

MONOGRAFÍA: EL HIDROGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA

MELISSA CALLE MUÑOZ  
JOSÉ MIGUEL LÓPEZ BERMÚDEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PEREIRA  
2015

MONOGRAFÍA: EL HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA

MELISSA CALLE MUÑOZ

JOSÉ MIGUEL LÓPEZ BERMÚDEZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica

Director

INGENIERO OSIEL ARBELÁEZ SALAZAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

PEREIRA

2015

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Pereira, 2015

## **DEDICATORIA**

A mis guías y maestros.

Durante toda la elaboración de este proyecto contamos con la ayuda de muchas personas, a todas ellas nuestros más sinceros agradecimientos, a los docentes que durante la carrera contamos con su ayuda y colaboración, que nos instruyeron y nos ayudaron a ser profesionales íntegros y capaces. A nuestras familias muchas gracias por siempre estar ahí en todo momento, brindándonos el apoyo necesario y por último y más importante a Dios por habernos permitido llegar hasta este punto de nuestras vidas.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradecer al Ingeniero Osiel Arbeláez por la guía dada durante la realización del trabajo y a la ingeniera María Elena Leyes Sánchez, por el trato personal, la confianza, los medios y la ayuda depositada.

En segundo lugar brindamos nuestros agradecimientos a nuestros familiares en especial a nuestros padres, ya que ellos estuvieron presentes en todo el proceso de formación profesional y la colaboración anímica para la culminación de nuestro proyecto.

*"Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el Oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la que el carbón no es capaz [...] El agua será el carbón del futuro".<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Fragmento del Libro *La isla misteriosa* -Julio Verne (II. EL ABANDONADO-11. De nuevo el invierno. Discusión sobre el Combustible) - 1874

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
LISTA DE TABLAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1. INFORMACIÓN RECOLECTADA, ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS	17
1.1 CARBÓN	19
1.2 PETRÓLEO	20
1.2.1 Refinado del Petróleo	25
1.2.2 Reservas de Petróleo y consumo (El Pico de Hubbert)	27
1.2.3 Situación actual: Reservas en el mundo de Petróleo probadas	29
1.3 GAS NATURAL	31
1.4 EFECTOS MEDIOAMBIENTALES DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES	34
1.4.1 Lluvia ácida	34
1.4.2 Calentamiento Global	35
1.5 PROTOCOLO DE KYOTO	38
1.5.1 El protocolo de Kyoto en la actualidad	39
2. EL HIDRÓGENO Y SUS SISTEMAS	41
2.1 PROPIEDADES	41
2.2 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	43
2.2.1 A partir del Agua	45
2.2.1.1 Electrólisis	45
2.2.1.2 Termólisis	46
2.2.2 A partir de Procesos Biológicos	48

2.2.2.1	Producción Fotobiológica	48
2.2.2.1.1	Producción de hidrógeno por Hidrogenasas	48
2.2.2.1.2	Producción de Hidrógeno por Nitrogenasas	49
2.2.2.2	Generación Fermentativa	50
2.2.2.3	Sistemas Mixtos	50
2.3	ESTADO ACTUAL DE LA FORMACIÓN DE HIDRÓGENO	51
2.3.1	Estado Actual de las tecnologías para la Producción de Hidrógeno	52
2.4	ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO	53
2.4.1	Estado gaseoso	53
2.4.2	Estado Líquido	54
2.4.3	Estado Sólido	55
2.4.4	Almacenamiento a gran escala	56
2.5	TRANSPORTE, DISTRIBUCIÓN Y REPARTO	57
2.5.1	Fase Gaseosa	60
2.5.2	Fase Líquida	62
2.6	SEGURIDAD DEL HIDRÓGENO	63
2.6.1	Propiedades del gas Hidrógeno que afectan la seguridad	65
2.6.1.1	Propenso a Fugas	65
2.6.1.2	Dispersión	65
2.6.1.3	Gas de Hidrógeno y detección de la Llama	65
2.6.1.4	Inflamabilidad e Ignición	66
2.6.1.5	Debilitamiento por Hidrógeno, compatibilidad de Materiales	66
2.6.1.6	Características de Combustión	66
2.6.1.7	Riesgos Fisiológicos	67

3. ESTADO DEL ARTE DE ESTA TECNOLOGÍA. EXPERIENCIAS MUNDIALES CON HIDRÓGENO	68
3.1 AMÉRICA DEL NORTE	68
3.1.1 Estados Unidos de América	68
3.1.2 Canadá	73
3.2 EUROPA	76
3.2.1 España	76
3.2.2 Alemania	79
3.2.3 Francia	82
3.2.4 Unión Europea	84
3.3 ASIA	84
3.3.1 India	84
3.3.2 China	85
3.3.3 Japón	89
3.4 AMÉRICA DEL SUR	90
3.4.1 Argentina	90
3.4.2 Brasil	94
3.4.3 Chile	97
3.5 SÍNTESIS DE LAS EXPERIENCIAS MUNDIALES POR CONTINENTE	98
3.6 PATENTES A NIVEL MUNDIAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA	100
3.6.1 Toyota	100
3.6.2 Mazda	101
3.6.3 Honda	102
3.6.4 Mercedes Benz	103
3.6.5 Primera planta alimentada de hidrógeno	106

3.6.6	Avión espía sin piloto alimentado por Hidrógeno	106
3.6.7	Vector energético en la Antártida de Argentina	107
3.6.8	Estaciones de Hidrógeno	110
4.	LA MECATRONICA Y EL HIDRÓGENO	111
4.1	PRODUCCION	111
4.1.1	Procesos térmicos.	111
4.1.2	Procesos eléctricos	112
4.1.3	Procesos Foto-biológicos	112
4.2	ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCIÓN Y USO DEL HIDRÓGENO	113
4.2.1	Almacenamiento	113
4.2.2	Distribucion	114
4.2.3	Uso	114
5.	INTEGRACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA Y EN EL SECTOR ENERGÉTICO	115
5.1	IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO	115
5.2	LA HIDROELECTRICIDAD EN COLOMBIA, FAVORABLE A LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO	118
5.2.1	Central de Amoyá	119
5.2.2	Metodología	120
5.3	VENTAJAS	122
5.4	PRESENTE Y FUTURO	123
6.	CONCLUSIONES	124
7.	RECOMENDACIONES	126
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Licenciadores de tecnologías de plantas de hidrógeno, Tipo, Capacidad de Producción y número	45
Tabla 2 Clases de termólisis	47
Tabla 3 Estado actual de las tecnologías para la producción de hidrógeno	52
Tabla 4 Comparación de almacenamiento de los diferentes combustibles	55
Tabla 5 Almacenamiento de hidrógeno	56
Tabla 6 Hidrogenoductos	57
Tabla 7: Producción de hidrógeno, costos	58
Tabla 8 Propiedades físicas del hidrógeno (riesgosas)	64
Tabla 9 Aplicación de las tecnologías en la industria Alemana	81
Tabla 10 Síntesis de las experiencias Mundiales por continente	99

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Distribución de recursos energéticos a nivel mundial	17
Figura 2 Descripción del Trépano	22
Figura 3 Descripción del proceso de taladrado	23
Figura 4 Árbol de conexiones	24
Figura 5 Distribución del proceso de extracción del Petróleo	25
Figura 6 Diagrama de flujo simplificado de una refinería	26
Figura 7 El Pico de Hubbert	27
Figura 8 Ubicación del Petróleo en el Mundo	29
Figura 9 Los mayores productores de Petróleo	29
Figura 10 Países que usan más el Petróleo	30
Figura 11 Consumo Per cápita en el mundo	30
Figura 12 Exportación e importación	31
Figura 13 Porcentaje de la composición del gas natural	32
Figura 14 Diferentes usos del Gas Natural	33
Figura 15 Efecto invernadero vs. Calentamiento global	36
Figura 17 Propiedades de los elementos $H_2$ - $D_2$ - $T_2$	42
Figura 18 Diferentes rutas para la obtención de hidrógeno	44
Figura 19 Fuentes de obtención de Hidrógeno	51
Figura 20 Distribución y presencia de Hidrógeno a nivel mundial	59
Figura 21 Distribución de Hidrógeno mediante tubería	61
Figura 22 Distribución de la fase líquida	63
Figura 23 NFPA 704 Diamante del Hidrógeno	67

Figura 24 Países pertenecientes a RED $H_2$	77
Figura 25 Mezcla seca y producción de hidrógeno	80
Figura 26 Proyecto ómnibus hidrógeno	95
Figura 27 Esquema y balance energético del sistema de generación de $H_2$ con hidroelectricidad de la central de Amoya.	120

## RESÚMEN

Esta monografía busca ilustrar al lector sobre como el hidrógeno puede ser usado como una alternativa a los combustibles fósiles tradicionales, siendo un vector energético que el único producto que genera de su combustión es agua.

El uso del hidrógeno como reemplazo de los combustibles a base de petróleo, se ve soportado en la gran energía que puede liberar y por ser amigable con el medio ambiente, además de ser el elemento químico más abundante en el universo.

Lo anterior es sustentado por las grandes inversiones de los Estados Unidos y la Unión Europea de aproximadamente 3000 millones de dólares para su estudio e implementación. Los países en vía de desarrollo no cuentan con políticas claras que apoyen este tipo investigación y es en esta vía que debemos trabajar unidos en la innovación de esta nueva fuente de energía. En este trabajo se identifica las experiencias más relevantes respecto a la implementación a nivel mundial del hidrógeno con el fin de afianzar un plan para la incorporación de esta tecnología en Colombia.

**PALABRAS CLAVE:** Hidrógeno, Combustible, Petróleo, Energías alternativas, Producción de Hidrógeno, Pila de combustible, Celda de Hidrógeno, Economía del Hidrógeno.

## 0. INTRODUCCIÓN

El Hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, y es el combustible que alimenta a las estrellas que vemos por nuestros telescopios, es este mismo hidrogeno, el que nos permitirá avanzar hacia una nueva era donde la conservación y cuidado del medio ambiente, sean prioritarios.

Por el uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural la demanda energética mundial se ve cubierta en más del 87%. El uso de combustibles fósiles desde el punto de vista ambiental constituye el principal causante de la emisión de gases responsables del calentamiento global. A mediano plazo esta problemática no es sostenible, por lo tanto se tiene la necesidad de encontrar diferentes formas de producción y consumo energético que sea limpio, seguro y fiable.

La implementación del hidrógeno como una fuente de energía es una de las respuestas para esta crisis. A esto se le conoce como “la economía del hidrógeno” término actualmente usado para hacer referencia al modelo económico alternativo al uso de combustibles fósiles principalmente para ser utilizado en los medios de transporte. Este elemento químico, como vector energético, revolucionará el futuro inmediato.

Este trabajo busca ofrecer un nuevo punto de vista que abarque la situación actual del sector energético mundial, comparándolo con las alternativas que aprovechan el poder que tiene el hidrogeno; valiéndose del análisis de los avances tecnológicos, las experiencias de otros países en materia de investigación y desarrollo de las tecnologías y procesos, y el uso y aprovechamiento de otras fuentes de energía renovables aplicadas al proceso de obtención del hidrógeno.

La Mecatrónica, siendo la integración sinérgica de la mecánica, la electrónica, el control y la instrumentación, permite el estudio y análisis de los diferentes sistemas y métodos que se involucran en la producción industrial del hidrógeno, y a su vez, permite que se visualice sí la misma es viable y rentable en Colombia.

La tecnología utilizada para obtener el hidrógeno se ha venido desarrollando desde hace aproximadamente tres siglos, pero ha sido desde las últimas décadas, que este se ha proyectado como una solución viable a los problemas energéticos mundiales y a los problemas medioambientales que la economía del petróleo ha causado.

El hidrógeno como combustible puede utilizarse de distintas formas: para generar electricidad o para generar movimiento en los motores de combustión interna; en el mercado existen varias alternativas a los automotores que utilizan combustibles fósiles y que en vez de este utilizan hidrógeno como fuente de energía, es por esto que se hace una revisión de las patentes de las marcas más representativas como Toyota, Honda, Mazda, entre otros.

Además de esto, se ha analizado la implementación industrial del hidrógeno en Colombia, las fases de investigación que se están realizando en el sector de la generación de energía; Colombia posee, por su posición geográfica y sus recursos hídricos, todas las posibilidades para que la producción a nivel industrial de hidrógeno se pueda hacer de manera rentable.

El hidrógeno es el combustible del futuro, gracias a que su contaminación es prácticamente cero, y es por esto que el uso de combustibles fósiles debe ser minimizado, para darle paso a nuevas soluciones que estén acordes a la visión y misión ambiental que la población mundial está reclamando.

## 1. INFORMACIÓN RECOLECTADA, ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS

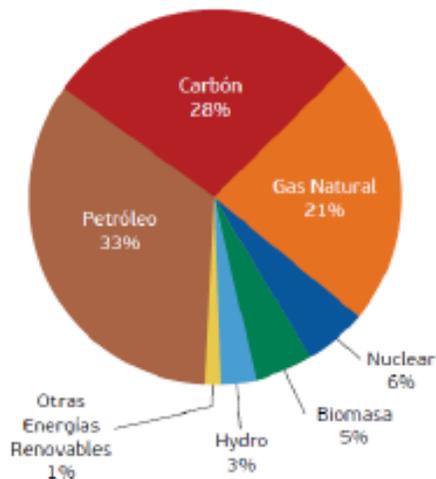
La mayor parte de la energía empleada actualmente en el mundo proviene de los combustibles fósiles. Se utilizan en el transporte, para generar electricidad, para calentar ambientes, etc.

Proceden de restos vegetales y otros organismos vivos (como plancton) que hace millones de años fueron sepultados por efecto de grandes cataclismos o fenómenos naturales y por la acción de los microorganismos, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura.

Existen distintos combustibles fósiles pero los más importantes por la gran dependencia de la sociedad a ellos son el carbón, el petróleo y el gas natural. De los tres el principal es el petróleo, que mediante distintos procesos, puede proporcionar distintos productos.

La transición hacia una nueva tecnología no es fácil como se muestra en la Figura 1, según (Belt) la generación de energía a partir de combustibles fósiles, carbón y gas natural ocupan el 82% de la producción energética actual a nivel mundial, mientras que solo el 14% lo proveen las fuentes de energía renovables como la biomasa, energía solar, eólica, hidroeléctrica y otras fuentes de energía.

Figura 1. Distribución de recursos energéticos a nivel mundial.



Fuente: BELT. Christian. Fomento de las energías renovables y la eficiencia energética. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. Asunción. 2014.

Para el desarrollo de alternativas energéticas sostenibles se identifican dos barreras importantes, una de ellas es la incertidumbre en los tiempos de los avances técnicos entre tecnologías estratégicamente acoplables y compatibles dentro de un plan de producción, almacenamiento y distribución limpios. La segunda barrera está relacionada con la destinación de recursos para investigación e implementación, en un sistema donde las empresas están interesadas en innovar y ofrecer productos diferenciadores que les permitan competir, pero no cuentan con el suficiente músculo financiero como para cubrir todas las necesidades de la tecnología.

Por otro lado, cada Gobierno se debate entre coyunturas económicas, necesidades sociales y requerimientos de infraestructura productiva, por lo que sus libertades de apoyo a ideas se ven políticamente acotadas por los intereses de sus mismos gobernantes y las presiones de grupos económicos, políticos y sociales.

Es por ello que las innovaciones tecnológicas entrañan más allá de una inversión social, una responsabilidad colectiva, ya que las sociedades deben dedicar tiempo a pensar y planificar su futuro productivo y decidir estratégicamente sus inversiones, contemplando, el ideal mecanismos que le permitan financiar el ingreso de nuevos conocimientos y avanzar en la diversificación de su portafolio de productos nacionales.

La tecnología del hidrógeno está dentro de las ideas ambientalmente sostenibles para el tema de la movilidad y se ha constituido en una apuesta de muchas naciones alrededor del mundo; la implementación del hidrógeno traería consigo una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero y también en la producción de calor en los procesos de creación de energía, puesto que en términos de eficiencia, “el hidrógeno tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible” (Fundación Hidrógeno Aragón y SEAS, Estudios Superiores Abiertos S.A, 2013), lo que significa que se reduce la emisión de calor total en los procesos de combustión y se aumenta la producción de energía por unidad de masa. En el proceso de liberación de energía a partir de hidrógeno en un Motor Alternativo de Combustión Interna (MACI) el único producto generado es vapor de agua y los óxidos de nitrógeno ya presentes en los motores que utilizan hidrocarburos, lo que le da a esta forma de producción una notable ventaja al evitar emisiones de dióxido de carbono y la posibilidad de obtener un vector energético inagotable por ser el elemento más abundante del universo.

## 1.1 CARBÓN

Se trata del primer combustible fósil usado por el hombre, y cuenta con abundantes reservas, representa alrededor del 70% de las reservas energéticas mundiales de combustibles fósiles conocidas actualmente. Además, se trata de la fuente energética más utilizada en la producción de electricidad a nivel mundial.

