidrógeno de una estación de retanqueo en un pueblo cercano a usted, entra a través de una válvula sobre este lado del vehículo.
4	Se llenan tres tanques de hidrógeno comprimido.
5	Una alta prioridad en la investigación sobre el almacenamiento de hidrógeno es que este no escapará durante una colisión. Dos tipos de soportes conectan el chasis a la cabina de pasajeros
6	Provee una fuerte conexión física al puerto universal de acoplamiento de cables de datos.
7	Enlaza la cabina de control a sistemas computarizados sobre la plataforma.
8	La cual envía comandos a los frenos y al motor eléctrico.
9	Y volante de la dirección.
10	El prototipo futuro HY-WIRE pueden incorporar cuatro pequeños motores, uno por rueda, éste es el concepto de autonomía.

Tabla No. 8. Descripción de un prototipo de un automóvil propuesto por la General Motors.

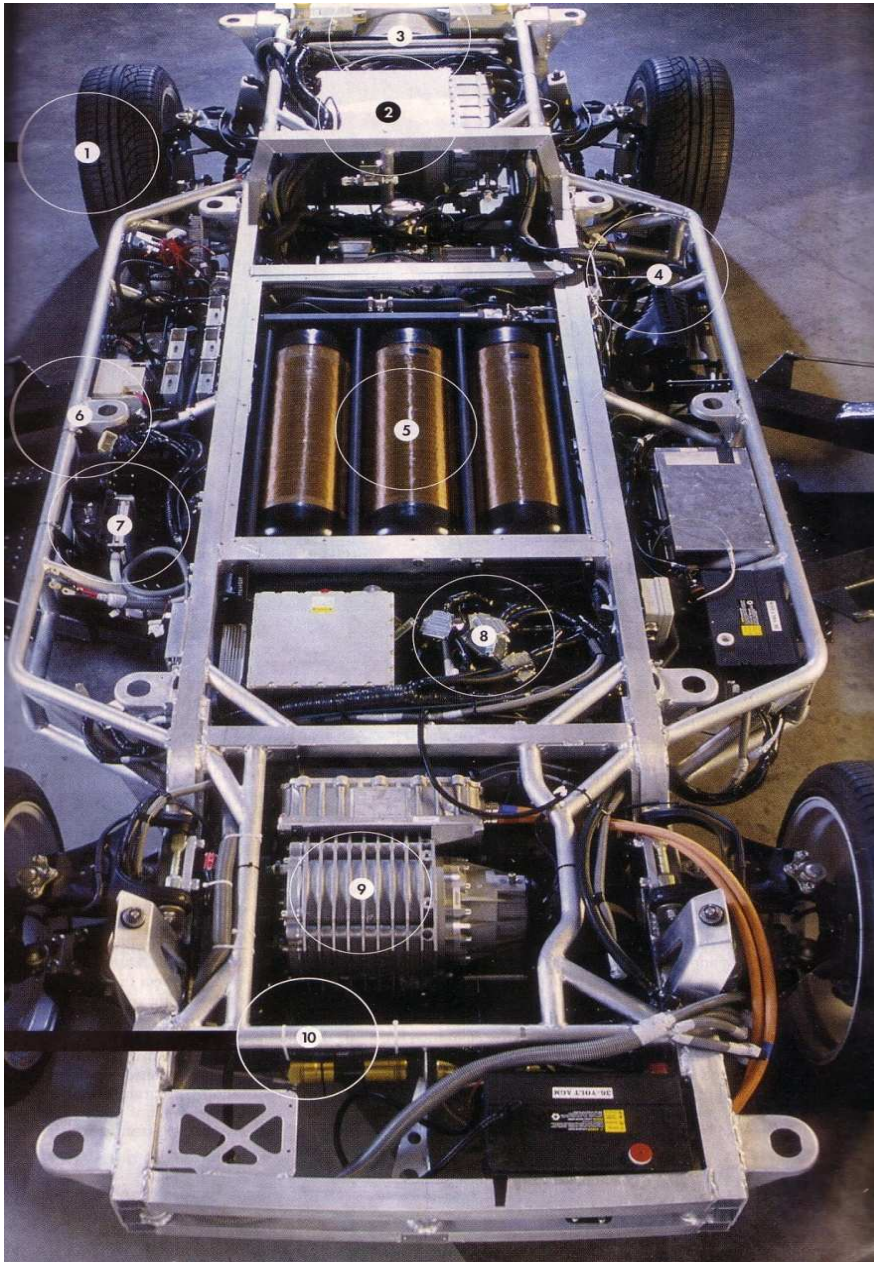


Figura No. 20. Esquema de un automóvil que usa celdas de combustible de la General Motors, su prototipo se llamó Hy-Wire18.

La empresa Ford Motors Company ha lanzado al Mercado una generación de camionetas equipadas con un motor de 6.8 litros B 10 movidos por un motor de combustión interna a hidrógeno que empezaron a circular en el por el área de la Florida en el 2006.

Mercedes- Benz: Daimler Chysler.

La Mercedes Ven ofrece autobuses urbanos de la serie Citaro con propulsión por pila de combustible, algunos países han adquirido estos vehículos como en el caso de la China que los está utilizando la ciudad de Pekín en forma experimental, de ser aprobado en la China esta nueva tecnología el proyecto será adquirido por la Beijing public transport corporation (BPTC) de Pekín, una de las mayores empresas municipales de transporte de todo el mundo con una flota de 17.000 autobuses quien será los que cubran el servicio experimental con los 3 nuevos Citaros con pila de combustible, así, como el grupo petrolero BP quien va a ser el proveedor de hidrógeno.

Este programa es patrocinado por las naciones unidas, la calidad del aire en los grandes núcleos de la población China constituyen hoy un problema serio. Con el fin de reducir la polución se están estudiando las primeras propuestas para suprimir o reducir el tráfico en determinadas zonas y centros urbanos durante los meses de verano.

También se está utilizando para mover sus vehículos las celdas de combustible a base de Metanol, esta celda de combustible se llama Necear.

Australia ha adquirido 3 autobuses de esta clase Citaro con la tecnología de celdas de combustible y se están utilizando en la ciudad de Perth.

Mazda: Esta empresa hace 40 años comercializo su primer motor rotativo, con una menos cilindrada consiguen mayor rendimiento.

8. EJEMPLO DEL USO DEL HIDROGENO EN VARIOS PAISES

En los últimos 10 años se han intensificado las investigaciones y desarrollos (I&D) tecnológicos sobre la energía del H₂, en especial proyectos para producir H₂ a partir de EA. Los dos proyectos más avanzados e importantes son el HySolar entre Arabia Saudita y Alemania (Winter y Fushs, 1991) para obtener H₂ por electrólisis, con electricidad generada por células fotovoltaicas; de esta manera, y así parezca sorprendente, el principal productor mundial y con las mayores reservas de petróleo, aspira a ser un exportador permanente de energía en forma de H₂ solar y se está preparando para ello.

El otro programa internacional exitoso es el Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHPPP), para la producción de H₂ líquido a partir de energía hidroeléctrica barata en Canadá y enviado por barco a Alemania para ser usado en diferentes sectores y fines (Gretz, et al 1994).

El programa japonés iniciado en 1993 y conocido como WENET (World Energy Network) está considerado el más ambicioso e integral, con una inversión de 4 billones de dólares hasta el 2020, propone la utilización de la electrólisis y reformado en el corto plazo y las EA en el mediano (Mitsugi, et al 1998).

En 1999 Islandia sorprendió al mundo cuando anunció su intención de ser la Primera sociedad del H₂ del mundo, se reunieron esfuerzos de SHELL Hidrógeno, Daimler - Chrysler y NorskHydro en una iniciativa multimillonaria para convertir los buses, carros y barcos a H₂ y CC en los próximos 40 años (Arnason, 2000).