Es un combustible sólido, en forma de roca negra, con un alto contenido en carbono. Se obtiene principalmente de la explotación de yacimientos ricos en este material mediante minas, ya sea a cielos abiertos o subterráneos.

Este carbón, llamado carbón mineral, procede de la transformación de grandes masas vegetales provenientes del llamado período Carbonífero. Estos vegetales enterrados sufrieron un proceso de fermentación en ausencia de oxígeno, debido a la acción conjunta de microorganismos, presión y temperatura adecuados. Con el paso del tiempo en estas condiciones, el carbón aumenta su contenido en carbono, lo cual incrementa la calidad y poder calorífico del mismo.

La principal ventaja del consumo de carbón es la obtención de una gran cantidad de energía de forma sencilla y cómoda. Además, como suele consumirse cerca de donde se explota, se ahorran costes de transporte y distribución.

Por otra parte, su extracción es peligrosa y al ser una fuente de energía no renovable, tiende a agotarse, volviendo menos rentable su explotación. Además su combustión genera problemas ambientales como el efecto invernadero y la lluvia ácida.

En función de su antigüedad y poder calorífico el carbón mineral se puede clasificar en turba, lignito, hulla y antracita.

La Turba es el carbón más reciente. Tiene un porcentaje alto de humedad de hasta el 90% bajo poder calorífico, comúnmente inferior a  $8300 \text{ kJ/kg}$  y por poco carbono (menos de un 50%). Presenta un pH que oscila entre 3,4 i 8,5. Se debe secar antes de su uso y se encuentra en zonas pantanosas. Comúnmente se emplea en calefacción.

El Lignito es un carbón cuyo poder calorífico es menor a  $29300 \text{ kJ/kg}$ , con una concentración de carbono que oscila entre el 65% y el 75% y mucha humedad (30%). Se encuentra en minas a cielo abierto y por eso, su uso suele ser más rentable. Se emplea en centrales eléctricas.

La Hulla tiene alto poder calorífico, de más de 29500 *kJ/kg* y elevado porcentaje de carbono, de entre un 75% y un 85%. Se emplea tanto en centrales eléctricas y fundiciones de metales.

La Antracita es el carbón más antiguo, y de mayor calidad, pues tiene más de un 90%, hasta un 95% de carbono. Arde con mucha facilidad y tiene un alto poder calorífico que supera las 33500 *kJ/kg*.

Además de los carbones minerales obtenidos directamente de la naturaleza, existen los carbones artificiales. Estos carbones se obtienen mediante otros procesos industriales y los más importantes son el carbón de coque y el carbón vegetal.

El carbón de coque se obtiene a partir del carbón natural, concretamente de la hulla. Para su obtención se calienta este mineral en unos hornos especiales, en ausencia de aire, obteniendo así un carbón con mayor poder calorífico.

Por otro lado, el carbón vegetal se obtiene mediante el uso de la madera, calentándola hasta temperaturas que oscilan entre 400 y 700 °C, en ausencia de aire. El poder calorífico del carbón vegetal oscila entre 29.000 y 35.000 *kJ/kg*, y es muy superior al de la madera, que oscila entre los 12.000 y 21.000 *kJ/kg*.

## 1.2 PETRÓLEO

El petróleo es un combustible fósil natural constituido por una mezcla de compuestos orgánicos, llamados hidrocarburos. Su poder calorífico oscila entre las 37.600 y 46.000 *kJ/kg*.

Procede de la transformación por acción de determinadas bacterias, de enormes masas transformación de materia orgánica procedente de zooplancton y algas que, depositados en grandes cantidades en fondos anóxicos de mares o zonas lacustres del pasado geológico, fueron posteriormente enterrados bajo pesadas capas de sedimentos que se encontraban en determinadas condiciones de presión y temperatura, produciendo una transformación química, llamada craqueo natural.

En condiciones normales es un líquido bituminoso que puede presentar gran variación en diversos parámetros como color y viscosidad (desde amarillentos y poco viscosos como la gasolina hasta líquidos negros tan viscosos que apenas fluyen), densidad (entre 0,75 *g/ml* y 0,95 *g/ml*), capacidad calorífica, etc. Estas variaciones se deben a la diversidad de concentraciones de los hidrocarburos que componen la mezcla.

El Petróleo se puede clasificar según los llamados crudos de referencia (Brent Blend, West Texas Intermediate, Tapis, Minas, Arabia Ligero, Aruba,...) o según su gravedad API.

La gravedad API, de sus siglas en inglés American Petroleum Institute, es una medida de densidad que describe el peso relativo del petróleo respecto al agua. Es usado para comparar densidades de fracciones extraídas de petróleo. Se mide con un instrumento llamado densímetro y no tiene unidades, aunque siempre se le coloca al número la denominación °API.

El valor de temperatura estándar de la medición es de 60°F y la fórmula utilizada para su cálculo es:

$$\text{Gravedad API} = \left( \frac{141.5}{\text{Densidad relativa}} \right) - 131.5$$

En relación con su gravedad API, los crudos pueden ser ligeros, medianos, pesados y extrapesados.

El petróleo se extrae mediante la perforación de un pozo sobre el yacimiento. Una vez elegidas las áreas con mayores probabilidades, se realizan las perforaciones, que a veces llegan a considerables profundidades, incluso a más de 6000 m, como es el caso de los Estados Unidos.

Dos son los sistemas comunes: a percusión, que es el más antiguo y casi en desuso y a rotación, que se utiliza en la mayoría de los casos.

El método de percusión utiliza un taladro pesado, unido a una barra maestra que aumenta su peso y mediante un sistema de balancín genera un movimiento alternativo de ascenso-descenso, accionado por un motor. Periódicamente se retira el taladro para extraer los materiales o detritos, con una herramienta llamada cuchara.

Por otro lado, en el método a rotación el taladro es hueco, y se atornilla a unos tubos de acero formando las barras de sondeo, que giran impulsadas por la llamada mesa rotativa, situada en la base de la torre y unida mediante unas transmisiones de cadena a los motores.

La mesa rotativa tiene en su centro un agujero por el cual se desliza una columna de perforación de la misma sección, que desciende conforme avanza el taladro.

Figura 2. Descripción del Trépano



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible[<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

En perforaciones submarinas, los equipos de perforación obtienen la fuerza necesaria del propio peso del tubo de perforación.

Una vez perforado el pozo y alcanzado el yacimiento petrolífero, se debe proceder a la extracción mineral. La salida del petróleo puede llevarse a cabo mediante fuerzas de causa natural o mediante equipos.

Tres son las causas que pueden originar la salida natural. En primer lugar, la presión del agua subyacente, que al transmitirse al petróleo, lo obliga a subir. Es la más efectiva.

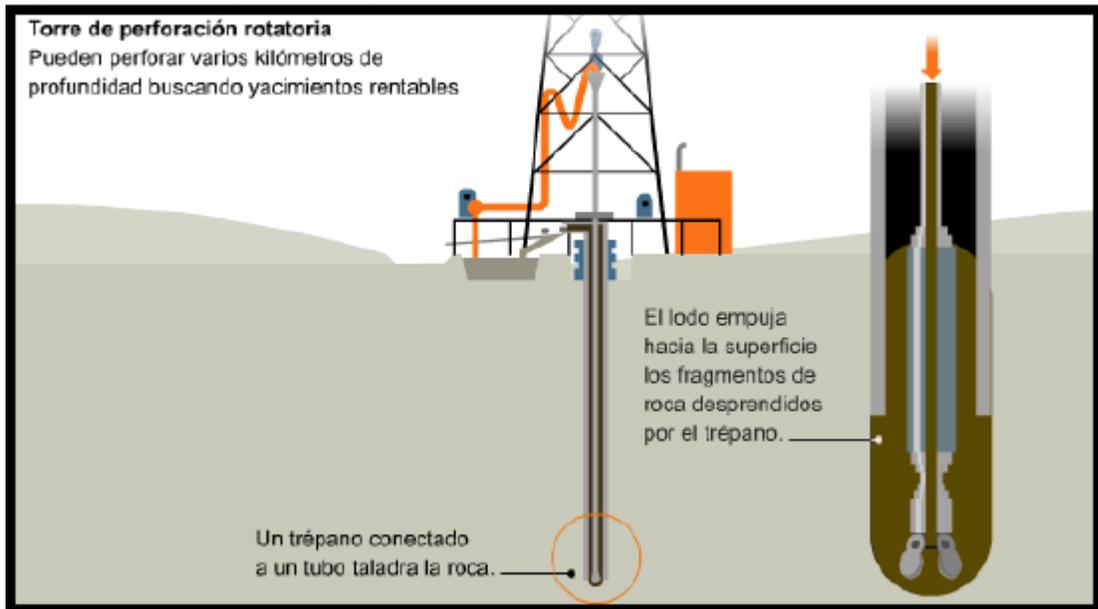
Otra de las presiones que puede ayudar a la salida es la presión del gas libre que cubre al petróleo, que se transmite a éste y lo impulsa en su ascenso.

Cuando no existe gas libre y el agua no tiene presión suficiente o tampoco existe, al disminuir la presión por la perforación del pozo, el gas disuelto en el petróleo se desprende y al expandirse lo hace surgir. Es la menos efectiva de las tres.

Si la extracción se lleva a cabo mediante equipos se puede lograr mediante métodos de inyección a presión de agua o lodo, gas o aire. O si no es el caso,

mediante bombeo, que puede ser mediante bombeo mecánico, bombeo hidráulico o bombeo centrífugo.

Figura 3. Descripción del proceso de taladrado.



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible en <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>

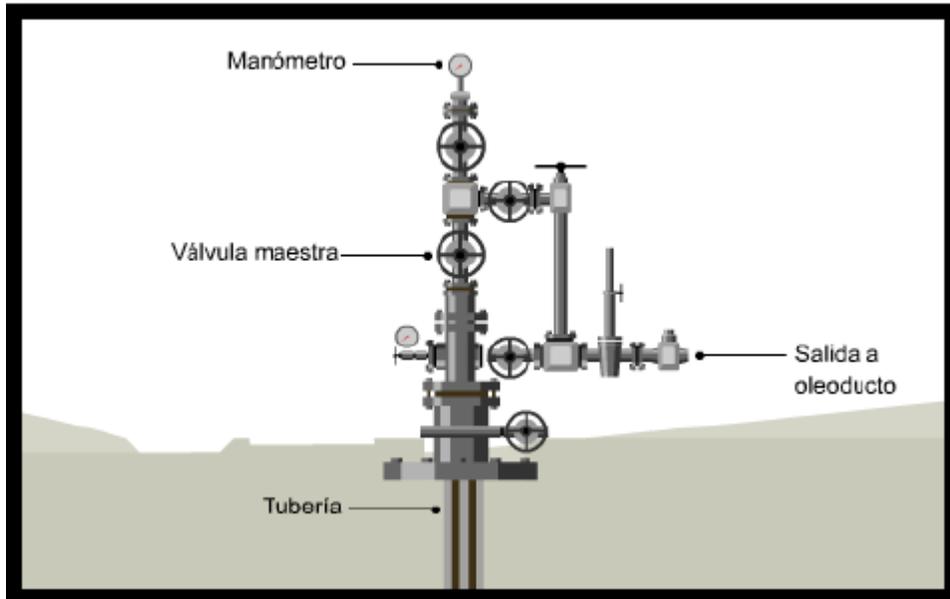
El bombeo mecánico consiste en bombas aspirantes de profundidad, accionadas por gatos de bombeo. Por lo general, se efectúa el bombeo simultáneo de una serie de pozos vecinos, conectado sus gatos de bombeo mediante largas varillas de acero, a un excéntrico que se hace girar en una estación central.

El Bombeo hidráulico consiste en inyectar petróleo a presión que regresa a la superficie bombeado.

Finalmente, el bombeo centrífugo usa bombas centrífugas de varias etapas, ubicadas cerca del fondo del pozo y accionadas por motores eléctricos controlados desde la superficie.

Una vez perforado el pozo se coloca sobre la boca del mismo un sistema de válvulas, llamado árbol de conexiones, donde irán conectados los oleoductos.

Figura 4. Árbol de conexiones.



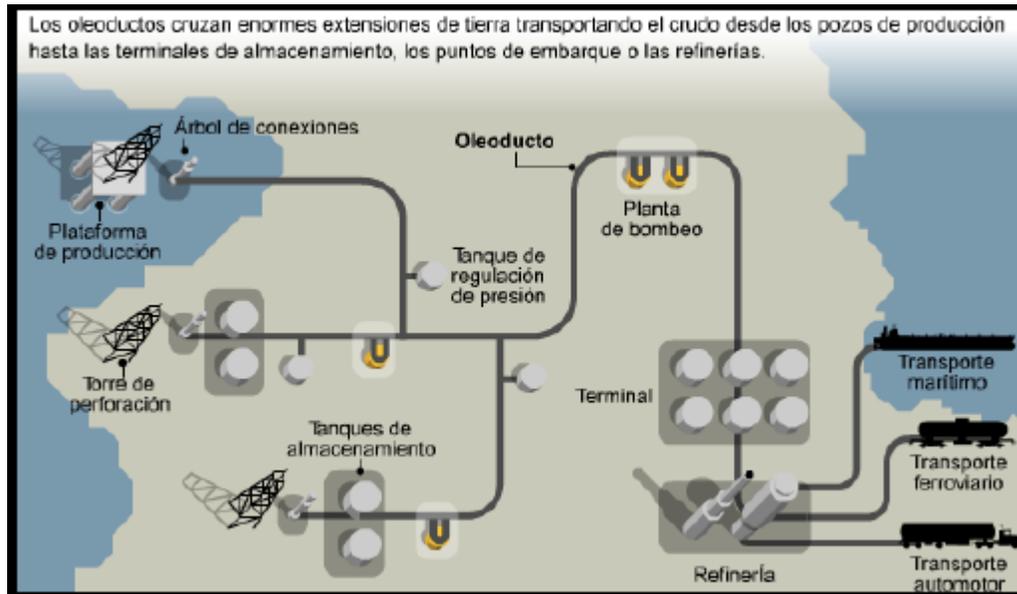
Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible[<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

Una vez el petróleo es extraído de los pozos contiene impurezas, no pudiéndose procesar industrialmente haciendo necesaria una purificación de éste para separarlo del gas y del agua salada que lo acompañan.

Se suelen separar mediante densidades en unas baterías de tanques y simple reposo, decantándose posteriormente, o mediante separadoras centrífugas, aun así, existen una gran cantidad de métodos químicos, térmicos o eléctricos para dicha separación.

Una vez purificado el mineral líquido, se envía a los tanques de almacenaje para su posterior envío a las destilerías o refinerías mediante oleoductos u otros medios de transporte.

Figura 5. Distribución del proceso de extracción del Petróleo



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible [<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

### 1.2.1 Refinado del Petróleo

El petróleo crudo carece de utilidad. Sus componentes deben separarse en un proceso denominado refino.

Existen dos procedimientos para llevar a cabo este proceso de refinamiento. El "Cracking" o craqueo catalítico y la destilación fraccionada.

El cracking es un proceso térmico o catalítico usado para descomponer los hidrocarburos que constituyen las fracciones pesadas del petróleo transformándolas en otras más ligeras con el fin de incrementar su utilidad.

Además, se usa la destilación fraccionada, en unas instalaciones llamadas torres de destilación o torre de fraccionamiento. Este procedimiento calienta el petróleo permitiendo la separación del crudo en distintas fracciones, por orden de volatilidad, sometiéndolo a unas temperaturas de unos 350°C aproximadamente y una posterior condensación.

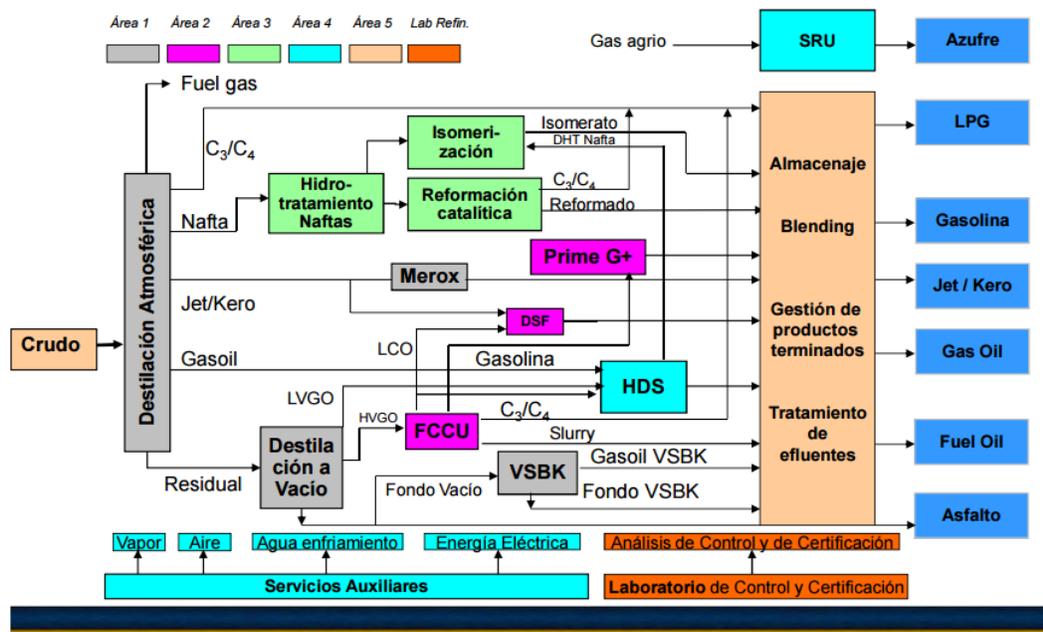
Del refinado del petróleo se obtienen las siguientes fracciones, entre otras, también mostradas en el diagrama. En la zona más alta de la torre se recogen los hidrocarburos más volátiles y ligeros y en la más baja los más pesados:

- Gases: metano, etano y gases licuados del petróleo (propano y butano)
- Nafta, ligroína o éter de petróleo
- Gasolina
- Queroseno
- Gasóleo (ligero y pesado)
- Fuelóleo
- Aceites lubricantes
- Asfalto
- Alquitrán

La industria petroquímica elabora a partir del petróleo varios productos derivados, además de combustibles, como plásticos, derivados el etileno, pesticidas, herbicidas, fertilizantes o fibras sintéticas.

Una de las ventajas del petróleo, fácilmente deducibles observando la torre de destilación es la gran cantidad de productos que pueden obtenerse del mismo proceso de extracción y destilación mediante un proceso, aunque no directo, bastante simple.

Figura 6. Diagrama de flujo simplificado de una refinería



Fuente: Refinería del Petróleo y economía del proceso. Introducción a la Refinería del Petróleo (Ingeniería Química). Instituto de Ingeniería Química. Universidad de la Republica. Uruguay 2010. Disponible: [<https://www.fing.edu.uy/ig/cursos/qica/industria/IntroRefineria.pdf>]

Además, esto permite obtener energía de una forma muy regular y fácilmente distribuible, y que además tiene un relativo buen rendimiento. La distribución y transporte del petróleo se da mediante oleoductos, petroleros y transporte por ferrocarril y carretera.

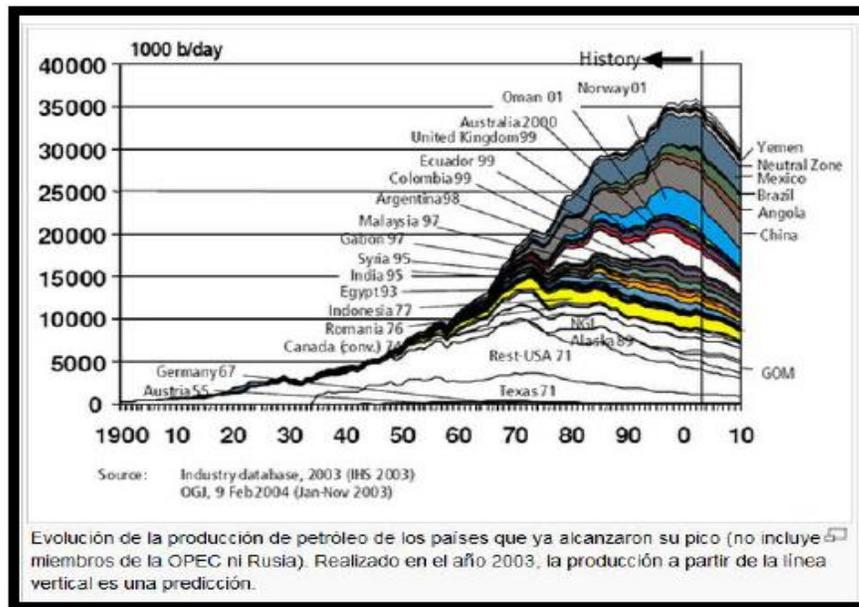
Entre las desventajas a destacar del petróleo, las principales son las derivadas de ser una fuente no renovable y combustible, y como consecuencia de lo anterior sus reservas disminuyen constantemente; su manipulación es peligrosa, a causa de su inflamabilidad.

Además, el petróleo contribuye mucho a problemas medioambientales como ejemplo el efecto invernadero y la lluvia ácida.

### 1.2.2 Reservas de petróleo y consumo el pico de Hubbert

La teoría del pico de Hubbert, también conocida como cenit del petróleo, petróleo pico o agotamiento del petróleo, así como de otros combustibles fósiles. Predice que la producción mundial de petróleo llegará a su cenit y después declinará tan rápido como creció, resaltando el hecho de que el factor limitador de la extracción de petróleo es la energía requerida y no su coste económico.

Figura 7. El Pico de Hubbert.



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible[<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

La teoría debe su nombre al geofísico M. King Hubbert, quien predijo correctamente el pico de la producción estadounidense con quince años de antelación.

Esta teoría es ampliamente aceptada entre la comunidad científica y la industria petrolera. El debate no se centra en si existirá un pico del petróleo sino en cuándo ocurrirá, ya que es evidente que el petróleo es un recurso finito y no renovable en escalas cortas de tiempo por lo que en un momento u otro se llegará al límite de extracción. Esto depende de los posibles descubrimientos de nuevas reservas, el aumento de eficiencia de los yacimientos actuales, extracción profunda o la explotación de nuevas formas de petróleo no convencionales.

El año exacto del pico todavía no ha sido establecido con precisión, si bien La Agencia Internacional de la Energía (AIE) hizo público en noviembre de 2010, que la producción de petróleo crudo llegó a su pico máximo en 2006. Basándose en los datos actuales de producción, la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas (ASPO en inglés). Considera que el pico del petróleo ocurrirá en 2010, siendo el del gas natural algunos años posteriores. Por el contrario, las estimaciones de los más optimistas arrojan reservas para al menos 100 años más.

La llegada del pico del petróleo provocaría una escasez de dicho recurso. Pero esta escasez sería diferente a todas las sucedidas en el pasado ya que sus causas serían muy distintas. Los anteriores períodos de escasez tuvieron más que ver con razones políticas que con problemas reales en la extracción de los recursos.

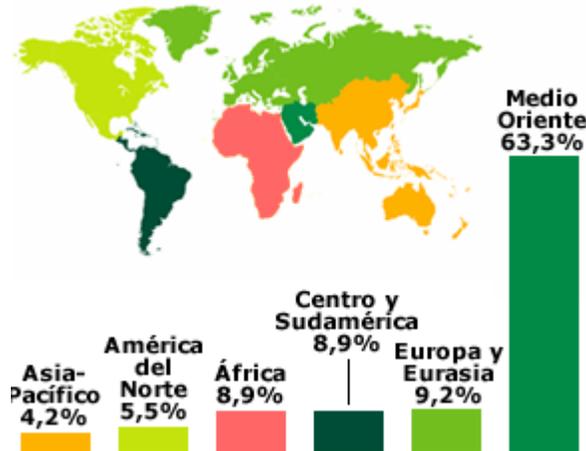
Esta vez, en cambio, el motivo fundamental será la falta de crudo suficiente para abastecer a toda la demanda. Los efectos y la gravedad de dicha escasez dependerán de lo rápido que decrezca la producción y de si se adoptaron medidas preventivas de adaptar la sociedad al uso de energías alternativas. Pero puede que esas alternativas ni siquiera lleguen a tiempo.

En ese caso todos los productos y servicios que requieran el uso de petróleo escasearán disminuyendo el nivel de vida de todos los países. Los escenarios futuros van desde el colapso de la sociedad industrializada hasta los que afirman

que la economía de mercado o las nuevas tecnologías actuales se encuentran resolviendo el problema.

### 1.2.3 Situación actual reservas en el mundo de petróleo probadas

Figura 8. Ubicación del Petróleo en el Mundo

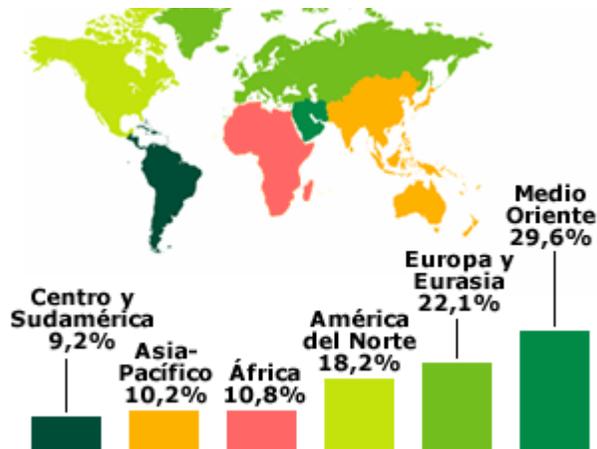


Fuente: Petróleo en el mundo. ¿Dónde está el petróleo? [En línea]. British Broadcasting Corporation. 2005. Disponible [[http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421\\_petroleo/index.shtml](http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421_petroleo/index.shtml)]

Medio Oriente sigue siendo el centro de atención en relación con el petróleo, especialmente cuando se habla de reservas. La magnitud de los yacimientos de Arabia Saudita e Irak hace que los del resto del mundo parezcan pequeños.

El mar del Norte de Canadá aún tienen importantes reservas, pero en estas zonas es mucho más costosa la extracción.

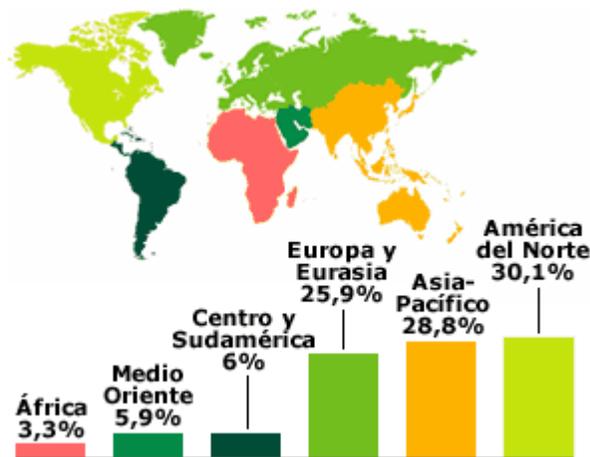
Figura 9. Los mayores productores de Petróleo



Fuente: Petróleo en el mundo. ¿Dónde está el petróleo? [En línea]. British Broadcasting Corporation. 2005. Disponible [[http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421\\_petroleo/page2.shtml](http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421_petroleo/page2.shtml)]

No sorprende que Medio Oriente sea el mayor productor de petróleo: provee cerca de un tercio del consumo mundial. Per Europa y Eurasia (en especial, Rusia y el Reino Unido) y Estados Unidos son también grandes productores.

Figura 10. Países que usan más el Petróleo



Fuente: Petróleo en el mundo. ¿Dónde está el petróleo? [En línea]. British Broadcasting Corporation. 2005. Disponible [[http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421\\_petroleo/page3.shtml](http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421_petroleo/page3.shtml)]

América del Norte es la región que más petróleo consume, a pesar de que es una de las que menos reservas posee. Obviamente, esto indica que depende en gran medida de la importación de hidrocarburos.

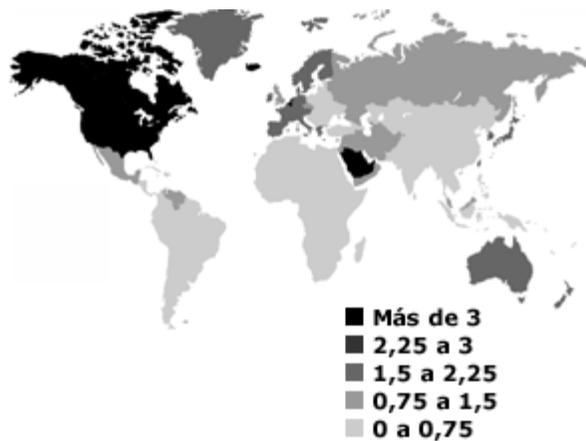
También la zona Asia–Pacífico es una gran consumidora de crudo, siendo la que menos yacimientos tiene.

A ambas regiones se atribuye casi el 90% del incremento del consumo de petróleo en los últimos 10 años.

El consumo per cápita de gasolina en Estados Unidos es mayor del mundo. Es un gran productor pero no cubre toda su demanda.

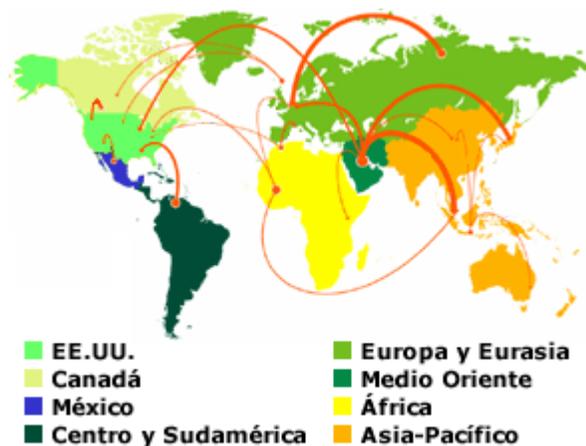
En los países productores de Medio Oriente, el petróleo y sus derivados son baratos y hay mucho consumo.

Figura 11. Consumo Per cápita en el mundo



Fuente: Petróleo en el mundo. ¿Dónde está el petróleo? [En línea]. British Broadcasting Corporation. 2005. Disponible [[http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421\\_petroleo/page4.shtml](http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421_petroleo/page4.shtml)]

Figura 12. Exportación e importación



Fuente: Petróleo en el mundo. ¿Dónde está el petróleo? [En línea]. British Broadcasting Corporation. 2005. Disponible [[http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421\\_petroleo/page5.shtml](http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421_petroleo/page5.shtml)]

Los mayores flujos comerciales de petróleo van desde Medio oriente hacia Europa, Asia – Pacífico y Estados Unidos, y desde Rusia hacia Europa Occidental.

También es importante la línea de suministro de Venezuela a Estados Unidos y, en menor medida, la de México a su vecino del norte.

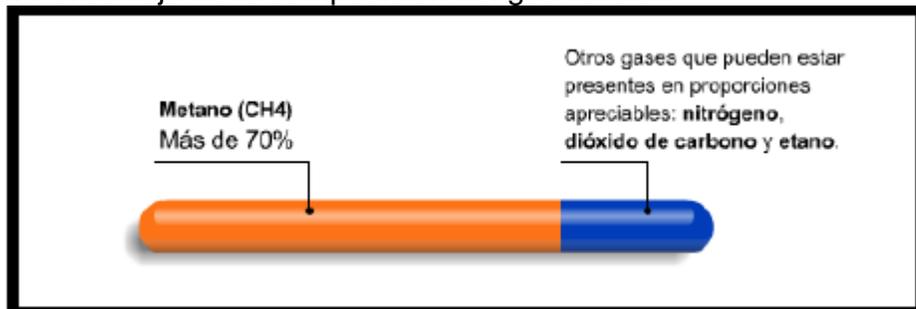
### 1.3 GAS NATURAL

El gas natural, al igual que el petróleo se obtiene en los yacimientos. Este gas consiste en una mezcla de gases que se encuentra almacenada en el interior de la tierra, ya sea aisladamente (gas seco) o con petróleo en el mismo yacimiento (gas húmedo). Debido a su densidad menor que la del petróleo, en los yacimientos se encuentra por encima del petróleo.

Su origen es muy similar al del petróleo, a partir de la degradación del plancton y otros organismos comprimidos durante millones de años debajo de capas de sedimentos. A lo largo de todos esos años, la presión y el calor generado por dichos sedimentos generaron la transformación de esos organismos en gas natural.

El gas natural se compone principalmente de metano (en un 70%), mezclado con otros hidrocarburos ligeros, como etano, propano y butano. Su poder calorífico es de unos  $46.000 \text{ kJ/m}^3$ .

Figura 13. Porcentaje de la composición del gas natural.



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible [<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

El proceso de extracción del gas también es similar al del petróleo. Se usan torres perforadoras que llegan hasta los estratos de donde están ubicados los yacimientos para extraer el gas. Entonces se elimina el agua y alguna impureza que pueda tener y se transporta mediante gaseoductos a alta presión (la presión la proporcionan las estaciones de bombeo) para su consumo directo.