También se puede mencionar el Programa del Hidrógeno del Departamento. De Energía de los Estados Unidos, iniciado en 1995, comprende 440 proyectos con un monto anual de 140 millones de dólares y que ha evaluado y comparado las tecnologías del H₂ para determinar procesos de producción potencialmente económicos a partir de las EA. Sin embargo, los fondos asignados son 1/5 de los asignados al carbón y 1/10 de los de la potencia nuclear. Al menos, otros 10 países desarrollados ejecutan programas públicos y privados sobre diferentes tópicos de la energía del H₂ (Mitsugi, et al 1998).

En cuanto a América Latina, los programas de I&D sobre la energía del H₂ son incipientes, se conocen los esfuerzos de Argentina, Cuba y Colombia. La excepción la constituye Brasil verdadero pionero en la sustitución de los CF por EA y en el desarrollo de programas del H₂ basados en hidroelectricidad

(DeSouza, 2000). En proyectos multinacionales, está en construcción el Centro Internacional de Desarrollo de las Tecnologías de la Energía del Hidrógeno,

Auspiciado por la ONU y ubicado en Turquía. También veinte naciones industriales están cooperando en proyectos del H₂ bajo los auspicios de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) y en Europa está en Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte tres: sistema energética basado en el hidrógeno GEOENSEÑANZA. Vol.8-2003 (1). P.49-66 53 ejecución el Europeas Integrated Hydrogen Project (EIHP) (Schriber, 1996). Esta breve relación evidencia lo “dinámico” en el estado actual de la investigación sobre el H₂.

8.1 Latinoamérica

8.1.1 Argentina

En la provincia de la Patagonia, se hacen grandes avances para aprovechar la energía eólica del viento para producir energía eléctrica y producir hidrógeno, sin recurrir a los combustibles fósiles.

En la provincia de Santa Cruz, en la comunidad Koluel Kaike de 200 habitantes, a partir de una tecnología que combina la energía del viento y del hidrógeno, en la cual el ingeniero Juan Carlos Bolcich, presidente de la Asociación Argentina del Hidrógeno, es promotor de este proyecto.

La planta de generación de hidrógeno se ubica a 23 kms de Koluel Kaike, en Pico Truncado, provincia de Santa Cruz, el objetivo de la planta es producir hidrógeno bajo las normas de seguridad, probarlo como generador de energía, para equipos electrogénicos, vehículos, cocinas y máquinas industriales. La Patagonia tiene un alto potencial de energía eólica debido a sus vientos fuertes y constantes. Con esa potencia los aerogeneradores de la planta de generación producen electricidad, que alimenta un electrolizador.

Mediante electrolisis, se rompen las moléculas de agua y se obtiene hidrógeno y oxígeno. Este procedimiento permite el almacenamiento de hidrógeno, ya probado como combustible de motores.

El hidrógeno podrá sustituir al petróleo, los combustibles fósiles contaminan, son caros y se acaban, este será inagotable.

8.1.2. Un auto a hidrógeno made in Argentina

No contamina, fue presentado un prototipo alimentado por este gas, cuyo residuo es vapor de agua. NECOCHEA.- Esta ciudad bonaerense ubicada a 500

kilómetros de la Capital Federal fue el escenario elegido para presentar en sociedad el primer auto argentino a hidrógeno. Es el prototipo de una tecnología que intenta, disminuir la contaminación ambiental: el producto final de la combustión del hidrógeno no es otra cosa que vapor de agua.

La elección de esta ciudad, cabecera de un partido de 80.000 habitantes, no es casual. Allí, la Usina Popular Cooperativa de Obras, Servicios Públicos y Sociales (UPC), que abastece de fluido eléctrico a toda la comunidad, encara un proyecto singular, que estará listo antes de fin de año. Se trata de una planta demostrativa de generación de energía eléctrica y producción y almacenamiento de hidrógeno a partir de turbinas eólicas, sofisticados molinos accionados con un recurso que en esta ciudad sobra, es gratuito, limpio e inagotable: el viento. Una manera de demostrar que el hidrógeno producido a través de energía eólica puede poner en marcha lo que hoy se moviliza *quemando* combustibles fósiles (petróleo o gas) es tener a mano un vehículo alimentado con este combustible.

El automóvil desarrollado por los físicos e ingenieros de la AAH posee un motor clásico de combustión interna. Transforma la energía química del combustible en trabajo mecánico que mueve las ruedas. Está preparado para funcionar tanto con nafta como con hidrógeno, pero la autonomía con este gas es mucho menor: por el momento, 60 kilómetros. El límite lo da la capacidad de almacenamiento del gas a presión en un tubo ubicado en el baúl. Pero, ¿es peligroso un auto que funciona con un gas tan inflamable como el hidrógeno? "Existen normas internacionales que permiten utilizarlo con total confiabilidad",

La adaptación del primer auto a hidrógeno argentino implicó un gasto de entre 4 y 5 mil dólares. "Para nosotros, es un primer paso que demuestra que esta tecnología puede reemplazar a los combustibles contaminantes", agregó. En nuestro país existen casi 500.000 vehículos que funcionan con GNC, cuyas emisiones de monóxido de carbono, y otros residuos tóxicos no superan las recomendaciones ambientalistas internacionales.

El gran problema del gas natural es que no difiere demasiado de la gasolina y del Diesel, en materia de emisiones de dióxido de carbono, el principal responsable del efecto invernadero. "Por eso, tarde o temprano, también el gas deberá ser reemplazado por energías limpias y renovables". En el 2003, la firma Mercedes-Benz lanzará el primer auto fabricado en serie alimentado a hidrógeno. Serán unos 100.000 vehículos por año, pero se calcula que su precio duplicará al de los actuales.

8.1.2.1. Distintas opciones

En materia de automóviles no contaminantes, los híbridos y los vehículos a celda de combustible son tecnologías, más avanzadas. "En el primer caso, se utiliza un motor de combustión interna con un generador eléctrico que permite cargar

baterías y dan al vehículo una autonomía de 20 o 30 kilómetros, ideales para transporte público.

8.2 Europa

Europa está investigando mucho sobre el hidrogeno, debido al impacto ambiental, el costo que en estos momentos está a 100 dólares el barril y agotamiento de las reservas de petróleo, están haciendo grandes investigaciones sobre como implementar la tecnología del hidrogeno para el transporte, como ejemplo se cita el programa de estudio que se ofrece en una Universidad de España⁸³

TEMA 1: Evolución de los sistemas energéticos. Demanda emergencia. Energía y Medio ambiente. Cambio climático (2 horas).

TEMA 2: Características del hidrógeno
• Propiedades del hidrógeno (1 hora)

TEMA 3: La economía del hidrógeno
• Hidrógeno como vector. Sistemas de Hidrógeno (1 hora)

TEMA 4: Producción de hidrógeno (2 horas)
• A partir de combustible fósiles.
• Utilizando el reformado del gas natural "Reforming Gas Natural"o Cracking Térmico.
• Oxidación Parcial. Gasificación de Carbón

TEMA 5: Producción de hidrógeno a partir de biomasa (2 horas)
• Procesos Biológicos. Procesos Térmicos

TEMA 6: Producción de hidrógeno mediante electrólisis (4 horas)
• Principios de Electrólisis. Estado actual. Materiales.
• Tipos de Electrolizadores

TEMA 7: Otros métodos de producción de hidrógeno (2 horas)
• Procesos Biológicos. Procesos Fotoquímicas. Procesos Foto electroquímicos. Procesos termoquímicos.

TEMA 8: Purificación de hidrógeno (1 hora)
• Tecnología de membranas.
• Tecnología PSA
• Otras Tecnologías.

TEMA 9: Almacenamiento de hidrógeno (3 horas)
• Almacenamiento como Gas.

- Almacenamiento como Líquido
- Almacenamiento en Materiales
- Mecanismos
- Tipos de Materiales

TEMA 10: Compresión de hidrógeno (1 horas)

- Características. Tipos de compresores

TEMA 11: Transporte y distribución de hidrógeno (2 horas)

- Tipos de Transporte.
- Transporte por Tuberías
- Características de Materiales

TEMA 12: Conversión energética de hidrógeno (2 horas)

- Combustión catalítica
- Motores combustión Interna
- Turbinas

TEMA 13: Principios de pilas de combustible (4 horas)

- Introducción
- Termodinámica, Reacciones Cinéticas, transporte de carga y transferencia de masa en pilas de combustible

TEMA 14: Tecnología de pilas de combustibles

- Tipos de pilas. Sistemas. Integración. Impacto ambiental.

TEMA 15: Seguridad del hidrógeno (1 hora)

- Códigos Standard.
- Seguridad en los diferentes subsistemas.
- Sensores de hidrógeno

TEMA 16: Usos del hidrógeno en el sector transporte (2 horas)

- Transporte
- Terrestre.
- Transporte aéreo.
- Transporte espacial.
- Transporte marítima

TEMA 17: Usos del hidrógeno en el sector estacionario (2 horas)

- Sistemas integrados.
- Aislados.
- Sistemas distribuidos
- Hidrógeno como almacenamiento de energía.

TEMA 18: Usos del hidrógeno en el sector portátil (1 hora)

- Hidrógeno como vector. Sistemas de Hidrógeno (1 hora)
- usos en ordenadores, teléfonos.
- Análisis comparativo con baterías.

TEMA 19: Análisis ciclo de vida (2 horas)

- Hidrógeno como vector. Sistemas de Hidrógeno (1 hora)
- análisis ciclo de vida de sistemas hidrógeno.
- Análisis ciclo de vida gas natural.
- Análisis ciclo de vida energías renovables.
- WELL-WHEEL. TANK-WHEEL.

TEMA 20: Análisis económico (2 horas)

- Análisis de los diferentes sistemas hidrógeno.

TEMA 21: Estado actual de la “economía hidrógeno” (2 horas)

- Revisión de políticas internacionales, nacionales y regionales.

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. ULPGC
Actividades en Ciudad de Zaragoza España⁸³

La ciudad de Zaragoza, Aragón España ha incorporado autobuses alimentados con celdas de combustible y han construido varias hidrogeneras para el retanqueo.

8.3 Estados unidos y Canadá

Los "tres grandes" fabricantes de autos junto con otras pequeñas compañías Independientes están trabajando en Celdas de Combustible.

8.3.1 Chrysler

Chrysler ha contratado a Delphi Automotive Systems para desarrollar un sistema para automóviles a base de celda de combustible. Delphi ha puesto una orden de compra por \$4 millones de USA dólares con Ballard Power Systems para las celdas de combustible que se usarán en el sistema.

A principios de 1997, Chrysler reveló un modelo a escala real de un vehículo movido a base de un sistema de celdas de combustible que podría emplear gasolina. El sistema de las celdas de combustible emplea un reformador del combustible, desarrollado por Arthur D. Little Inc., el cual convierte gasolina y otros

combustibles líquidos en hidrógeno "a bordo". Chrysler está también trabajando con la industria del petróleo.

Chrysler está en la etapa de la experimentación de autos con celdas de combustible y empezarán a comercializarse para 2015.

8.3.2 Ford Motor Corporation

Ford ha establecido su programa P2000 para producir un sedán familiar ligero altamente avanzado. El concepto del automóvil P2000 actuará como plataforma para varios sistemas motores avanzados incluyendo celdas de combustible. Ford ha trabajado con Ballard, International Cells y con Mechanical Technology Incorporated en este proyecto.

En diciembre de 1997, Ford inició su tecnología de autos eléctricos junto con \$420 millones de USA dólares, a una nueva alianza internacional de vehículos provistos con celdas de combustible junto con Ballard y Daimler-Benz. Ballard será el propietario mayoritario de la compañía que suministre las celdas de combustible. Daimler-Benz será dueño mayoritario de la compañía que desarrolle los sistemas de motores empleando celdas de combustible y Ford será el principal propietario de una compañía que desarrolle los sistemas de transporte eléctrico.

8.3.3 General Motors

General Motors está trabajando con Delphy y Ballard y actualmente está ofreciendo automóviles movidos por celda de combustible, utilizando celdas de combustible alimentadas con hidrógeno a partir del metanol.

8.3.4 Ballard Power Systems

Ballard es el proveedor líder de celdas de combustible de membrana intercambio protónico (PEM) para aplicaciones de transporte. Esta compañía ha recibido pedidos de fabricantes de autos de todo el mundo y se encuentra desarrollando motores a celdas de combustible comerciales junto con Ford y Daimler-Benz. El primer vehículo de demostración "real" que empleó tecnología moderna de celdas de combustible fue un autobús de 32 pies lanzado en 1993 por Ballard. Un autobús de segunda generación Ballard se encuentra bajo pruebas ya en las calles en Canadá y los Estados Unidos. La ciudad de Chicago en Illinois se encuentra operando 3 de estos vehículos en campo.

8.3.5 Energy Partners

Energy Partners ha anunciado el primer auto para pasajeros movido por celdas de combustible, un auto deportivo llamado "el auto verde". Energy Partners se ha

unido a John Deere Corporation en un proyecto para desarrollar vehículos a celda de combustible de usos múltiples basado en el vehículo de Deere llamado "Gator". En octubre de 1997 los vehículos comenzaron a hacer demostraciones en el aeropuerto Regional de Palm Springs transportando primordialmente personal, equipo de mantenimiento y cargas pequeñas dentro de las instalaciones del aeropuerto.

8.3.6 Universidad de Georgetown

La Universidad de Georgetown está trabajando con Ballard, International Fuel Cells, con los fabricantes de autobuses NOVABUS y otro bajo contrato con el Departamento de Transporte de USA para desarrollar autobuses tamaño "natural" energizados con celdas de combustible tipo PEM y PAFCs. Georgetown ha conseguido realizar la primera demostración en USA. Entregó tres autobuses al comienzo de 1991 impulsados por celdas de combustible de ácido fosfórico bajo contrato con el Departamento de Energía de los USA.

8.3.7 H-Power

9 H-Power fue el integrador del sistema usado en el programa original de Georgetown y el Departamento de Energía y ahora hace celdas de combustible tipo PEM para una variedad de aplicaciones en automóviles especiales.

8.3.8 International Fuel Cells

International Fuel Cells (IFC) ha hecho demostraciones de manera muy exitosa con un sistema a base de celdas de combustible tipo PEM de 50 Kw usando hidrógeno más aire del ambiente. El sistema es altamente compacto, unos 9 pies cúbicos de espacio, y será muy apropiado para automóviles. IFC está también trabajando para desarrollar una celda de combustible PAFC de 100 Kw para un autobús.

8.3.9 Plug Power, L.L.C

Plug Power, L.L.C. es una inversión conjunta entre un subsidiario de DTE Enrgy Co., y el Mechanical Technology Inc. de Latham, Nueva York. Junto con Arthur D. Little Inc., y Los Álamos National Laboratory, Plug Power ha demostrado exitosamente una celda de combustible en operación empleando un producto reformado de gasolina.

Este grupo se encuentra ahora concentrado en integrar este sistema a un vehículo. Dicho sistema se espera sea el doble de eficiente que un motor a gasolina de combustión interna con alrededor de 90% menos emisiones.

Será en Canadá, en el 2009, en la región de la Columbia británica. Por ella circularán 20 autobuses que realizarán el recorrido entre Whistler, Vancouver y Victoria.

A lo largo de este recorrido se creará una red de estaciones de servicio de hidrógeno o *hidrogeneras* que abastecerán esta flota de autobuses. Se estima que en 2010 esta autopista podría llegar a la ciudad californiana de San Diego. Se convertirá así en la primera autopista del mundo en la que un coche alimentado por hidrógeno podrá recorrerla de principio a fin sin problemas de repostaje.