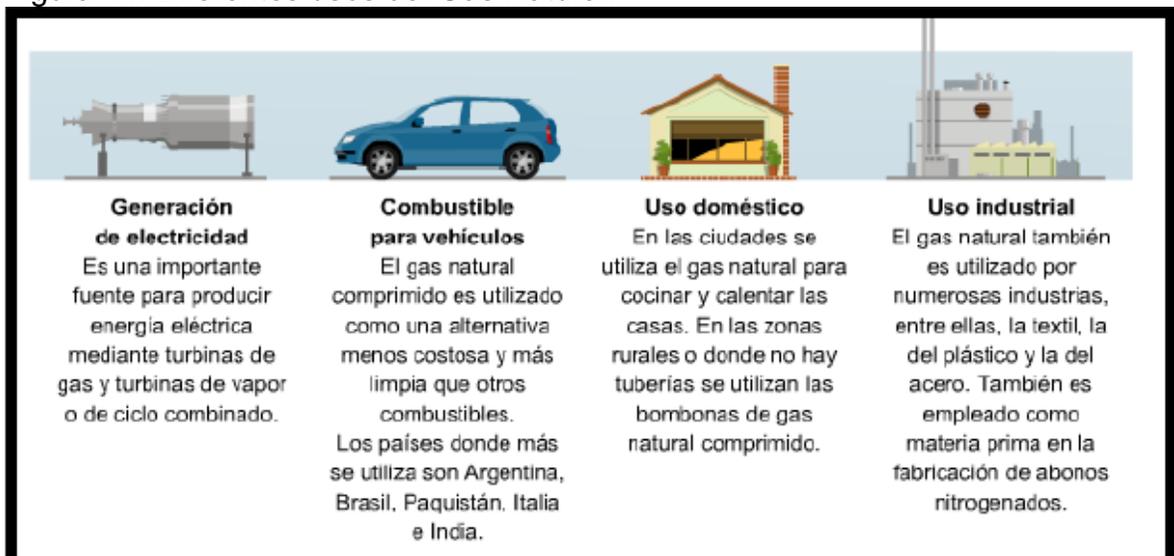
O bien, si no es posible ese consumo directo se lleva a cabo un proceso de licuefacción que convierte el gas en líquido enfriándolo hasta temperaturas

criogénicas de unos  $161^{\circ}\text{C}$ . Y se transporta mediante buques cisterna del doble casco (gaseros)

Una vez transportado en forma líquida, este debe ser transformado nuevamente gas en las plantas de regasificación y almacenado para su posterior consumo.

Por último, el gas en las redes de distribución y es transportado por gasoductos convencionales hasta los centros de consumo. Donde se emplea como combustible en centrales térmicas, para obtener gasolina y como combustible doméstico e industrial.

Figura 14. Diferentes usos del Gas Natural.



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible en <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>

El gas natural es el combustible fósil con menor impacto ambiental, tanto en la etapa de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización. Se emplea directamente desde la naturaleza, por lo que prácticamente no necesita ser procesado como ocurre con los demás combustibles con el significativo impacto sobre el medio ambiente.

## 1.4 EFECTOS MEDIOAMBIENTALES DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

Entre los efectos producidos por el uso de los combustibles fósiles a gran escala, las más importantes y de más seriedades para el medio ambiente son la lluvia ácida y el calentamiento global. Además, existen otros problemas relacionados con la extracción o transporte de estos combustibles, como por ejemplo la contaminación del suelo o los vertidos de petróleo.

### 1.4.1 Lluvia ácida

El concepto de lluvia ácida fue acuñado en 1852 por el químico británico Robert Angus Smith, aunque pasó más de un siglo hasta que se reconoció su incidencia a nivel mundial. Fue gracias a un estudio del gobierno sueco, presentado en 1972 en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano, en el que se constataba que los ecosistemas del país nórdico sufrían este fenómeno, provocado por los residuos de las instalaciones industriales, en especial los provenientes de las centrales térmicas británicas.

Este fenómeno se ha convertido en uno de los íconos de la degradación del medio ambiente provocada por la industrialización. Se produce cuando el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) reaccionan con el oxígeno atmosférico y se disuelven en el agua de lluvia, formando los ácidos sulfúrico y nítrico.

El viento puede provocar que estos corrosivos elementos recorren miles de kilómetros antes de precipitarse en forma de lluvia, rocía, granizo, nieve o niebla, e incluso en forma de gases y partículas ácidas, lo que se conoce como “deposición seca”.

Aunque la naturaleza también genera estos gases, por ejemplo a partir del magma volcánico, los principales responsables de este problema medioambiental son las emisiones causadas por los medio de transporte, las centrales térmicas que queman combustibles fósiles, las plantas industriales y el amoníaco del estiércoles de las explotaciones ganaderas intensivas.

Los efectos nocivos que la lluvia ácida ocasionan sobre las áreas naturales son muy diversos y dependen del tipo de ecosistemas: así por ejemplo, en ríos y lagos, éste fenómeno ha provocado una acidificación de sus aguas, dañando a plantas y animales que las habitan, y en casos extremos, se produce una aniquilación completa de especies sensibles a la acidez del agua.

En los ecosistemas terrestres, los daños ocasionados por la lluvia ácida, afectan principalmente a las plantas, ocasionando en algunas especies sensibles, lesiones y caída de las hojas, sin embargo, usualmente la lluvia ácida no acaba con la vegetación directamente sino que actúa de manera gradual, haciendo más lento su crecimiento y favoreciendo al ataque de plagas y enfermedades.

Además la lluvia ácida empobrece los suelos, tanto de bosques, como de zonas de cultivo, ya que a su paso por éstos, lava los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, al tiempo que libera y acaba con microorganismos útiles en los procesos de formación, descomposición y nutrición del suelo.

Aunque no se han demostrado efectos directos nocivos en los seres humanos los riesgos potenciales a la salud se encuentran más bien en los contaminantes precursores de la lluvia ácida, es decir, en los óxidos de nitrógeno (NOx) y de azufre (SOx), ya que estudios realizados en otros países han mostrado que exposiciones continuas a estos contaminantes pueden provocar y agravar enfermedades respiratorias y del corazón.

Sin embargo, la lluvia ácida puede tener efectos indirectos sobre la salud, ya que las aguas acidificadas pueden disolver metales y sustancias tóxicas de los suelos, rocas, conductos y tuberías y posteriormente transportarlos hacia los sistemas de agua potable.

Por otro lado, la lluvia ácida puede solucionarse por medio de varias medidas:

Mediante la utilización de técnicas de neutralización de la acidez de las aguas, como el agregado de sustancias que actúen de base o la ubicación de filtros. No obstante, se trata de técnicas costosas que sólo pueden servir para solucionar el problema a corto plazo.

Otra medida es la disminución de la emisión de los gases nocivos. En definitiva, se trataría de cortar el problema de raíz, reduciendo el uso del petróleo, el gas y el carbón y apostando por las energías renovables en la industria y el transporte.

Finalmente, si se produjo una mejora de las tecnologías. Consiguiendo el uso más eficiente y racional de la energía, así como la aplicación de mejores sistemas de limpieza de los gases desprendidos, contribuiría también a reducir el problema.

#### 1.4.2 Calentamiento Global

Actividades humanas comunes, como la quema de combustibles fósiles –carbón, petróleo y gas- y la destrucción de bosques, se han convertido en las principales

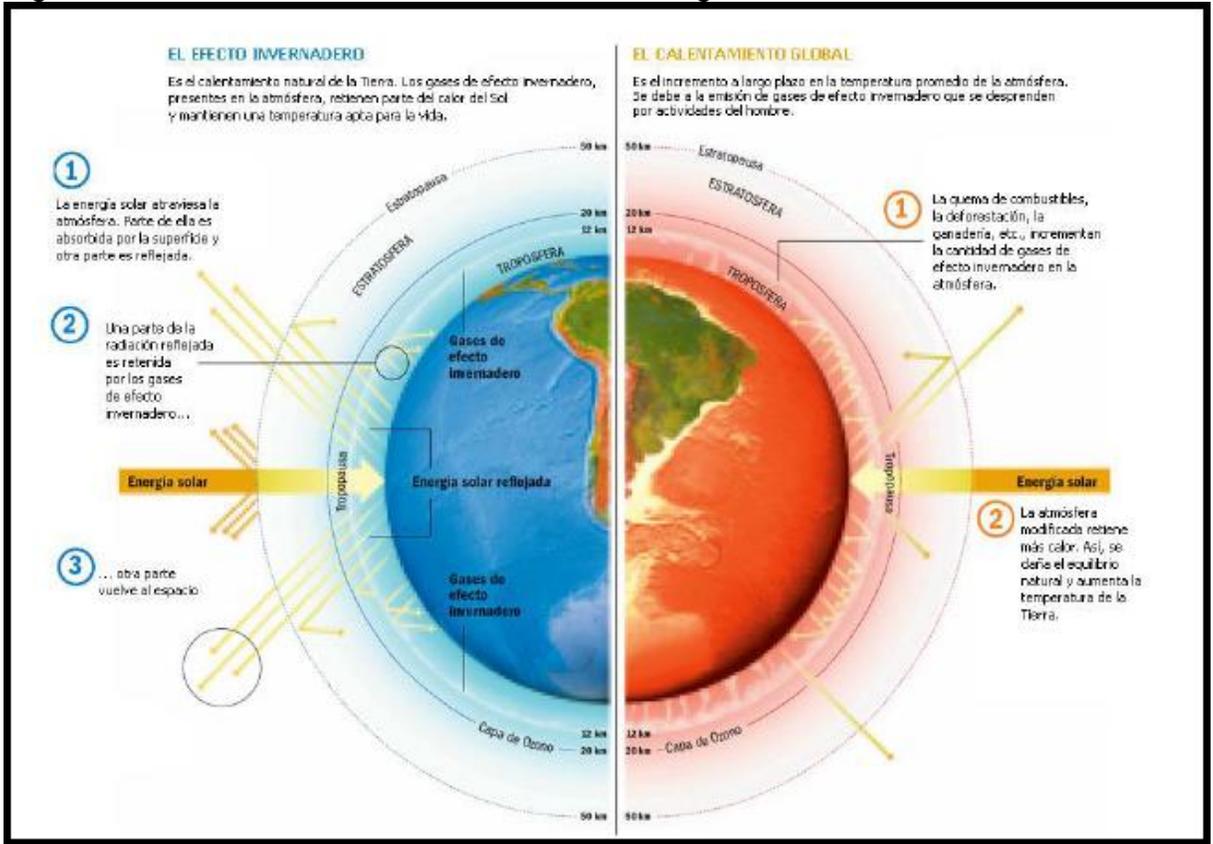
causas de la emisión a la atmósfera de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el gas más peligroso, no debido al ataque en sí a la atmósfera sino en la gran cantidad de este gas que existe, en la generación del efecto invernadero.

Según especialistas, la producción energética provoca además, a nivel mundial, el mayor consumo de combustibles fósiles; claro está que con diferencias importantes entre unos países y otros.

Asimismo, las últimas mediciones reflejan que más del 90% del dióxido de carbono presente en la atmósfera procede de Europa y USA.

El calentamiento global está asociado a un cambio climático que puede tener causa antropogénica o no. El principal efecto que causa el calentamiento global es el efecto invernadero, fenómeno que se refiere a la absorción –por ciertos gases atmosféricos; principalmente  $\text{CO}_2$ - de parte de la energía que el suelo emite, como consecuencia de haber sido calentado por la radiación solar.

Figura 15. Efecto invernadero vs. Calentamiento global.



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible en <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2%20->

[%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1\]](#)

El efecto invernadero natural que estabiliza el clima de la Tierra no es cuestión que se incluya en el debate sobre el calentamiento global. Sin este efecto invernadero natural las temperaturas caerían aproximadamente en unos 30°C; con tal cambio, los océanos podrían congelarse y la vida, tal como la conocemos, sería imposible.

Para que este efecto se produzca, son necesarios estos gases de efecto invernadero, pero en proporciones adecuadas. Lo que preocupa a los climatólogos es que una elevación de esa proporción producirá un aumento de la temperatura debido al calor atrapado en la baja atmósfera.

Los efectos de este calentamiento son diversos. Se ha estimado que El calentamiento global ha ocasionado un aumento en la temperatura promedio de la superficie de la Tierra. A causa de la fusión de porciones de hielo polar, incrementando el nivel del mar entre 10 y 20 centímetros en el pasado siglo, y se estima que continuará aumentando.

La magnitud y frecuencia de las lluvias ha aumentado debido a un incremento en la evaporización de los cuerpos de agua superficiales ocasionado por el aumento en temperatura.

Los científicos estiman que la temperatura promedio continuará incrementando. Este incremento en la evaporación de agua conllevará en un aumento en la intensidad y frecuencia de los huracanes y tormentas. Además, esto causará que la humedad del suelo se reduzca debido al alto índice de evaporación.

Debido a esta evaporación de agua, los suelos se volverán más secos y perderán nutrientes con mayor facilidad. Esto cambiará las características del suelo, haciendo necesario que los agricultores se ajusten a las nuevas condiciones.

Un aumento en la temperatura de la superficie de la Tierra traerá como consecuencia un aumento de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, las enfermedades infecciosas causadas por mosquitos y plagas tropicales, y deshidratación debida al calor.

A pesar del incremento de la magnitud y frecuencia de las lluvias, el nivel de agua en los lagos y ríos disminuirá debido a la evaporación adicional causada por el aumento en la temperatura.

Algunos ríos de flujo permanente podrían secarse durante algunas épocas del año, y ríos cuyas aguas se utilizan para la generación de energía eléctrica sufrirían una reducción en su productividad.

Debido a los cambios climáticos y a los cambios en los ecosistemas terrestres, la vegetación característica de cada región se verá afectada. Los bosques de pinos se desplazarán hacia latitudes más altas, la vegetación tropical se extenderá sobre una franja más ancha de la superficie terrestre, y la flora típica de la tundra y la taiga ocupará un área más reducida.

Como consecuencia, al alterarse la vegetación característica de muchas reservas naturales, creadas para proteger el hábitat de especies amenazadas, estas reservas podrían dejar de ser el hábitat ideal para las mismas, ocasionando su extinción.

De igual manera, al ocurrir el proceso de desertificación en algunas áreas también se destruirá el hábitat de muchas especies.

En cuanto a los hábitats acuáticos, al aumentar la temperatura del agua superficial, la concentración de oxígeno disuelto presente en los mismos se reducirá. Esto hará que algunas de las especies acuáticas no puedan sobrevivir bajo esas condiciones, causando su eliminación de dichos ecosistemas.

## 1.5 PROTOCOLO DE KYOTO

La industrialización y el desarrollo de ciertas tecnologías han provocado daños irreversibles a nuestro planeta. Por eso la mayoría de países se adscribieron al llamado Protocolo de Kyoto. ¿Pero desde cuando existe este protocolo y en qué consiste?

Es un acuerdo al que se adscribieron en 1997 un centenar de países del mundo con el fin de limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero.

La Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro en 1992, marcó la toma de conciencia internacional sobre el riesgo del cambio climático. Los países más ricos, para los que una disminución del crecimiento parece ser más llevadera y que, por otra parte, han sido los responsables de las emisiones más importantes, se han comprometido en el año 2000 a estabilizar sus emisiones en los niveles de 1990. En 1997, el Protocolo de Kyoto, el que afirmó estos compromisos cuantitativos jurídicamente.

Los gases de efecto invernadero son:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**: que proviene esencialmente de la quema de combustibles fósiles y de la deforestación.
- Metano (CH<sub>4</sub>)**: su origen principal proviene de rumiantes, del cultivo de arroz, de los vertederos de residuos municipales, del petróleo y del gas.
- Halocarburos (HFC y PFC)**: son los gases utilizados en sistemas de refrigeración y la producción de frío, los gases propulsores de aerosol.
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)**: proviene de la utilización de fertilizantes nitrogenados y de determinados procesos químicos.
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)**: utilizado, por ejemplo, en los transformadores eléctricos.

Los compromisos asumidos por los países desarrollados son ambiciosos. Para facilitar su cumplimiento, el Protocolo de Kyoto prevé para estos países la posibilidad de utilizar los mecanismos llamados de flexibilidad para complementar las políticas y medidas que cada uno de ellos deberá aplicar a nivel nacional.

Estos mecanismos son tres:

- Los “permisos de emisión”**: esta disposición permite vender o comprar derechos de emisión entre países industrializados.
- La “Aplicación Conjunta”**: permite, entre los países desarrollados, hacer inversiones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero fuera del territorio nacional y beneficiarse con créditos de emisión generados por reducciones obtenidas.
- El “Mecanismo de Desarrollo Limpio”**: similar a la disposición anterior, con la diferencia que las inversiones son hechas por un país desarrollado en un país en desarrollo.

#### 1.5.1 El protocolo de Kyoto en la actualidad

Los resultados del Protocolo de Kyoto reflejados hasta el final de su aplicación en 2012 reflejaron que el volumen total de las emisiones de gases de efecto invernadero se redujeron un 22% y que se logró la meta de la última fase del protocolo de Kyoto, hasta 2012, fue adoptada por más de 190 países, entre los que no se encuentra Rusia y tampoco India, China y Estados Unidos, que firmaron su propio acuerdo de emisión de gases, el acuerdo Asia-Pacífico.

En 2014, durante la XX Conferencia sobre el Cambio Climático en Lima, Perú, las principales potencias presentaron una serie de acciones que han prometido llevar a cabo. Además, se han sentado las bases para elaborar los planes nacionales y propuestas de reducción de emisión de gases, las cuales deben estar listas en

octubre de 2015. Todas estas propuestas serán tratadas en diciembre de 2015 en París durante la XXI Cumbre sobre el Cambio Climático.

A la espera de llevar a un nuevo acuerdo global, el Protocolo de Kyoto sigue dejando notar sus efectos positivos en todo el mundo. No en vano hay en la actualidad más de 8.000 proyectos abiertos en más de 100 países del mundo. Estos proyectos han sido creados por el CDM (Mecanismo de Desarrollo Limpio), un organismo surgido a raíz del Protocolo de Kyoto y que ha permitido a países subdesarrollados o en vías de desarrollo tener la posibilidad de apostar por un desarrollo sostenible.

## 2. EL HIDRÓGENO Y SUS SISTEMAS:

A diferencia de los hidrocarburos actuales, condenados a terminarse, el hidrógeno se encuentra combinado con otros elementos de todo el planeta, siendo así el elemento más básico y más fácil de encontrar en el universo. Se trata de un gas constituido por moléculas con dos átomos de hidrógeno.

Fue descubierto por Cavendish en 1766. Más tarde, en 1781 descubrió que era un gas combustible que al arder formaba agua. Este descubrimiento le indujo a bautizarlo con el nombre de hidrógeno, que significa “generador de agua”. En definitiva, este gas es el componente esencial del Sol y las estrellas. Aunque es preciso observar que aun tratándose del elemento más abundante de la naturaleza, raras veces se encuentra de manera libre debido a su facilidad para combinarse.

Así pues, se deberá considerar al hidrogeno como un vector energético ya que no puede explotarse directamente como el petróleo o el carbón, sino que ha de generarse mediante otros componentes químicos, convirtiéndose en un portador de energía secundario.

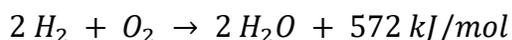
### 2.1 PROPIEDADES

El hidrógeno ( $H_2$ ) es un gas incoloro, inodoro e insípido que es 14,4 veces más ligero que el aire. Sus masas atómicas  $i$  moleculares son  $1,007940 \text{ kg/kmol}$  y  $2,01588 \text{ kg/kmol}$ .

Se encuentra a en estado gaseoso a  $25^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ atm}$  ( $101,325 \text{ kPa}$ ) y su temperatura de fusión es de  $-259,2^\circ\text{C}$ . La temperatura de ebullición de esta substancia es de  $-252,77^\circ\text{C}$ .

La constante específica del gas (que equivale a la constante universal de los gases entre el peso molecular del hidrógeno) es  $R' = R/M_{H_2} = 8314/2,01588 = 4124,3 \text{ J / (kgK)}$  y su constante de difusión ( $D$ )  $0,61 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

El hidrógeno gaseoso es muy inflamable y arde en concentraciones muy bajas en aire (4% de  $H_2$ ). La entalpía de combustión del hidrógeno es  $-286 \text{ kJ/mol}$ , y la reacción de combustión es la siguiente:



Cuando se mezcla con oxígeno en un amplio rango de proporciones el hidrógeno explota. En el aire, el hidrógeno arde violentamente. Las llamas de oxígeno e hidrógeno puro son casi invisibles al ojo humano, como se constata al ver lo tenues que son las llamas de los motores principales de las lanzaderas espaciales (en contraposición a lo fácilmente visibles que son las llamas de los cohetes impulsores de las lanzaderas). Por este motivo, es difícil detectar visualmente si un escape de hidrógeno está ardiendo.

Otra característica de los fuegos alimentados por hidrógeno es que las llamas tienden a ascender rápidamente con el gas a través del aire causando menos daños que los fuegos alimentados por hidrocarburos. Por ejemplo, dos tercios de los pasajeros del dirigible Hindenburg (que sufrió un accidente el 1937) sobrevivieron al incendio, y muchas de las muertes que se produjeron fueron por caídas al vacío y por la combustión de gasolina.

En estado líquido, el hidrógeno también es incoloro, excepto en capas gruesas que tiene un aspecto azul pálido, y tiene una densidad relativa de 0,070. Si se deja evaporar rápidamente bajo poca presión se congela transformándose en un sólido incoloro.

El hidrógeno suele producirse como una mezcla de dos distribuciones nucleares diferentes, ortohidrógeno (los núcleos giran en paralelo) y parahidrógeno (los núcleos no giran en paralelo).

El hidrógeno ordinario, llamado deuterio, suele estar compuesto de unas tres cuartas partes de ortohidrógeno y una cuarta parte de parahidrógeno. Los puntos de ebullición y fusión de ambas formas difieren ligeramente de los del hidrógeno ordinario.

Además del deuterio ( $H_2$ ), el hidrógeno de uso común, existen dos isotopos más del hidrógeno, el protio y el tritio.

Figura 16. Propiedades de los elementos  $H_2$  -  $D_2$  -  $T_2$

Constantes físicas	$H_2$	$D_2$	$T_2$
Masa atómica (uma)	1,0078 (H)	2,0141 (D)	3,0160 (T)
Punto de ebullición (K)	20,6	23,9	25,2
Longitud de enlace (Å)	0,7414	0,7414	0,7414
Energía de enlace (kJ·mol <sup>-1</sup> )*	435,5	443,4	446,9
Calor latente de fusión (kJ·mol <sup>-1</sup> )	0,117	0,197	0,250
Presión de vapor (mm Hg)	54	5,8	
* medida a -259.1 °C			

Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible[<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

El primero, llamado protio ( $H_1$ ), es el isótopo más común con una abundancia de más del 99,98% en la esfera terrestre. El núcleo de este isótopo está formado por un solo protón y es el único isótopo estable que no posee neutrones.

El tritio ( $H_3$ ) contiene un protón y dos neutrones en su núcleo, siendo altamente radiactivo y poseyendo un periodo de semidesintegración de más de 12 años.

Pequeñas cantidades de tritio se encuentran en la naturaleza por efecto de la interacción de los rayos cósmicos con los gases atmosféricos, aunque también ha sido liberado tritio por la realización de pruebas de armamento nuclear.

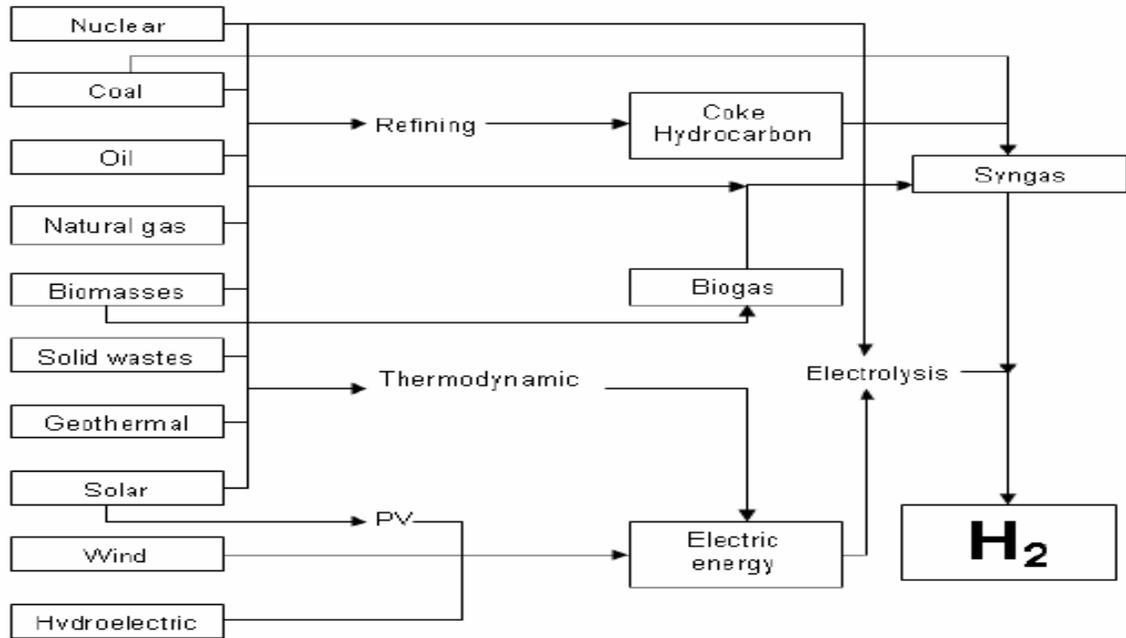
El tritio se usa en reacciones de fusión nuclear, como trazador en geoquímica isotópica y en dispositivos luminosos auto-alimentados. Además, en el pasado se utilizaba tritio como radiomarcador en experimentos químicos y biológicos aunque actualmente está cayendo en desuso.

## 2.2 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

En la naturaleza, el hidrógeno está siempre en forma enlazada, en compuestos orgánicos y en el agua. El hidrógeno puede producirse en diferentes fuentes, por ejemplo, carbón, gas natural, gas licuado del petróleo (LPG), propano, metano, gasolina, diesel ligero, residuo pesado, biomasa seca, biomasa derivada de combustibles líquidos (tales como metano, etano, biodiesel), nuclear, así como del agua (Figura 17).

Actualmente, el hidrógeno se produce principalmente de combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón). La reformación con vapor de agua es el proceso termoquímico más usado para producir hidrógeno de materias primas tales como gas natural, carbón, metanol, etanol o gasolina.

Figura 17. Diferentes rutas para la obtención de hidrógeno.



Fuente: Conte, M, Lacobazzi, A., Ronchetti, M, Vellone, R. J. Power Sources, 100(2001) 171 – 187.

Tabla 1. Licenciadores de tecnologías de plantas de hidrógeno, Tipo, Capacidad de Producción y número.

Licenciadores	Tipo	Capacidad (MMpies <sup>3</sup> )	plantas de H <sub>2</sub> en el mundo
Linde AG	SR-WGS(HT)-PSA	1-100	250
Technip	SR-WGS(HT)-PSA	-	220
Uhde	SR-WGS(HT)-PSA	-130	56
Haldor Topsøe	SR-WGS(HT)-PSA	0.2 – 200	21
UOP LLC	PSA (Polybed)	-200	700
UOP LLC	Membrana (Polysep)	-320	50
Howe-Baker engineers	SR-WGS(HT)-PSA	1-90	170
Foster Wheeler	SR-WGS(HT)-PSA	1 – 95	100
Lurgi Oel-Gas-Chemie	SR-WGS(HT)-PSA	1-200	105
Haldor Topsøe	Metanol SR-PSA	-1	10
Air products	Membrana (PRISM)	-	270
Air products	PSA (PRISM)	15-120	270

Referencia: Hydrocarbon Processing, Gas Processes, Gulf Publishing Co., (2002).

SR = Reformación con vapor, WGS = Mutación de CO con vapor,

HT = Temperatura alta, PSA = Adsorción con alta presión

Fuente: Conte, M, Lacobazzi, A., Ronchetti, M, Vellone, R. J. Power Sources, 100(2001) 171 – 187.

Los procesos de gasificación y pirolisis se usan cuando la alimentación son sólidos tales como aceites pesado y residual. En efecto, las refinerías son grandes consumidoras de hidrógeno y su consumo está incrementándose por la necesidad de convertir residuos pesados y para producir combustibles diesel y gasolina de quemado limpio conteniendo muy bajas cantidades de azufre, de aromáticos y de olefinas.

Una mínima cantidad de hidrógeno se obtiene en las refinerías de petróleo como subproducto de los procesos de reformación y desintegración catalítica. En la tabla 1 se muestran los licenciadores, el tipo de planta, la capacidad de producción y las plantas de hidrógeno en el mundo.

## 2.2.1 A partir del agua

### 2.2.1.1 Electrólisis

La electrólisis del agua es uno de los procedimientos más limpios, además de los más simples e intuitivos, para obtener hidrógeno. Este proceso, descubierto por M.Faraday en 1820, consiste en descomponer el agua ( $H_2O$ ) en sus componentes constituyentes, hidrógeno y oxígeno mediante un aporte energético, la electricidad.

Dicha corriente eléctrica puede proceder de fuentes renovables como no renovables. Evidentemente, si se utilizaran energías no renovables como combustibles fósiles no se presentaría como la mejor opción, puesto que mediante procesos de reformado de hidrocarburos los rendimientos son mucho mayores y de menor costo.

Así pues, la electrólisis se presenta como un proceso de obtención de hidrógeno cuya principal ventaja sería su posibilidad de combinarse con las energías renovables, de tal manera que mediante la energía renovable se obtuviera la electricidad necesaria para la electrólisis de una forma, además, rentable.

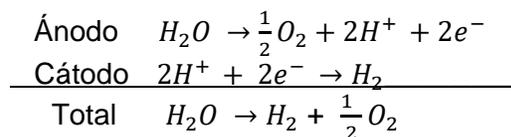
Conjuntamente a esto, el uso simultáneo de energías renovables permitiría la obtención de un combustible benigno para el medio ambiente a través de un proceso limpio, a diferencia de cómo pasaría con el reformado de hidrocarburos, que para dicha obtención se liberarían emisiones a la atmosfera.

El principio de funcionamiento de la electrolisis es conectar una fuente eléctrica a dos electrodos, comúnmente de algún metal como platino o acero inoxidable, que se encuentran sumergidos en el agua que actúa como electrolito facilitando la migración de los iones.

En una cuba electrolítica típica el hidrógeno aparecerá en el cátodo (electrodo positivo), mientras que el oxígeno aparecerá en el ánodo (electrodo negativo).

Si se asumiera un rendimiento ideal, la cantidad de hidrógeno generado sería el doble que la cantidad de oxígeno, y ambas cantidades serían proporcionales a la carga eléctrica conducida por la solución.

La electrolisis suele llevarse a cabo a temperaturas entre 80 – 85 °C y la reacción electroquímica que se da en el proceso de separación del agua en sus componentes es:



Este proceso tiene una eficiencia de entre el 50 y 75%, aunque en el año 2002 se publicó en el Journal of electrochemical Society un artículo de H. Cheng, K.Scott, C.Ramshaw en que se hablaba de un tipo de electrólisis, llamada gravitacional que trabaja con rendimientos del 85 al 95%. Dicha tecnología la comercializó “Electro Hydrogen Generator”.

Este proceso constituye sólo un 4% de la producción de hidrógeno, aunque la pureza es mayor del 99%

### 2.2.2.2 Termólisis

La termólisis consiste en la separación de los componentes de una sustancia mediante temperaturas elevadas. Para la ruptura térmica de la molécula del agua se requieren temperaturas excesivamente elevadas (alrededor de los 2250 °C), así que en todo caso, la ruptura de manera directa es inabordable.

Los procesos más prometedores para la termólisis del agua consisten en los ciclos termoquímicos que se recogen en la tabla. Estos ciclos se pueden implantar ya sea con energía solar concentrada o mediante energía nuclear. El ciclo que mayores eficiencias presenta a temperaturas moderadas es el *SI* (azufre-yodo) con un 38%, mientras que el ciclo que mejor funciona o se presenta más interesante a temperaturas elevadas es el *Zn/Zno*.

Tabla 2. Clases de termólisis.

Clase I (T<= 1.000K)			
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas "moderadas"	Ciclos de la familia de azufre	Descomposición del ácido sulfúrico $H_2SO_{4(g)} \rightarrow SO_{4(g)} + H_2O(g) + \frac{1}{2}O_3(g)$	T=1.000
	Ciclos del tipo UT-3	Hidrólisis de bromuro de calcio y del bromuro de hierro. $CaBr_2(s) + H_2O(g) \rightarrow CaO(s) + 2HBr(g)$ $3FeBr_2(s) + 4H_2O(g) \rightarrow 3Fe_3O_4(s) + 6HBr(g) + H_2(g)$	T=900
Clase II(1000 k <=T<= 2.500K)			
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas "elevadas"  Des-carbonización de combustibles fósiles	Reducción de óxidos metálicos	Disociación de óxido metálico $M_2O_2 \rightarrow xM + y/2O_2$	T=2.500
	Pirólisis (Craking)	Descomposición térmica de hidrocarburos $C_xH_2 \rightarrow xC(g) + y/2H_2$	T=1000
	Reformado	Des-carbonización de hidrocarburos ligeros $C_xH_2 \rightarrow xH_2O + xCO + (\frac{y}{2} + x)H_2$	T=1000
	Gasificación	Des-carbonización de hidrocarburos pesados o carbón $C_xH_2 \rightarrow xH_2O + xCO + (\frac{y}{2} + x)H_2$	T=1000
Clase III (T>2.500K)			
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)

Termólisis directa del agua	Disociación del agua $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$	T=2.500
-----------------------------	---	---------

Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible[<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

## 2.2.2 A partir de procesos biológicos

Aunque la mayor parte de los sistemas biológicos de generación de hidrógeno se encuentran aún en fase de desarrollo, su aplicación en el futuro es prometedora. Entre estos procesos se destacan la generación fotobiológica y la generación fermentativa.

### 2.2.2.1 Producción fotobiológica

La producción de hidrógeno es un proceso llevado a cabo por microorganismos muy variados, desde procariontas a eucariotas y desde fotolitotrofos a quimioorganotrofos.

En los microorganismos fotosintéticos son dos las enzimas implicadas en la producción de hidrógeno, la hidrogenasa y la nitrogenasa, mientras que en los microorganismos no fotosintéticos son varias las rutas fermentativas utilizadas para la producción de hidrógeno.