9. DESVENTAJAS DEL USO DEL HIDROGENO

Según el estudio elaborado por el MIT (Instituto tecnológico de Massachusetts) dice que las pilas de combustible no contaminan en absoluto, no sucede lo mismo con la elaboración del hidrogeno, así el MIT indica que producir Hidrogeno a partir del gas natural licuado o gasolina, consume grandes cantidades de energía, y emite gases que contribuyen al efecto de invernadero, la solución sería aplicar el método de la captura del CO₂.

- Aunque el hidrógeno es muy abundante en la Tierra, hay que “extraerlo” de los compuestos donde está y todavía no se encuentra una fuente de energía eléctrica barata para descomponer el agua.
- Tiene una temperatura de licuefacción extremadamente baja (20 K).
- El Costo de producción es muy elevado. Pero la investigación sigue y los costos han disminuido.
- El transporte de hidrógeno gaseoso por gasoductos es menos eficiente que para otros gases, los contenedores para su almacenaje son grandes y el almacenamiento de cantidades adecuadas de hidrógeno a bordo de un vehículo todavía representa un problema significativo.
- Es difícil de detectar sin sensores adecuados ya que es incoloro, inodoro y su flama en el aire es casi invisible y es inflamable.

10. VENTAJAS AMBIENTALES DEL USO DEL HIDROGENO

10.1 Un informe de la National Hydrogen Association de EEUU elige los vehículos de hidrógeno como la mejor alternativa de futuro

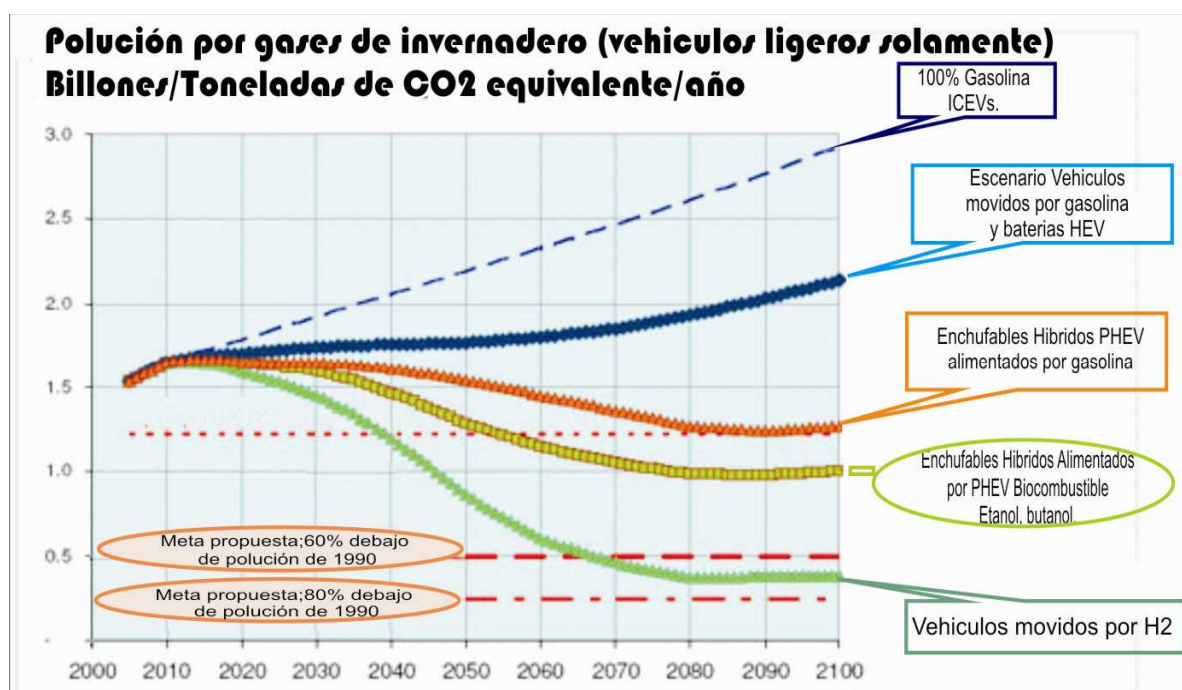


Figura No. 21. Comparación de la polución generada por el uso de los diferentes tipos de combustibles en el tiempo⁷².

La «[National Hydrogen Association](#)» americana⁷² emitió un informe el pasado mes de Marzo donde analiza las diferentes alternativas de transporte con combustibles no hidrocarburos. El informe se titula: «**COMPARISON OF TRANSPORTATION OPTIONS IN A CARBON-CONSTRAINED WORLD: HYDROGEN, PLUG-IN HYBRIDS AND BIOFUELS**» ver figura No. 21.

Se analizaron los vehículos movidos con hidrógeno (**FCV**), los híbridos (**HEV**) y los enchufables híbridos (**PHEV**) alimentados por biofuel (ethanol y butanol). El

informe aporta una serie de datos y gráficos donde se hacen unas estimaciones a muy largo plazo, hasta final de este siglo.

Las conclusiones del informe son demoledoras en favor de los **vehículos de hidrógeno**:

- **Reducciones de gas invernadero: Los vehículos de hidrógeno son la única opción** que puede conseguir reducir los niveles de gas invernadero del año 1990 en un 60% o más. La segunda mejor opción son los alimentados por etanol (PHEV) que podrían reducirlas en un 20% y no antes del año 2090.
- **Polución del aire urbano: Los vehículos de hidrógeno son la única opción** que puede eliminar virtualmente la polución del aire en vehículos de transporte de aquí al año 2.100. Otras alternativas como el etanol producirían una polución similar o mayor a la actual.
- **Consumo de Petróleo: Los vehículos de hidrógeno son la única opción** para conseguir una quasi-independencia del petróleo y esta llegaría a mitad de este siglo. El etanol llegaría a final de siglo consumiendo aún 5 millones de barriles por día.
- **Infraestructura del hidrógeno:** El costo resultante de crear la infraestructura necesaria para el transporte mediante hidrógeno es pequeña comparada con el costo actual del mantenimiento de la de gasolina y diesel.
- **Costos sociales: Los vehículos de hidrógeno proporcionan mayor ahorro en costos sociales** que otras alternativas. Solo la venta de vehículos de hidrógeno frente a los de gasolina producen un factor de ahorro de 7.6 de aquí a 2020. En los costos sociales estarían incluidos los derivados de la sanidad pública por la polución del aire.

11. SEGURIDAD EN EL MANEJO DEL HIDROGENO

11.1 Escape y fuego

Debido a su pequeño peso molecular, el hidrógeno se puede escapar con mayor facilidad que otros gases. Se sigue que la mayor emergencia asociada al transporte de Hidrogeno es la fuga. El rango de limite de inflamabilidad, del hidrogeno es usualmente grande varia del (4 al 75)% en volumen, con aire a temperatura y presión normal (el gas natural los limites son del (5- 15)%, la temperatura de ignición del Hidrogeno (570 °C) es más alta que la mayoría de C-H, (200- a 370 °C) pero su energía de ignición (La cantidad de energía necesaria para que encienda el Hidrogeno) está en el orden de baja magnitud (energía de ignición 0,02 mj al 30% de Hidrogeno en el aire a presión estándar, mientras que 0,3 mj para gas natural, como se indica en la tabla siguiente:73

	Tamaño completo de dureza Charpy. Energía absorbida (J)	
	Mínimo alguna muestra	Promedio de tres muestras
Accesorios		
NPS 44 y superiores	39	52
NPS 44 - NPS 38	35	44
NPS 36 - NPS 16	26	35
Válvulas		
NPS 16 y superiores	20	26
Planchas		
NPS 44 y superiores	39	52
NPS 42 - NPS 38	35	44
NPS 36 - NPS 16	26	35