#### 2.2.2.1.1 Producción de hidrógeno por hidrogenasas

La reacción de generación de hidrógeno por microorganismos fotosintéticos basada en la hidrogenasa puede realizarse de dos formas diferentes, bien en condiciones de iluminación o bien en oscuridad

Producción en condiciones de iluminación: en este caso, la producción está asociada a la fijación de  $CO_2$  atmosférico en condiciones de iluminación y la posterior producción de hidrógeno en condiciones de ausencia de oxígeno (anaerobiosis) en oscuridad. La mayor limitación de esta forma de producción de hidrógeno es la inhibición de la hidrogenasa por la acción del oxígeno generado por el propio metabolismo.

Producción en oscuridad: *Scenedesmus*, entre otras algas, es capaz de producir hidrógeno no únicamente bajo condiciones de iluminación, sino también en oscuridad y en anaerobiosis por fermentación, a partir del almidón acumulado intracelularmente. Este segundo sistema de producción, aunque algo menos eficiente, permite realizar un proceso en continuo, ya que no se genera oxígeno que pueda inhibir la enzima hidrogenasa.

#### 2.2.2.1.2 Producción de hidrógeno por nitrogenasas

La ruta preferente de producción de hidrógeno por cianobacterias es la utilización de la enzima denominada nitrogenasa. Este sistema es específico de bacterias y no existe en organismos eucariotas (algas).

La reacción de producción de hidrógeno por la nitrogenasa está basada en la capacidad que tiene dicha enzima de modificar su función habitual ( $N_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 2NH_3$ ) y catalizar la síntesis de hidrógeno según una reacción distinta ( $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ ), en presencia de argón.

La enzima nitrogenasa es, al igual que la enzima hidrogenasa, extremadamente sensible a la presencia de oxígeno. Por ello, las cianobacterias deben recurrir a sistemas que impidan la presencia de oxígeno. Existen dos estrategias para lograr evitar dicha inhibición.

En algunos casos, la separación del metabolismo productor de oxígeno y la reacción de la nitrogenasa están separadas en el tiempo. En otros casos, la actividad fijadora de nitrógeno (y, por lo tanto, productora de hidrógeno) se realiza en células especiales denominadas heterocistos.

En este último caso, en las células vegetativas se producen compuestos orgánicos a partir del dióxido de carbono y el oxígeno en condiciones de iluminación, mientras que en los heterocistos se produce la generación de hidrógeno.

Otros grupos de bacterias fotosintéticas anaerobias son capaces también de realizar procesos de biofotólisis, en condiciones anoxigénicas en presencia de luz, utilizando compuestos orgánicos como fuente de carbono. Estas eubacterias fotosintéticas, encuadradas en dos grupos relacionados (bacterias rojas no del azufre y bacterias verdes no del azufre), son capaces de obtener elevadas producciones de hidrógeno. Las especies de eubacterias fotosintéticas sobre las que más estudios se han realizado pertenecen al género *Rhodobacter*, fundamentalmente *Rhodobacter sphaeroides* y *Rhodobacter capsulatus*.

### 2.2.2.2 Generación fermentativa

Algunos grupos de bacterias fermentadoras tienen la capacidad de generar hidrógeno a partir de azúcares simples por tres rutas que se denominan fermentación butírica, fermentación ácido mixta y fermentación butanodiólica, en la que se generan hasta 2 moles de hidrógeno por mol de glucosa, además de otros subproductos de interés económico.

La fermentación butanodiólica es característica de los géneros *Serratia*, *Enterobacter* y *Bacillus* (aunque en este último caso la síntesis de hidrógeno se realiza a partir del ácido pirúvico), siendo los productos de la fermentación butanodiol, etanol e hidrógeno.

La fermentación ácido-mixta es una fermentación característica de los géneros *Escherichia*, *Salmonella*, *Shigella*, *Proteus*, *Yersinia*, *Photobacterium* y *Vibrio*, en la que se produce principalmente una variedad de ácidos (acético, láctico, fórmico), etanol e hidrógeno

Finalmente, la fermentación butírica permite obtener elevados rendimientos de hidrógeno, junto con ácido butírico, acético y  $CO_2$  a bacterias anaerobias de los géneros *Clostridium* y *Sarcina*. La fermentación de la acetona-butanol también realizada por *Clostridium* es otra variante de este proceso.

Un esquema general del proceso de producción fermentativa de hidrógeno se basa en la siguiente reacción:



Este proceso es capaz de generar 0,5  $m^3$  de hidrógeno por kg de hidrato de carbono utilizado.

Además de dichos sistemas fotosintéticos y fermentativos, también se han desarrollado sistemas mixtos que combinan diversos procesos a la vez.

### 2.2.2.3 sistemas mixtos

El sistema fermentativo de generación de hidrógeno tiene como limitación la no conversión completa de la materia orgánica presente en el residuo en  $CO_2$  e hidrógeno. Esto sucede debido a que se trata de un sistema fermentativo, que debe mantener el balance de oxidación-reducción final del proceso.

Por lo tanto, una vez realizado el proceso de fermentación se obtiene un residuo con una elevada proporción de compuestos orgánicos de bajo peso molecular,

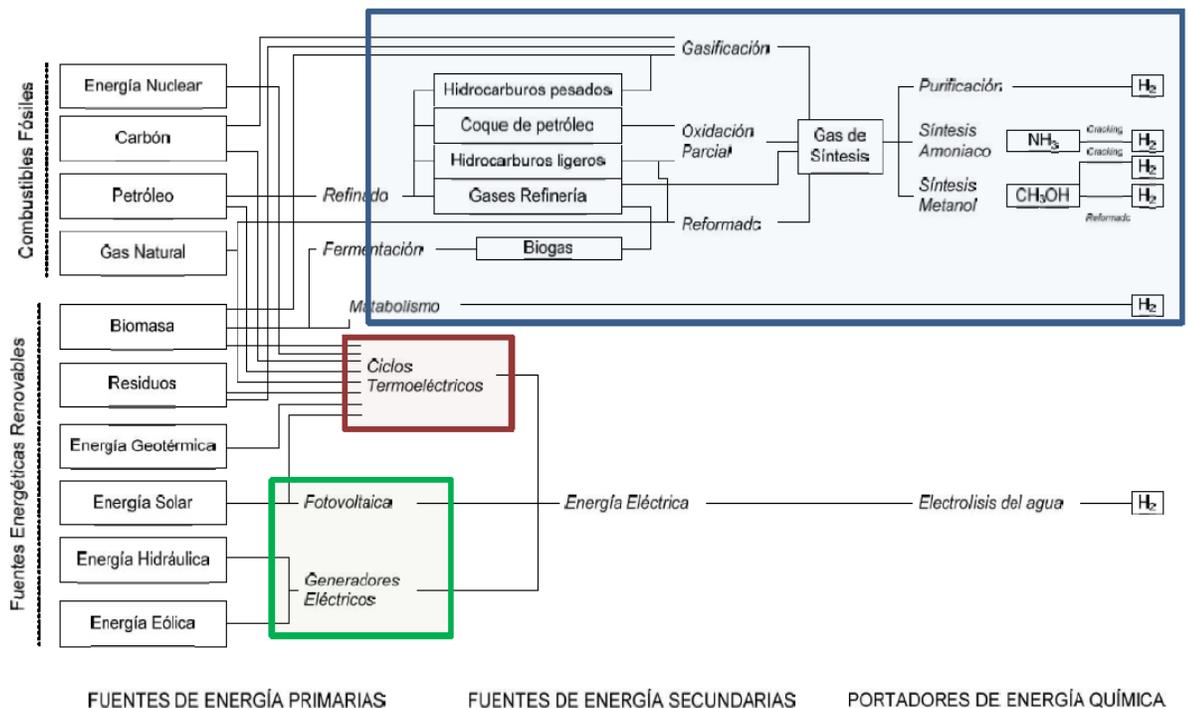
que pueden bien ser recuperados como subproductos valorizables, bien utilizados en una segunda etapa de producción de hidrógeno.

Esta segunda etapa podría consistir en la utilización de bacterias fotosintéticas, que, como ya se ha descrito anteriormente, tienen la capacidad de utilizar los ácidos orgánicos y alcoholes para su metabolismo y generar hidrógeno a partir de ellos.

### 2.3 ESTADO ACTUAL DE LA FORMACIÓN HIDRÓGENO

En la figura 18 se clasifican los métodos de producción de hidrógeno en tres procesos globales.

Figura 18. Fuentes de obtención de Hidrógeno.



Fuente: MORENO, Luis Gabriel. VARGAS, Carlos Eduardo. La tecnología del Hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. Trabajo de Grado (Magister en Dirección y Gerencia de empresas). Facultad de Administración. Universidad de nuestra señora del Rosario. Disponible [\[http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3\]](http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3)

El primero de los segmentos agrupa los métodos de producción de hidrogeno mediante procesos de descomposición química de otros productos y está encerrado en la Figura 19 con el recuadro azul. El segundo de los segmentos corresponde a los procesos relacionados con la generación de energía eléctrica a

partir del aprovechamiento del calor potencial de materiales combustionables en ciclos termoeléctricos que aprovechan la energía calórica resultante con la ayuda de generadores eléctricos y está relacionado con las líneas que tocan el recuadro de color vino tinto. El tercer grupo corresponde a métodos de producción de hidrogeno relacionados con generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía como la luz solar o los movimientos de masa aprovechables como lo son el viento y el agua, este último grupo está identificado en la Figura 18 con el recuadro de color verde.

El nodo Gas de Síntesis representa el punto de convergencia de sustancias con contenido de hidrógeno y que son susceptibles de ser alteradas químicamente para obtener hidrógeno como energía química, siempre con subproductos no deseados como  $CO_2$  y otros óxidos de nitrógeno, según (Martínez de la Cruz, 2010), las 6 formas de producción de hidrógeno que lideran la producción son:

- Reformación de gas natural
- Descomposición catalítica de gas natural
- Oxidación parcial de aceites pesados
- Gasificación de carbón
- Electrolisis de agua
- Generación eléctrica nuclear

Por otro lado los ciclos termoeléctricos funcionan con el uso de una fuente de calor que calienta una sustancia normalmente agua y la lleva al punto de ebullición produciendo vapor, el cual pasa a altas presiones por unos conductos hasta llegar a una turbina conectada a un generador eléctrico, el cual completa el ciclo convirtiendo la energía térmica en eléctrica, para el posterior procesamiento de agua mediante electrolisis para producir hidrógeno y oxígeno.

### 2.3.1 Estado actual de las tecnologías para la producción de hidrógeno

En la tabla 3, se muestra el estado actual del desarrollo de la tecnología con respecto a los diferentes tipos de producción de hidrógeno.

*Tabla 3.* Estado actual de las tecnologías para la producción de hidrógeno

<b>Tecnología</b>	<b>Estado de desarrollo de la tecnología</b>
Reformación de gas natural	Madura
Descomposición catalítica gas natural	Madura

Oxidación parcial de aceites pesados	Madura
Gasificación de carbón	Madura
Electrólisis de agua	Madura
Generación eléctrica nuclear	Madura
Ciclos termoquímicos	Etapa investigación y desarrollo
Procesos fotoquímicos	Inicios investigación y desarrollo
Procesos foto electroquímicos	Inicios investigación y desarrollo
Procesos foto biológicos	Inicios investigación y desarrollo

Fuente: MORENO, Luis Gabriel. VARGAS, Carlos Eduardo. La tecnología del Hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. Trabajo de Grado (Magister en Dirección y Gerencia de empresas). Facultad de Administración. Universidad de nuestra señora del Rosario. Disponible [\[http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3\]](http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3)

## 2.4 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

Uno de los grandes problemas en la utilización del hidrógeno es el almacenamiento de éste. Esto se debe a que esta sustancia tiene riesgos debidos en parte a la naturaleza explosiva del combustible y, por otro lado, a la presión a la que se contiene al hidrógeno en un recipiente en estado gaseoso.

El hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso, líquido o sólido. Dependiendo del estado en que se encuentran se utilizan las siguientes denominaciones:

- L  $H_2$  para el hidrógeno líquido (Liquid hydrogen)
- CG  $H_2$  hidrógeno gaseoso comprimido (Compressed Gaseous Hydrogen)
- LCG  $H_2$  hidrógeno líquido a gas comprimido, transformado en la misma hidrogenera (Liquid to compressed hydrogen).

### 2.4.1 Estado gaseoso

La técnica más sencilla para almacenar el hidrógeno es comprimiéndolo en fase gaseosa. Actualmente se almacena a 200 *bar*, aunque mediante equipos avanzados se llega a los 700 *bar*. Una manera común hoy en día para el almacenamiento del combustible es a 350 *bar* en balas de materiales compuestos.

Por lo que respecta al consumo, el gasto para elevar la presión del gas es elevado pero no es comparable al consumo para el procedimiento de licuefacción.

A 200 *bar* se consume el 10% de la energía almacenada mientras que a 700 un 15% de ésta.

Los tanques o cilindros usados para el almacenaje de gas hidrógeno a alta presión (CG  $H_2$ ) se pueden dividir en los tipos: I, II, III, IV dependiendo de sus características constructivas.

Los cilindros del tipo I son tanques de metal, generalmente acero o aluminio) que admiten una presión máxima de trabajo de 200 *bar* para el acero y de 175 *bar* para el aluminio.

Los de tipo II también son metálicos, pero están reforzados con unos filamentos, generalmente fibra de vidrio o carbono. Son más ligeros que los anteriores y pueden trabajar aproximadamente hasta presiones de 263 *bar* los fabricados en aluminio y fibra de vidrio, mientras que los constituidos por acero y carbono o arámida soportan presiones de hasta 299 *bar* .

El tercer cilindro, tipo III, está fabricado de materiales compuestos (carbono, fibra de vidrio o kevlar) y una fina capa metálica. Esta capa evita que fugue el hidrógeno, mientras que los materiales compuestos soportan los esfuerzos mecánicos. Pueden trabajar con presiones de hasta 305 *bar* para los de aluminio i fibra de vidrio y de 438 *bar* para los de aluminio-kevlar.

Finalmente, el tipo IV está totalmente fabricado de materiales compuestos y es el más ligero de todos. Aun así presenta desventajas debido a la difusión del hidrógeno a través del polímero.

#### 2.4.2 Estado líquido

Para el almacenamiento líquido del hidrógeno éste se enfría hasta su licuación a - 253°C a presión ambiente y debe mantenerse en tanques o cilindros criogénicos especiales. A esas temperaturas su manipulación se complica, un aumento de presión producirá perdidas por sobrepresión, por lo que su uso está más bien reservado a fines industriales. Si se reduce la presión disminuyen los riesgos.

Por otra parte, el consumo energético de esta modalidad es muy elevado. Se consideran unas pérdidas del 30% respecto a la energía almacenada a la que tendríamos de sumar las derivadas del aporte energético que hay que efectuar para mantener el hidrógeno en estado líquido (alrededor del 1 o 2% diario).

### 2.4.3 Estado sólido

El hidrógeno puede almacenarse en materiales especialmente diseñados para actuar como portadores de hidrógeno. El peso y el volumen de estos sistemas son elevados.

Si bien generalmente a estos sistemas se les denominan almacenamiento en estado sólido en la realidad estos sistemas almacenan el hidrógeno, en estado gaseoso, en materiales mediante distintos mecanismos.

Los mecanismos más conocidos para el almacenamiento de hidrógeno basado en materiales son dos: la adsorción y la absorción.

En los mecanismos de adsorción, el hidrógeno se une directamente a la superficie del material. Estos procedimientos requieren materiales altamente porosos para maximizar el área superficial disponible para la adsorción del hidrógeno, además de para la liberación del hidrógeno con mayor facilidad.

Las estructuras metal-orgánicas (MOF), los clatratos y los hidruros químicos no reversibles son algunos de los materiales que funcionan con el mecanismo de adsorción. Además de la adsorción materiales como carbón ultra-poroso.

La absorción en cambio, consiste en la disociación de los átomos de Hidrógeno y su posterior incorporación en la red del sólido, en el interior del material. Los sistemas que se utilizan para almacenar mediante absorción son los hidruros metálicos reversibles, los hidruros complejos y los sistemas de nitrógeno.

Tabla 4. Comparación de almacenamiento de los diferentes combustibles.

Combustibles y almacenamiento	Densidad de energía de almacenamiento		Almacenamiento de 3kg de $H_2$ (360MJ)		Almacenamiento de 10kg de $H_2$ (1200MJ)	
	MJ/kg	MJ/l	Kg	l	Kg	l
Gasolina	43	32	8.3	11.3	28	37.5
$H_2$ Líquido	120	8.5	3	42.3	10	141
FeTiH	1.80	3	200	84	665	280
Mg $H_2$	8.73	7.85	41.3	46	138	153

Fuente: L.M. Das. International Journal of Hydrogen Energy, 21 (1996), 789-800

#### 2.4.4 Almacenamiento a gran escala

En las instalaciones que requieren un gran consumo de hidrógeno, la generación de éste se lleva a cabo en las cercanías con solo un almacenamiento intermedio a baja presión. Si la generación se hace lejos o sirve para instalaciones diferentes o alejadas se transporta por hidrogenoductos o a veces por ferrocarril o carretera.

El almacenamiento a bajas presiones no plantea problemas especiales y para ello se utilizan gasómetros semejantes a los de otros gases industriales. Se han empleado también, de manera semejante al gas natural, cavidades naturales: minas antiguas de sal (Reino Unido) o acuíferos (Francia). El único problema es la baja densidad que hace precisos grandes volúmenes. La reducción de volumen por el empleo de mayores presiones (de 200 a 450 *bares*) suele hacerse en depósitos cilíndricos, lo que está prohibido en algunos países como Japón.

Una reducción aún mayor se logra mediante licuefacción. Sus inconvenientes principales se deben a la baja temperatura involucrada (punto de ebullición: 252,7°C). Por una parte, los depósitos deben estar muy aislados. Por otra, para la licuefacción se invierte una energía próxima a 1/3 de la que el hidrógeno puede rendir. Además, el depósito debe estar comunicado con el exterior porque la temperatura crítica ( 239,8°C) está muy próxima a la de ebullición y existe el riesgo de sobrepresiones peligrosas.

La cuestión del almacenamiento se hace particularmente relevante cuando se trata de vehículos, para conjugar el volumen con la necesidad de su recarga y hay que ponderar la seguridad y las posibilidades de accidentes. La existencia de nuevos materiales de construcción, como los composites o materiales compuestos permite utilizar presiones de hasta 700 *bares*, pero en el caso de hidrógeno líquido el aislamiento hecho a base de capas de distintos aislantes limita la capacidad de almacenamiento.

Tabla 5. Almacenamiento de hidrógeno.

Como Gas	Como líquido
Depósitos: (Presiones bajas y altas)	Depósitos criogénicos
Absorción en: Carbón – Hidrocarburos líquidos	
Adsorción en: Carbón Activo – Nanotubos	

Formación de compuestos: Li AlH <sub>4</sub> , Li B H <sub>4</sub> , Na Al H <sub>4</sub> , Na B H <sub>4</sub> , K B H <sub>4</sub> , Mg H <sub>2</sub> , Fe Ti H <sub>1.7</sub> , La Ni <sub>5</sub> H <sub>6</sub> , Ba Re H <sub>9</sub> , Mg Ni H <sub>2</sub>	
---	--

Fuente: GUITIÉRREZ, Luis. El hidrógeno, combustible del futuro. En Real Academia Ciencias Exactas Físicas Nat. 2005. Vol.99, No. 1. pp69-67.

Otros métodos de almacenamiento (véase la tabla 6) incluyen métodos físico químicos en los que el equilibrio pueda desplazarse con la temperatura y la presión. Los equilibrios buscados son de absorción por líquidos orgánicos e inorgánicos, por adsorción con carbón activo o nanotubos y por formación de hidruros con metales o mezclas de metales. Los más estudiados han sido los de hierro-titanio, lantano-níquel y magnesio-níquel. Las investigaciones que ahora se realizan tratan de encontrar una solución razonable del compromiso entre capacidad de retención por el compuesto, cinética de formación del hidruro (tiempo) y condiciones de presión y temperatura para liberar el hidrógeno.

## 2.5 TRANSPORTE, DISTRIBUCIÓN Y REPARTO

El transporte de hidrógeno gas por conducciones, hidrogenoductos, está menos extendido que el del gas natural. Suele hacerse en zonas industrializadas en que su generación está centralizada y las distancias involucradas son menores. Algunos ejemplos se dan en la tabla 6.

Tabla 6. Hidrogenoductos.

Empresa	Situación	Caudal, Millones de m <sup>3</sup> /día	Longitud, km	Diámetro, cm	Presión, atm	Año de funcionamiento
PRAXAIR	Texas, City-bayport-Port Arthur, TX Carneys Point, NJ Whiting, IN	2,7 0.2 0.1	8	20		1970
Air Products and Chemicals	La Porte, TX Plaquemine, LA	1 0,8	200	10-30	3,4 –54,4	1970
Chemische Week hulls, AG	Ruhr Valley, Alemania	2,7	220	10-30	24,5	1938

ICI	Teeside, Inglaterra	0,5	16		51	1970
Air Liquide	Francia, Bélgica	0,4	340	10	100	1985

Fuente: GUITIÉRREZ, Luis. El hidrógeno, combustible del futuro. En Real Academia Ciencias Exactas Físicas Nat. 2005. Vol.99, No. 1. pp69-67.

En todo caso, en ellos las presiones de transporte no son muy altas, dependiendo principalmente de la distancia y del uso final del hidrógeno.

La información dada en la tabla 7 procede de la experiencia alemana. Puede observarse que con la experiencia actual los costos no pueden competir con la gasolina.

Tabla 7. Producción de hidrógeno, costos.

Producción de hidrógeno		
Proceso de obtención	Rendimiento neto, %	Coste de producción c €/Kwh (sin ingresos por energía)
Reformado	<74	2,4
Gasificación	hasta 60 ó 70	3,6 carbón 5,1 biomasa
Oxidación parcial	73-77	2,2
Electrolisis	73 (30 bar) 77 (100 bar)	5,6
Fuente: Prof. U. Wagner, Univ. Tecn. Munich		
Costes previstos de hidrógeno en estaciones de servicio		
Hidrógeno de reformado, €/kg		
hidrógeno líquido		2,30
hidrógeno de reformado centralizado		2,60
hidrógeno de reformado in situ		2,76
hidrógeno de electrolisis in situ		5,73
Gasolina (sin impuestos)		0,27
Fuente: Linde, 2002		

Fuente: GUITIÉRREZ, Luis. El hidrógeno, combustible del futuro. En Real Academia Ciencias Exactas Físicas Nat. 2005. Vol.99, No. 1. pp69-67.

La creación de un sistema de distribución semejante al de la electricidad, el petróleo y sus derivados o el más moderno, todavía en desarrollo del gas natural, requiere grandes inversiones, tecnología y equipamientos, además de tiempo.

Habría necesariamente que comenzar por grandes flotas, líneas de transporte, empresas municipales y tráfico en ciudades.

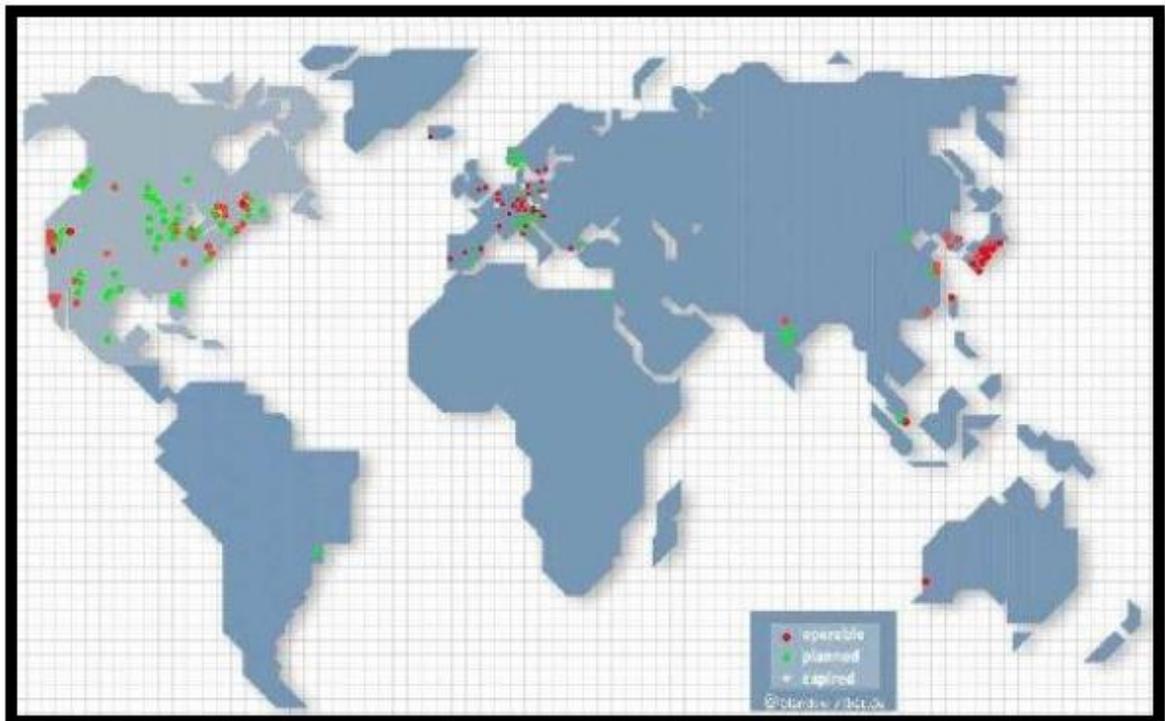
La distribución a automóviles podría hacerse con el equivalente a las gasolineras con hidrógeno líquido. Ya existen en diversos países estaciones de servicio en las que se presta este servicio. El hidrógeno gas a presión se sirve ya en flotas de autobuses como ocurre ya en Barcelona y en Madrid.

Se ha propuesto que, para acelerar el proceso de establecer un sistema general, se utilizaran algunos de los actuales gasoductos, tras modificar algunos componentes como los compresores, y observar el comportamiento del acero de las conducciones por su posible fragilización.

En Estados Unidos se transporta hidrógeno líquido en cisternas criogénicas sobre camión, vagón de ferrocarril y barcaza especialmente preparados.

En una fase posterior, más lejana, la red de conducciones podría ampliarse a otros menesteres.

Figura 19. Distribución y presencia de Hidrógeno a nivel mundial.



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible en <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20->

Hay pocos datos acerca de los costes o precios del hidrógeno tanto dependiendo del proceso seguido para su obtención como de los costes previstos para el suministro en estaciones de servicio.

Si se pretende que en el futuro la energía se asiente sobre la base de la “economía del hidrógeno” es preciso crear una infraestructura de distribución de éste para poder abastecer las demandas de la sociedad. Hoy en día está en discusión la logística más adecuada, planteándose diversas alternativas en función del uso final del hidrógeno.<sup>1</sup>

### 2.5.1 Fase gaseosa

La distribución de hidrógeno en gas presurizado se presenta muy interesante para el mercado masivo de vehículos privados, que podría recurrir a “hidrogeneras” que suministrasen hidrógeno presurizado, sirviéndolo licuado y encartuchado para motocicletas.

Para aplicaciones estacionarias en el sector residencial-comercial (menos de 200 *kWe*) y generación distribuida (más de 200 *kWe*) podría resultar rentable recurrir a canalizaciones, similares a las actuales de gas natural. Para aplicaciones de vehículos de mucho uso y en aviación el hidrógeno comprimido se podría servir en tanques.

Otro aspecto adicional a la distribución de hidrógeno es cómo se suministra éste a las “hidrogeneras”, si en forma canalizada, o mediante camiones en forma comprimida.

Cuando se transportan grandes volúmenes, la distribución por vía de gaseoductos es actualmente la opción más económica. Utilizar los gaseoductos de gas natural para distribuir hidrógeno es una opción que está siendo evaluada para reducir las inversiones necesarias. Puede ser posible mezclar hasta un 30% de hidrógeno con gas natural en los gaseoductos existentes de gas natural sin modificaciones en la infraestructura del gaseoducto. Este método necesitaría de un proceso de separación en el punto de consumo.

---

<sup>1 1</sup> “El hidrógeno, combustible del futuro”. Revista Real Academia de las Ciencias Exactas Físicas Naturales. Vol. 99, N°.1, pp 49-67,2005 España. Luis Gutiérrez Jodrea.

El hidrógeno se suministra hoy en día mediante tuberías en varias áreas industriales de los Estados Unidos, Canadá, y Europa. Las presiones de funcionamiento típicas van de 1 a 3  $MPa$ , con caudales de 310 a 8.900  $kg/h$ .

Figura 20. Distribución de Hidrógeno mediante tubería.



Fuente: Peña,C (2014,9 de abril) Ecopetrol incumplió contrato por atentado al oleoducto Caño Limón-Coveñas. Petróleo y Gas. Recuperado de <http://revistapetroleoygas.co/>

Por ejemplo, Alemania dispone una tubería de 210  $Km$  que funciona desde 1939, llevando 8.900  $kg/h$  de hidrógeno operando a presiones de 2  $MPa$ . La tubería más larga de suministro de hidrógeno del mundo es propiedad de Air Liquide, con una longitud de 400  $km$ ., y que conecta el norte de Francia con Bélgica. En Estados Unidos hay más de 720  $km$ . De tuberías de hidrógeno concentradas a lo largo de la costa del Golfo y la región de los Grandes Lagos.

Por otro lado, si el transporte se realiza por carretera se utilizan cilindros a alta presión, camiones cisterna o gaseoductos. El hidrógeno debe ser comprimido a alta presión para maximizar la capacidad de los tanques.

Los cilindros de gas a alta presión llevan el gas comprimido hasta 40  $Mpa$  y almacenan alrededor de 1.8  $kg$  de hidrógeno, pero son muy costosos de manejar y transportar.

Los camiones de tubos (tube-trailers) consisten en varios cilindros de acero montados en un marco protector. Pueden ser configurados para transportar entre 63 y 460kg de hidrógeno, dependiendo del número de tubos. Las presiones de operación son 20 – 60 Mpa.

También se analizan alternativas de producción “in-situ”, a partir de combustibles fósiles, especialmente gas natural, en una primera fase de transición, lo que permitiría aprovechar muchas de las infraestructuras existentes.

Parece claro que el problema no presenta una solución única, sino que habrá que buscar la solución más adecuada acorde con el contexto tecnológico, económico y social.

### 2.5.2 Fase líquida

Para su transporte por carretera la licuación del hidrógeno es económicamente viable cuando los volúmenes necesarios son pequeños. El hidrógeno líquido es transportado usando tanques de doble pared aislados para prevenir la evaporación flash del hidrógeno líquido.

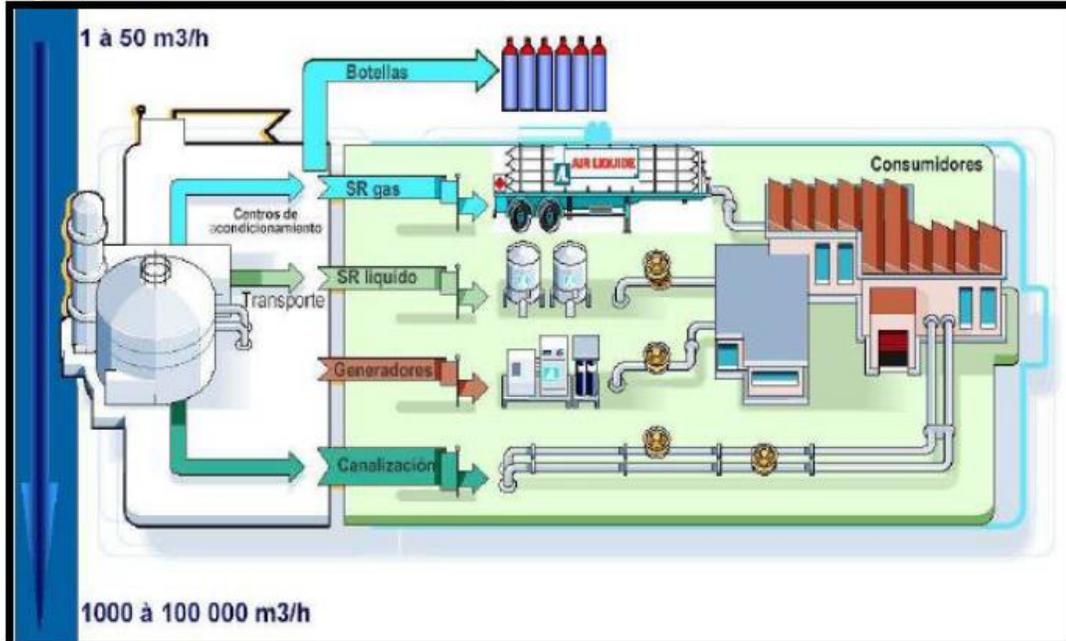
Algunos tanques utilizan un escudo de nitrógeno líquido para enfriar la pared exterior del contenedor de hidrógeno líquido para minimizar la transferencia de calor.

Los camiones cisterna pueden transportar 360 – 4300 kg de hidrógeno líquido. Los vagones tienen mayores capacidades, transportando entre 2900 – 9100 kg de hidrógeno. Las tasas de evaporación flash en los camiones es de entre 0,3 – 0,6%/día.

Las barcasas y los buques de altura también son considerados para el transporte por mar del hidrógeno a largas distancias. La evaporación flash en los buques se estima de 0,2 – 0,4%/día. Canadá ha desarrollado el diseño de algunos barcos para el transporte trasatlántico de hidrógeno. Ninguno de estos barcos se ha construido aún.

Otra opción para el transporte de hidrógeno líquido es a través de gaseoducto aislado que también incluiría un cable superconductor. El hidrógeno líquido actuaría como refrigerante para el superconductor y permitiría el transporte de la electricidad a largas distancias sin las altas pérdidas actuales de las líneas de potencia actuales. El principal problema con el transporte de hidrógeno líquido sería la especialización en las necesidades de aislamiento y las pérdidas de bombeo y re-enfriamiento del hidrógeno líquido durante el camino.