Tabla No. 9. Estándares de los requerimientos para dureza de accesorios, válvulas y flanches para servicio con hidrogeno (NPS 16 y mayores) 13

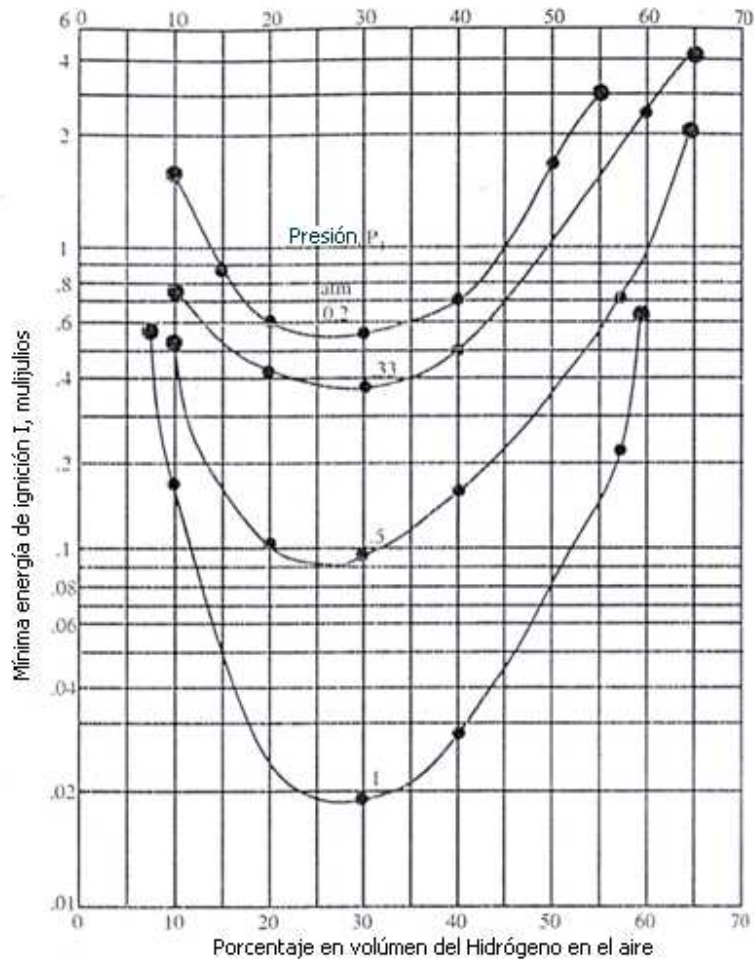


Figura No. 22. Energía para la chispa de ignición de hidrogeno en aire (ANSI NFPA Standard 50 A) 13

Como se indica en la Figura No. 22, esta energía de hidrógeno disminuye con la presión, por consiguiente la posibilidad de que una chispa afecte la ignición se aleja cada mas para altas presiones. Otro ejemplo de consideración de seguridad es que ningún punto de inflamación será aprobado para las facilidades con el hidrógeno. Una vez encendido la velocidad de la llama esta en el orden 10 veces más alta para hidrógeno que para gas natural (1.87 – 3 M/S Vs. 0.03 - .3 M/S para gas natural) (ANSI /NFPA estándar 50A 1984).

La llama del hidrógeno puro es casi invisible, y se caracteriza por su bajo grado de radiación en los alrededores del área. La llama del hidrogeno es igualmente menos propensa que la llama del hidrocarburo para encender otros materiales combustibles por radiación. Puesto que una llama de hidrógeno es casi invisible es difícil de detectar visiblemente, lo cual hace más peligroso para el personal que una llama de hidrocarburo.

Esta energía del hidrogeno decrece con la presión, consecuentemente la posibilidad de que la chispa afecte la ignición del hidrogeno es más grande a mayor. Presión. Otro ejemplo de consideraciones de seguridad.

El hidrógeno es un gas extremadamente inflamable. Reacciona violentamente con el flúor y el cloro, especialmente con el primero, con el que la reacción es tan rápida e imprevisible que no se puede controlar. También es peligrosa su despresurización rápida, ya que a diferencia del resto de gases, al expandirse por encima de -40°C se calienta, pudiendo inflamarse.

11.1.1 Datos de inflamabilidad y combustión

- La inflamabilidad en el aire a 20 grados centígrados y 101 kPa: baja a 4%; alto 74.5%.
- Temperatura mínima de auto ignición a 101.3 kPa: 520-570 grados centígrados.
- Máxima temperatura de auto ignición a 101.3 kPa 677 °C: La mínima energía de combustión del hidrogeno es tan baja como 0.02 mJ, al menos 10 veces más bajas que para los hidrocarburos (0.28 para metano y 0.25 para propano).
- Combustión estequiométrica.
- Temperatura de llama: 1430 grados centígrados a 2150 grados centígrados velocidad de la llama.

11.2 Físicos

El gas es más ligero que el aire. El gas se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.

11.3 Químicos

El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. Reacciona violentamente con aire, oxígeno, cloro, flúor y oxidantes fuertes originando peligro de incendio y explosión. Los metales catalizadores tales como el platino o el níquel aumentan este tipo de reacciones.

11.4 Incendios

Evitar las llamas, no producir chispas y no fumar. Extremadamente inflamable. Su rango de inflamabilidad es muy grande. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión. Si es posible, cortar el suministro. Si se puede y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el fuego se extinga por sí mismo. Apagar con agua pulverizada, polvo, dióxido de carbono y halón. El hidrógeno cuando se produce fuego o explosión se quema con una llama casi invisible.

11.5 Explosión

Las mezclas gas/aire son explosivas. Como prevención se debe tener la ventilación adecuada. Las herramientas manuales no deben generar chispas. Los equipos eléctricos y de alumbrado deben estar preparados a prueba de explosión.

El incendio debe combatirse desde un lugar protegido. La explosión de una mezcla Hidrógeno-aire es muy diferente a la que ocurre como resultado de un escape o ruptura o escape de una tubería. Los límites de detonación de una mezcla Hidrógeno – aire varían del 18% al 59% en volumen. Puesto que la molécula de Hidrógeno tiene muy poca masa, esta se eleva muy rápidamente en el aire. A menos que el escape ocurra en una región confinada (un espacio cerrado), es improbable que una concentración del 18% se pueda alcanzar. Además, la energía de ignición es muy grande comparada a la requerida para la combustión.

11.6 Derrames y fugas

Para comprobar si existen escapes, utilizar agua y jabón. Evacuar la zona de peligro. Ventilar las áreas cerradas para prevenir la formación de atmósferas inflamables o deficientes de oxígeno. La ventilación puede ser manual o mecánica. Eliminar todas las fuentes potenciales de ignición. Para ayuda adicional, consultar a un experto. Llevar equipo autónomo de respiración.

11.7 Exposición

El hidrógeno no es tóxico y está clasificado como un simple asfixiante. La cantidad necesaria para reducir las concentraciones del oxígeno en un nivel inferior al requerido para soportar la vida causaría mezclas dentro de los rangos de inflamabilidad. Por tanto, se prohíbe la entrada en áreas que contengan mezclas inflamables debido al peligro inmediato de incendio o explosión. El hidrógeno se puede absorber por inhalación y a través de la piel.

Al ocasionarse pérdidas en zonas confinadas, este líquido se evapora muy rápidamente originando una saturación total del aire, pudiendo producir asfixia,

dificultad respiratoria, y pérdida de conocimiento. Como prevención se debe tener la ventilación adecuada introduciendo aire limpio.

En contacto con líquido se produce la congelación. Como prevención se debe de utilizar guantes aislantes del frío y traje de protección.

11.8 Liberación en áreas confinadas o cerradas

La "Capacidad de orificio" o la tasa a la cual escapará a través de un hueco de un tamaño dado es tres veces más grande para hidrógeno sobre una base volumétrica que para gas natural. Pero, a causa la menor capacidad de calentamiento, el escape de energía es solamente 0.93 veces más grande.

Si el hidrógeno escapa dentro de un espacio confinado alcanzará el límite inferior de inflamabilidad en volumen en 0.26 el tiempo, o 3.78 veces más rápido de lo que alcanzaría el gas natural. En este punto sin embargo, la energía contenida dentro del espacio confinado podría ser liberada en forma de fuego o explosión que esto es solamente la cuarta parte de la energía de un 5% de una mezcla de gas natural que ocupara el mismo volumen. Así, relativamente pequeñas explosiones de hidrogeno pueden ser contenidas dentro de las paredes de un tubo de ensayo en el laboratorio, mientras que las explosiones de gas natural no se podría.

Si no ocurre ignición y el escape continua dentro del espacio confinado, el hidrógeno alcanzara el límite del 75 % en aire y empezará a ser seguro en 1.6 veces más periodo de tiempo que lo que alcanzaría el gas natural en condición segura, que es arriba del 15%. Sin embargo, en casos prácticos, algunos grados de ventilación se alcanzan y es muy posible que el hidrógeno alcance su punto superior de inflamabilidad, mientras que el gas natural puede hacerlo más rápido.

11.9 Liberación en espacios no confinados

Si la liberación del hidrógeno ocurre en un espacio no cerrado, se observa que el hidrógeno se mueve lejos del punto de liberación, más rápidamente que el gas natural, por dos razones: - La densidad del hidrógeno es solamente la cuarta parte de la del aire (1/4), comparada con alrededor de las dos terceras partes del gas natural (2/3), así su tendencia a subir es mucho más grande.- Su tamaño molecular más pequeño hace que la tasa de difusión en aire sea 2.82 veces más rápida que el gas natural.

Si se crea una mezcla inflamable la energía de ignición más baja del hidrógeno causará que este se encienda más rápidamente que el gas natural. Puesto que la energía de ignición para el hidrógeno es solamente 0.02 mJ, una chispa estática invisible puede contener esta energía. Así, es más difícil eliminar las fuentes de ignición para gas natural que para hidrógeno. Una vez ocurre la llama, la tasa de propagación de la llama está entre 6 y 100 veces más rápido para hidrógeno que

para gas natural dependiendo de la relación de aire. Aunque es demasiado rápida la combustión del hidrógeno puede ocurrir la detonación del hidrogeno en mezcla con el aire es diferente en un espacio no confinado.

11.10 Efectos de temperatura particulares del hidrogeno

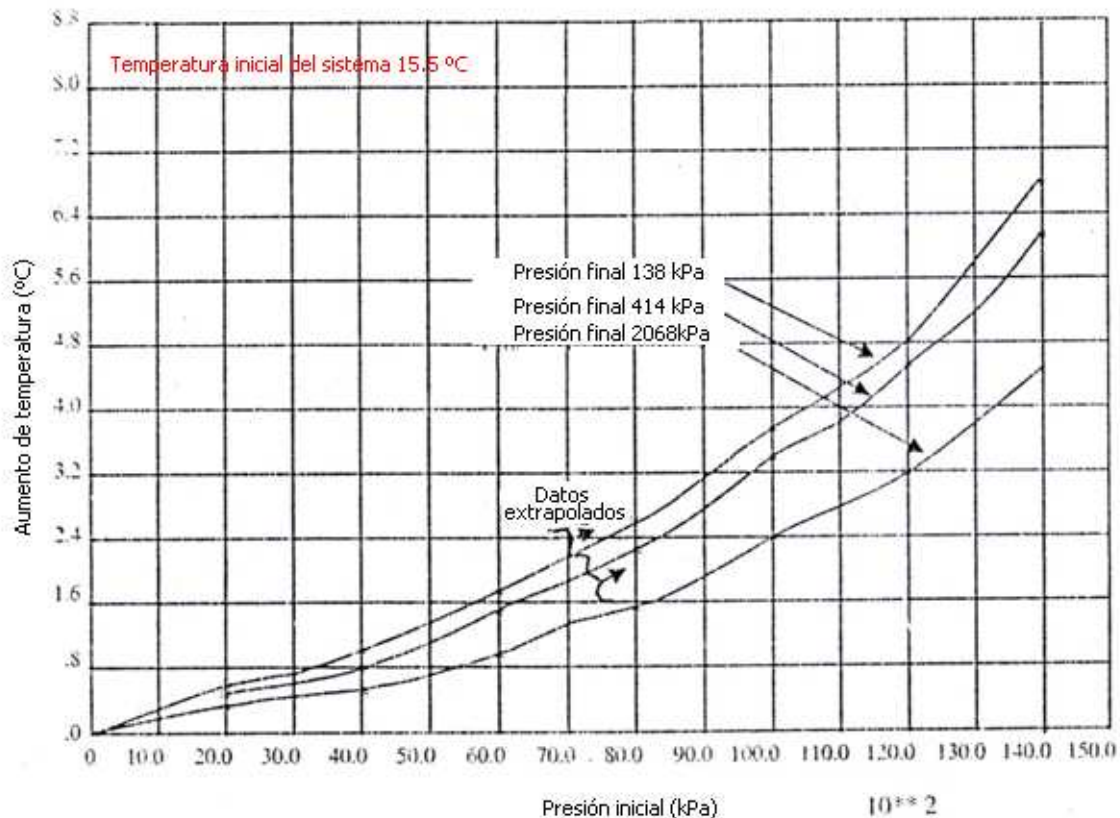


Figura No. 23. Efecto Joule Thompson sobre el hidrogeno (la temperatura calculada aumenta arriba de la expansión) 13.

El Hidrógeno tiene una temperatura de inversión de -43°C por debajo de la temperatura ambiente. La temperatura de inversión del gas natural es 677°C . A temperatura ambiente a diferencia del gas natural, el hidrogeno sufre un incremento de temperatura después de la expansión se calienta. La extensión del aumento en temperatura depende de la caída de presión de la temperatura inicial del gas y de la tasa de intercambio de calor entre el hidrógeno y el medio ambiente. Este efecto joule Thompson tiene un efecto en los componentes plásticos (ver la figura No. 23).

12. PRECAUCIONES EN EL DISEÑO DE LÍNEAS DE HIDROGENO

Para asegurar que una línea que conduzca gas hidrogeno esté libre de escapes y opere con seguridad ciertas características de seguridad deben considerarse. Estas incluyen dispositivos para cerrar el sistema y una instalación de tubería soldada. Un dispositivo de purga para asegura que aire o humedad entren en la línea en caso de un disparo. una característica en el diseño debe incorporar una estación de purga con nitrógeno y una línea de venteo como se muestra en la figura a continuación

Por razones de seguridad medidas de prevención deben tomarse cuando se diseña arreglos de tubería, estos componentes incluyen:

- Eliminación de ingreso de aire o oxígeno a la tubería. (use componentes soldados siempre que sea posible).
- Eliminación de fuentes de ignición.
- Diseño de un sistema contra la electricidad estática. La descarga de hidrogeno a la atmósfera debe ser orientada hacia abajo.
- Eliminación de áreas confinadas.
- Uso de sistemas resistentes a impactos de presión y que sean explosión-proof.
- Uso de un sistema de supresión y válvula de seguridad en el interior de área confinadas.

12.1 Características de diseño de tuberías

12.1.1. Características de seguridad

Para asegurar que no haya fugas y que las operaciones con hidrogeno sean seguras ciertas características deben ser consideradas. Estas provisiones incluyen un sistema de cierre total y un sistema de facilidades de tubería completamente soldado (Donde sea posible). Una característica de diseño incorpora una estación de purga, con Nitrógeno que suministra una presión positiva en la línea de descarga.

Por razones de seguridad, las medidas de seguridad deben tomarse en cuenta al hacer un diseño de arreglo de tuberías:

- Eliminación de fuentes de ignición.

- Eliminación de ingreso de aire o oxígeno dentro del sistema de tubería, use componentes soldados cuando sea posible.
- Diseño contra electricidad estática, las descargas de hidrógeno a la atmósfera deben orientarse hacia abajo.
- Eliminación de áreas confinadas.
- Uso de sistemas resistentes a prueba de explosión y reintentes a choques de presión en áreas confinadas.
- Uso de un sistema de válvula de seguridad de presión en áreas confinadas.

12.1.2 Diseño de medidores

Las facilidades de una estación típica de medición para servicios de Hidrógeno se muestra en la Figura 24, Una estación de medición aconsejable para hidrógeno debe ser capaz de exactamente medir el máximo flujo a unas condiciones de presión y temperatura especificadas. Ya sea medidores tipo turbina u orificio.

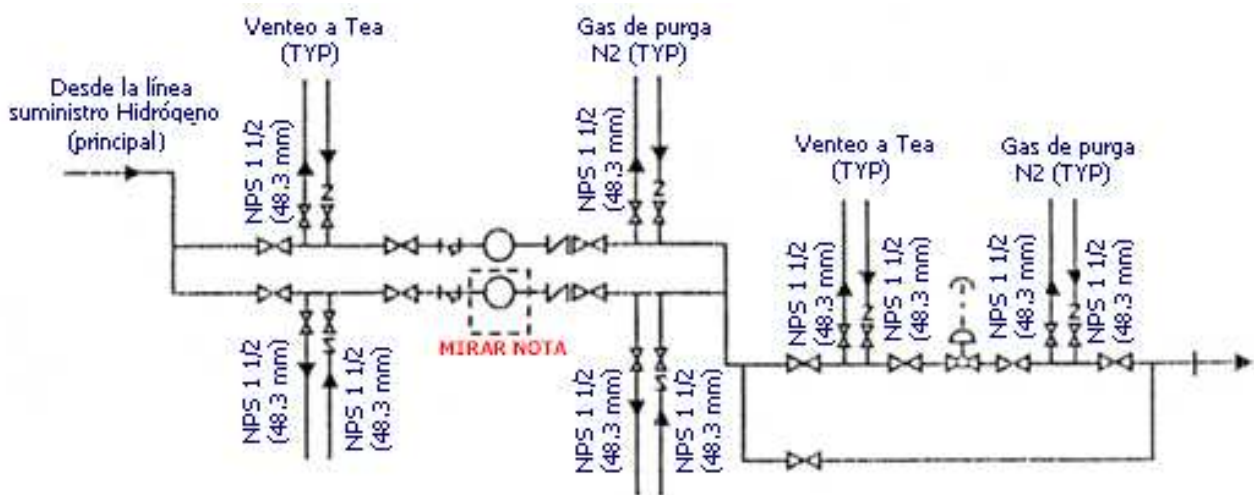


Figura No. 24. Sistema de medición típica en una estación que controla una línea de bombeo de hidrógeno13

En un ambiente adverso, parte de uno o más medidores, deben ser encerrados en un modulo de instrumentación. Esto permitirá que las tomas de de muestras de humedad y densidad sean tomadas de la corriente de flujo actual, sin embargo un modulo aislado limita tanto los manómetros, la longitud de la línea y el rango de temperatura de operación.

En un modulo encerrado se requiere de un equipo de detectores de gas hidrogeno, y tener una ventilación para al menos 8 cambios de aire/hora.

12.1.3 Válvulas, flanches y accesorios

En la tabla siguiente se encuentra un resumen de alguna tipo de válvulas usadas en las plantas de hidrógeno. En las facilidades de las plantas de hidrógeno. La experiencia en la industria indica que las válvula “sello blando” son normalmente usadas para servicio de gas natural son inadecuadas para aplicaciones de hidrogeno a alta presión, deben usarse válvulas de tipo sello duro para absolutamente cero escape todos las válvulas para servicio de hidrogeno se necesitan ser sometidas a una prueba de sello en los asientos con gas helio, el helio es un gas que suministra el sello más seguro para los asientos de las válvulas.

Tipo de Válvula	Fabricante	Condición	Comentarios
1. compuerta globo cheque / bola	Tufflin Jamesbury	-	No coloque la válvula horizontalmente en la tubería
	KYMR	-	-
2. Bola / Compuerta	Cámeron	Alta presión / temperatura (cierre positivo).	-
		Presión moderada/ temperatura	-
3. Compuerta	-	Baja presión / temperatura	Estilo antiguo principalmente se usa en posición vertical
4. Compuerta	Flexitallie Int. Ltda. (FIVE)	Alta presión / Temperatura (cierre positivo)	-

Tabla No. 10. Tipos de válvulas usados en servicios con hidrogeno¹³

13. CONCLUSIONES

- El propósito de una economía hipotética en la cual el hidrógeno suministrara la energía motriz (para automóviles u otro tipo de vehículos) o electricidad (para aplicaciones estacionarias) se deriva de la reacción hidrogeno (H₂) con oxígeno. Mientras el propósito primario es eliminar el uso de los combustibles fósiles y así reducir las emisiones del dióxido de carbono (CO₂), un segundo objetivo es proveer un portador de energía para reemplazar los altísimos costos de los suministros de petróleo.
- El empleo del hidrógeno como combustible ya es una realidad que se está llevando a cabo en muchos países de Europa, Japón y Estados Unidos, la forma más exitosa es a través de celdas de combustible, para los inversionistas ha resultado muy rentable. Desde el punto de vista ambiental la obtención del hidrógeno debería ser de energías renovables pero esto no es posible por lo tanto se debe recurrir a los combustibles fósiles como el gas natural que ocasionaría gases de efecto invernadero, con los métodos de captura del CO₂ estos problemas ambientales podrían resolverse.
- En nuestra sociedad el dinero que se gasta en el combustible empleado para el transporte es costoso pero a las personas no les afecta mucho con tal satisfacer sus necesidades de movilización, por eso se ve que hay rentabilidad para los inversionistas incurrir en este campo.
- Existen dos métodos para la obtención del hidrógeno: por Hidrólisis o por reformado del gas natural con vapor, en el primer caso se producen gases de invernadero al generar la electricidad para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, en el segundo caso también se producen gases contaminantes al hacer este proceso. Cuando la electricidad se genera de fuentes renovables como la Hidro-electricidad, la energía solar o energía eólica no hay este problema, cuando se recurre a combustibles fósiles para obtener la electricidad la solución sería aplicando las técnicas de la captura del CO₂. El hidrógeno sería un almacenador de energía.
- A pesar de todos los esfuerzos técnicos científicos hechos por miles de personas en todo el mundo y de los programas de promoción y difusión por parte de asociaciones nacionales e internacionales para imponer el hidrógeno como el combustible del futuro (que ya está aquí), solamente mediante la voluntad política y la primacía de una conciencia ambiental y amor hacia el planeta, se logrará que este extraordinario elemento conduzca el desarrollo de la humanidad.

14. RECOMENDACIONES

1. Las fuentes de energía para el siglo 21 cambiarán de combustibles fósiles a la implantación de la economía del hidrógeno ya sea en forma de celdas de combustible o motores de combustión interna.
2. Los cambios más difíciles para producir Hidrógeno es el precio del combustible fósil o gas natural.
3. Se están estudiando nuevas formas de electrólisis que son económicas las cuales tienden a usar materiales de la nanotecnología para abaratar los costos, como el no uso del costoso platino, tratando de aumentar la eficiencia del proceso de la electrólisis del 75%.⁴⁴ o ⁴⁵.
4. Para muchos el hidrógeno es el combustible del futuro, porque su único subproducto es el agua. Para que el Hidrógeno se convierta en una parte importante de la economía energética, se deben enfrentar diversas cuestiones tecnológicas fundamentales, los gobiernos, las instituciones dedicadas a la investigación y los negocios, incluyendo la industria del petróleo y del gas deben desempeñar roles importantes para la resolución de los problemas relacionados con la producción, el transporte, el almacenamiento y la distribución del Hidrógeno.
5. Colombia debe seguir el ejemplo de muchos países de Europa y de Latinoamérica como Argentina, donde se está estudiando mucho sobre hidrógeno, hay universidades en España donde ya se ofrecen cursos académicos sobre este tema, como el caso de la Universidad Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC ver página 64.
6. En Colombia tenemos excedentes en la producción de energía hidroeléctrica, podríamos aprovechar también la energía Eólica, tenemos grandes extensiones de tierra donde se pudiera aprovechar la energía solar para efectuar la electrólisis del agua sin utilizar combustibles fósiles.

Tenemos excedentes de gas natural, y de carbón de excelente calidad, de los cual se puede extraer Metanol, que es la fuente más barata para producir hidrógeno que alimentaran las celdas de combustible, y así iniciar el proceso de la generación de hidrógeno para transporte vehicular, según estudios para el 2020, la mitad de la producción de vehículos nuevos deben movidos por hidrógeno, pero hay que tener en cuenta que el gas y el carbón son combustibles fósiles, que siguen produciendo gases de invernadero como el CO₂, para evitar este problema, se debe pensar en hacer estudios sobre la Captura y almacenamiento del CO₂, ya sea en pozos de petróleo depletados o en acuíferos salinos ⁵⁷

7. Si hablamos de Colombia, para implantar una economía de hidrógeno se necesitaría la capacitación del recurso humano, además, de atraer a los inversionistas para que les resulte atractivo el negocio. Se debería aprovechar la infraestructura que se tiene para el gas natural, se cuenta con excedentes de gas natural que se pueden utilizar para generar hidrógeno por el método de reforma del gas natural con vapor.

15. BIBLIOGRAFIA

1. Oil& Gas Journal may 28, 1990 volume 88, edición 22.
http://www.ogj.com/article_display.cfm?ARTICLE_ID=1882&p=
2. Yunus A. Cengel. Michael A. Boles. Departament of mechanical Engineering University of Nevada, Reno.
3. Peña, M.A., Gómez, J.P. y Fierro, J.L.G., Appl. Catal. A: General 144 (1996) 7.
4. Riley, R.Q., "Alternative cars in the 21st Century", SAE, Warrendale, USA, 1994.
5. Gulati, S.T., "Advanced Three-Way Converter System for High Temperature Exhaust Aftertreatment", SAE 970265, 1997.
6. Cheng, W., y Kung, H.H., Methanol Production and Use, Marcel Dekker, New York, 1994.
7. Stebar, R.F. y Parks, F.B., SAE Transaction Paper 740187, Vol. 83, Section 1,
8. GM Research Laboratories. Artículo presentado en SAE Automotive Engineering Congress, Detroit (M), 25 Febrero-1 Marzo, 1974. Veziroglu, T.N. y Barber, F., Int. J. Hydrogen Energy 17 (1992) 391.
9. Jamal, Y. y Wyszynski, M.L., Int. J. Hydrogen Energy 19 (1994) 557.
10. Cubeiro, M.L. y Fierro, J.L.G., J. Catal. (1998), en prensa; Cubeiro, M.L. y Fierro, J.L.G., Appl. Catal. A: General 168 (1998) 307.
11. Alejo, L., Peña, M.A. y Fierro, J.L.G., Appl. Catal. A: General 162 (1997) 281.
12. Alejo, L., Lago, R., Peña, M.A. y Fierro, J.L.G., en Proc. 3rd World Congress on Oxidation Catalysis, R.K. Grasselli, S.T. Oyama, A.M. Gaffney y J.E. Lyons, Eds.
13. M. Mohitpour. H. Golsan. A. A. Murray, H. Golshan, M. Mohitpour. Pipeline Design & Construction a practical Approach.
14. <http://www.elmundo.es/-papel/2003/03/08/motor/1351937.html>.

15. Compressed Gas Association, 1974, "Hydrogen " CGA Pamphlet, No 5. 5.
16. <http://www.patentgenius.com/patent/6471795.html>
17. <http://nanopedia.case.edu/NWPage.php?page=fuel.cells>
18. <http://www.gm.com/>
19. <http://www.sciencedirect.com/science?-ob=ArticleURL-udi=B6TXD-40X8KDD>
20. <http://www.transporte.cu/ignicion/boletinn03/boletin25/inici25.htm>
21. Hydrogen embrittlement-Wikipedia, the free encyclopedia.htm
22. <http://www.adsabs.harvard.edu/abs/1977hiti....2....3L>
23. <http://www.up.es/catedras/crm/report07/pps/l%20maria%teresa%20dominguez%20>
24. <http://www.dodfuelcell.com>
25. <http://www.h2planet.eu/esp/prodotti.php>
26. http://www.h2planet.eu/esp/enciclopedia_term.php?t=299&hash=d832a26df268c850a991dbd4dfe0be78
27. <http://www.en.wikipedia.org/wiki/Direct-metanol-fuel-cell>
28. http://en.wikipedia.org/wiki/hydrogen_economy
29. <http://redalyc.uaemex.mx/redaly/pdf/360/36080105.pdf>
30. <http://www.cordobaambiente.gov.ar/>
31. <http://es.mongabai.com/new/2006/0725.vcu.html>
34. <http://www.icb.csic.es/nanotubos/primera.htm>
35. <http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:4-stroke-Engine.gif>
36. <http://h2planet.eu/wiki/Imagen:fuelcell.es2.PNG>
59. http://www.slb.com/media/services/resources/oilfieldreview/spanish05/sum05/p34_47.pdf

60. <http://www.motordehidrogeno.net/un-informe-de-la-national-hydrogen-association-eeuu-elige-vehiculos-hidrogeno-como-mejor-alternativa-futuro>.
61. <http://209.85.215.104/search?q=cache:0aX8ot6mSfEJ:modernizacionaldetalle.blogspot.com/2007/06/hidrogenometano-hitano.html+hitano+combustible+hidrogeno+y+gas+natural&hl=es&ct=clnk&cd=1&gl=co>
62. <http://www.icp.csic.es/cyted//Monografias2001/A4-157.pdf>
63. <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>
64. <http://motor.terra.es/motor/articulo/html/mot15051.htm>
65. http://www.braunforpresident.us/main_topics/pdf/H2%20Production%20Costs.PDF
66. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/FC/521.pdf>
67. <http://www.voanews.com/english/2008-08-18-voa53.cfm>
68. <http://www.lageneraciondelsol.com/secciones/lomasinformativo/noticias/noticia.asp?noticia=859>
69. http://globalhydrogeninc.com/uploads/July2008_White_Paper__for_use_.pdf
70. http://globalhydrogeninc.com/Facts_and_Comparisons.html
71. <http://maps.live.com/?v=2&encType=1&cid=314BAD20F2876FD9!230>
72. http://www.hydrogenassociation.org/general/productsDetails_all.asp
73. Webb, WP. and Gupta, S.C.. 1984, Metals for Hydrogen Service, Chemical Engineering, pp 113-116.
75. <http://www.h2gen.com/>
76. <http://www.hydrogenllc.net/hydrov2/>
77. <http://www.electrolysers.com/>
78. <http://maps.live.com/?v=2&encType=1&cid=314BAD20F2876FD9!230#JndscD0x>
79. <http://www.boeing.es/ViewContent.do?id=35603&Year=2008>

80. <http://www.motordehidrogeno.net/genepax-el-motor-japones-que-funciona-solo-con-agua>

81. <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=NA&StationID=-1>

82. http://www.linde.com/hydrogen_flashsite_final/index.htm

83. <http://www.ulpgc.es/>