Figura 21. Distribución de la fase líquida.



Fuente: FAMILIAR XAUDARÓ, Cristian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores. Trabajo de grado (Ingeniería Técnica Naval). Facultad de náutica de Barcelona.2010. Disponible[<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2/%20-%20PROYECTO%20FINAL%20DE%20CARRERA%20-%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20POTENCIAL%20MEJORA%20DE%20LOS%20MOTORES%20ACTUA.pdf?sequence=1>]

## 2.6 SEGURIDAD DEL HIDRÓGENO

Para poder exitosamente implementar una economía de hidrógeno, la seguridad en la producción, almacenaje, transporte, manejo y uso del hidrógeno es imperativa. Como todos los combustibles, el hidrógeno tiene peligros inherentes y debe ser manejado con cuidado. Sin embargo el hidrógeno se ha ganado la reputación de sustancia altamente peligrosa. En realidad, el hidrógeno ha sido utilizado por años en procesos industriales y como combustible por la NASA, y se ha ganado un record positivo de seguridad. Como todos los combustibles, el hidrógeno puede ser manipulado y usado de manera segura.

El hidrógeno tiene propiedades únicas comparadas con otros combustibles. Algunas lo hacen más seguro, otras lo hacen más peligroso para ciertas operaciones. Por lo tanto, antes de trabajar en sistemas de hidrógeno, se deben comprender las propiedades del gas asociadas con la seguridad.

El principal riesgo que presenta el sistema de hidrógeno en la combustión no controlada es una fuga de hidrógeno. Para que haya combustión, debe estar

presente un oxidante y una fuente de ignición. El hidrógeno es combustible en un rango amplio de concentraciones en el aire, y varios procesos físicos comunes pueden servir como fuentes de ignición (llama al aire, superficies calientes, fricción, chispa eléctrica, descarga estática).

*Tabla 8. Propiedades físicas del hidrógeno (riesgosas)*

	<b>Hidrógeno</b>	<b>Metano</b>
Temperatura de auto ignición	520 °C	630 °C
Calor de Combustion (lower heating value)	120 MJ/kg	50 MJ/kg
Limite inflamabilidad inferior (en el aire)	4% por volumen	5.3% por volumen
Limite inflamabilidad superior(en el aire)	75% por volumen	17% por volumen
Mezcla Estequiometrica (en el aire)	29.5% por volumen	9.5% por volumen
Densidad (20C, 100kPa)	0.61 cm <sup>2</sup> /s	0.16 cm <sup>2</sup> /s
Viscosidad (20C, 100kPa)	8.814 μPa·s	11.023 μPa·s
Temperatura de la llama	2045 °C	1325 °C
Energia minima de Ignición	0.017 mJ	0.274 mJ

Fuente: DOÑAN V, Oscar. SERMEÑO M, José Salvador. Diseño de una pila de combustible de Hidrógeno para producir una diferencia de Potencial de 12 Voltios. Trabajo de Grado (Ingeniería Mecánica). Facultad de Ingeniería. Universidad Don Bosco, El salvador.2008.Disponible:[[http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/65/1/44375\\_tesis.pdf](http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/65/1/44375_tesis.pdf)]

Por lo tanto, una de las maneras más importantes para asegurar el uso seguro de hidrógeno es poseer un sistema de ventilación adecuado que no permita la concentración del combustible. Además, la eliminación o minimización de fugas de hidrógeno es importante. Estos tipos de seguridad mejor implementados por un buen diseño, la operación correcta y prácticas de mantenimiento. Debido a que el hidrógeno posee intrínsecamente una baja densidad energética volumétrica el almacenamiento a altas presiones (arriba de 10000 *psi*) y almacenado por líquido criogénico han sido considerados para aplicaciones de transporte. Estos poseen sus riesgos únicos.

Esta reputación de altamente peligroso le fue conferida al hidrógeno debido al accidente del Hindenburg. Pero estudios realizados por la NASA han demostrado que la causa principal del accidente fue una descarga electrostática que encendió la cubierta altamente inflamable del zeppelin.

## 2.6.1 Propiedades del gas hidrógeno que afectan la seguridad

### 2.6.1.1 Propenso a fugas

La baja viscosidad y pequeño tamaño molecular del hidrógeno lo hacen más propenso a fugas que otros gases comunes. Para un tamaño de agujero y presión dados el hidrógeno se escapará 2.8 veces más rápido que el gas natural, 5.1 veces más rápido que el propano en base al volumen. La densidad energética del hidrógeno es mucho menor que la del propano o la del metano, por lo tanto la razón de fuga energética del hidrógeno sería 0.88 veces la del metano y 0.61 veces la del propano para un tamaño de agujero y presión dados.

Un sistema que ocupe hidrógeno en forma de gas en el cual no existan fugas es prácticamente imposible. Sin embargo, la construcción de un sistema que es lo más cerrado posible y minimiza la fuga es deseable. La ventilación es una obligación.

### 2.6.1.2 Dispersión

El hidrógeno es más difusivo que la gasolina, metano y propano por lo cual tiende a dispersarse más rápidamente. Para fugas de hidrógeno de bajo momento, la flotabilidad afecta más el movimiento del gas que la difusividad.

Para fugas de alto momento, que son más probables en sistemas de alta presión, los efectos de la flotabilidad son menos significativos, y la dirección del escape determinará la movilidad. Localizaciones de corrientes de aire debido al viento o ventilación afectarán también el movimiento del gas.

Como consecuencia de las propiedades de dispersión, el gas hidrógeno tiende a dispersarse rápidamente y formar una mezcla inflamable con el aire. Sin embargo, en una atmósfera no confinada esta mezcla se diluirá rápidamente a niveles abajo del límite de inflamabilidad. Aunque las propiedades de dispersión del hidrógeno llevan a una formación más rápida de una mezcla combustible, también llevan a una dispersión más rápida y a una duración menor de riesgo de ignición que otro combustible en base a mismos volúmenes.

### 2.6.1.3 Gas de hidrógeno y detección de la llama

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, e insípido. Su presencia no puede ser detectada por los sentidos humanos. Además, las características únicas de un incendio de hidrógeno lo hacen difícil de percibir por los sentidos humanos. A diferencia de otros combustibles hidrocarbonos, los que irradian la mayor parte de

su energía como luz visible y calor, la llama del hidrógeno irradia significativamente menos calor y prácticamente ninguna luz. En cambio, la energía significativa de una llama de hidrógeno es irradiada en la región ultravioleta. Como resultado, el hidrógeno se quema con una luz azul pálida, que es difícilmente vista bajo luz solar o artificial. También, la percepción humana del calor no ocurre hasta el contacto directo con los gases de combustión. Una escoba puede ser usada para localizar pequeños incendios de hidrógeno. Un extintor seco o arena pueden causar que la llama emita radiación visible.

#### 2.6.1.4 Inflamabilidad e ignición

El hidrógeno posee un rango amplio de inflamabilidad en el aire (4% a 75% por volumen) que el metano, propano o la gasolina y la energía mínima de ignición (para mezcla estequiometría) es de magnitud inferior que la del metano.

Estas características podrían indicar que el riesgo de incendio es mucho mayor en el hidrógeno que para otros combustibles. Pero la comparación no es tan significativa como lo aparenta. En muchos accidentes el límite inferior de inflamabilidad (LFL) es más importante. El LFL del hidrógeno es similar al del metano y cuatro veces el de la gasolina. Además la energía mínima de ignición es similar a la del metano. Fuentes débiles de ignición, como una chispa electrónica, son generalmente suficientes para encender la mezcla aire – hidrógeno.

#### 2.6.1.5 Debilitamiento por hidrógeno, compatibilidad de materiales

La exposición prolongada de ciertos metales de alta dureza al hidrógeno puede causarles la pérdida de su dureza, y eventualmente llevarlos a la falla. Esta pérdida es conocida como Hydrogen Embrittlement y ocurre cuando el hidrógeno penetra la estructura del material. La sensibilidad a este fenómeno es influenciado por numerosos factores que incluyen deformación plástica, carga cíclica, pureza del hidrógeno, temperatura, y presión. Es de interés para aceros ferrosos y ocurre a temperatura ambiente y elevadas presiones.

#### 2.6.1.6 Características de combustión

Las mezclas de combustible pueden incendiarse ya sea como fuego en un punto fijo o una detonación. Dependiendo de la razón de liberación de hidrógeno de la fuente, los fuegos pueden producir salidas desde una candela pequeña hasta un jet de alta presión. En un punto fijo el gas puede quemarse como una llama tipo jet. La baja radiación de la llama la hace más caliente que la llama de un

hidrocarburo, y los objetos afectados tienden a calentarse más rápidamente. Sin embargo, a objetos fuera de la llama se le transfiere menos calor.

#### 2.6.1.7 Riesgos fisiológicos

El hidrógeno no es tóxico, pero puede causar asfixia en un área confinada debido al desplazamiento de oxígeno. La inhalación de humo es una causa primaria de daños debidos a incendios, pero en el caso del hidrógeno esto es considerado menos serio porque el único producto de la combustión es agua. Sin embargo, fuegos secundarios pueden generar humo y otros productos de combustión que presentan riesgos para la salud.

Figura 22. NFPA 704 Diamante del Hidrógeno



Fuente: DOÑAN V, Oscar. SERMEÑO M, José Salvador. Diseño de una pila de combustible de Hidrógeno para producir una diferencia de Potencial de 12 Voltios. Trabajo de Grado (Ingeniería Mecánica). Facultad de Ingeniería. Universidad Don Bosco, El salvador.2008.Disponible:[[http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/65/1/44375\\_tesis.pdf](http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/65/1/44375_tesis.pdf)]

### **3. ESTADO DEL ARTE DE ESTA TECNOLOGÍA EN EL MUNDO. EXPERIENCIAS MUNDIALES CON HIDRÓGENO**

El objeto de este análisis, es mostrar la forma en la que el apoyo a la tecnología ha permeado los diferentes agentes en cada país, permitiendo definir la estrategia y valorar la intensidad del compromiso de cada uno de los interesados en la implementación y avance de la tecnología en las naciones más sobresalientes en este campo, de modo que se puedan determinar las variables, objetivos y estrategias convergentes y divergentes del sistema en el juego de actores para la implementación de un plan estratégico que se basa en el hidrógeno como vector energético en el local colombiano.

#### **3.1 AMÉRICA DEL NORTE**

##### **3.1.1 Estados Unidos de América**

En Estados Unidos el Departamento de Energía (DOE – Department of Energy), la Administración Federal de Transito (FTA – Federal Transit Administration) y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), trabajan de forma conjunta con el fin de avanzar en el montaje de infraestructura, el conocimiento de la tecnología y la viabilidad comercial entorno a las tecnologías del Hidrógeno y en concordancia con los objetivos planteados por el gobierno de los Estados Unidos.

Para atender los requerimientos en avances técnicos, (The National Renewable Energy Laboratory, 2011) ha definido segmentos claves de investigación, para concentrar expertos en el avance de cada objetivo. El primero de ellos es la electrolisis renovable, que concentra la producción de hidrógeno a partir de celdas fotovoltaicas, viento, agua y energía geotérmica, con el fin de incorporar avances en los electrolizadores en el aprovechamiento de estas fuentes naturales. El segundo es la producción de hidrógeno a partir de procesos biológicos que incorporen microorganismos, como la producción fotobiológica de hidrógeno con participación de algas y cianobacterias y la producción de hidrógeno por fermentación, que depende principalmente de la investigación en identificación de microbios que fermenten directamente la celulosa produciendo hidrógeno. El tercero hace referencia a la pirólisis de la biomasa y el desarrollo de catalizadores, de modo que algunos de los subproductos de la pirolisis puedan ser integrados como materias prima de cadenas de producción ya establecidas, financiando el resto del proceso con el desarrollo de catalizadores de que se convierta en la clave de una producción eficiente de hidrógeno. El cuarto segmento concentra la

investigación de materiales en áreas como la producción directa de hidrógeno a partir reacciones que incorporen semiconductores fotovoltaicos, en almacenamiento con nano-estructuras de carbono, en las celdas de combustible PEM en materiales que reemplacen de las placas de platino y las hagan productivamente viables, en seguridad en el desarrollo de sensores de película que permitan la detección oportuna de fugas y concentraciones peligrosas de hidrógeno y por último en la durabilidad y envejecimiento de los materiales utilizados de modo que se reduzca la permeabilidad del oxígeno y el hidrógeno.

Dentro de los avances de Estados Unidos el más destacado es la creación de nanometales y un electrodo de estructura única como elemento alcalino para la producción de hidrógeno mediante electrolisis. El desarrollo se realizó en el laboratorio de investigación de energía QuantumSphere Inc. (Energy research laboratory, 2006).

El objetivo de la investigación fue reducir los costos de producción de hidrógeno por medio de la electrolisis del agua, aumentando a su vez la eficiencia de este producto para lograr una producción masiva que logrará ser competitiva con las producciones de energía a partir de combustibles fósiles; los estándares del departamento de energía para la eficiencia de la electrolisis era del 75%; los procesos de electrolisis con platino como metal catalizador presenta eficiencias de hasta 50% en el proceso, pero con el desarrollo del nanometal QSI las eficiencias de la electrolisis han alcanzado eficiencias de 80% bajo condiciones de densidad de corriente de  $100 \text{ mA/cm}^2$ , pero aún se espera que los nanometales creados lleguen a igualar o superar el objetivo del Departamento de energía de Estados Unidos de 75% de eficiencia en condiciones de densidad de energía de  $1000 \text{ mA/cm}^2$ . Este proceso de electrolisis requiere para la producción de hidrógeno un voltaje cercano al estándar propuesto por (Bossel, 2005), 1.226 voltios.

Según (Wicks, 2009) las prioridades a tener en cuenta para la producción y almacenamiento de hidrógeno son:

- Las nuevas tecnologías deben ser limpias, competitivas y sustentables a partir de nuevas tecnologías que tengan en consideración factores sociales, tecnológicos y económicos.
- Preparar una transición a la economía del hidrógeno, unir los esfuerzos de los diferentes grupos de investigación, compartiendo los grandes adelantos en este campo, para así poder generar avances y toma de decisiones en el campo jurídico.

- Diseñar sistemas de almacenamiento y producción de hidrógeno seguros, internacionalizando los estándares y códigos para la producción y almacenamiento tanto ya desarrollados como en desarrollo actualmente.
- Creación de nuevos materiales para los procesos de electrolisis y celdas de combustible, dentro de los cuales se hace énfasis en materiales catalizadores estables a altas temperaturas.
- Nuevas formas de almacenamiento de hidrógeno, innovadoras, incluyendo sistemas híbridos de almacenamiento, que logran satisfacer las necesidades de transporte de hidrógeno en el camino

Dentro de las formas de almacenamiento de hidrógeno los aspectos a mejorar son:

- Almacenamiento en gases: Desarrollo de fibras fuertes, e impermeables para su uso en tanques que permitan manejar altas presiones, cuyos usos puedan ser llevados a la industria automotriz, bajo condiciones de seguridad óptimas.
- Almacenamiento líquido: Corregir problemas en la licuefacción de gases.
- Almacenamiento sólido: en este campo, el principal punto a tener en cuenta son los materiales, se debe realizar una mayor investigación para comprender mejor los procesos de quimiadsorción y fisiadsorción del hidrógeno en diferentes materiales.

Otro tipo de producción de hidrógeno desarrollado en Estados Unidos es la producción fotobiológica de hidrógeno a partir del alga *Chlamydomonas reinhardtii* según (Amos, 2004).

De acuerdo con el (Committee on assessment of resource needs for fuel cell and hydrogen technologies., 2008) la valoración de recursos necesarios para las celdas de combustible y las tecnologías del hidrógeno, para la implementación de una economía del hidrógeno se deben corregir problemas de seguridad mediante códigos y estándares, con el fin de lograr promover el uso de tecnologías del hidrógeno en vehículos mediante políticas como:

- Subsidio para vehículos cuyas fuentes de energía provengan de sistemas a base de hidrógeno, o implantación de cuotas muy bajas en la industria manufacturera para incentivar la compra de dichos vehículos.
- Los subsidios dados deben ser altos, dado que los costos en el ciclo de vida de los vehículos impulsados por sistemas de hidrógeno son más altos que los vehículos impulsados por gasolina.

- Cualquier subsidio deberá ser disminuido a medida que transcurra el tiempo y no eliminado de manera radical, para facilitar la transición de la economía del petróleo a una economía del hidrógeno, para esto se requiere que el gobierno y las firmas interesadas recurran a estos subsidios de manera inmediata para acelerar los procesos de transición.

Para el éxito de esta transición se debe tener en cuenta la infraestructura para la creación de vehículos y la infraestructura para el repostaje de estos, lo cual deberá ser una acción conjunta entre la industria privada y el gobierno, ya que las empresas manufactureras no producirán vehículos si no se tienen formas para el mantenimiento de estos.

También es de gran importancia establecer subsidios mediante los cuales se logre promover el cambio a las tecnologías del hidrógeno sin sobrepasar las tasas de pérdidas que puedan soportar las industrias, y no exceder a más de 15 o 20 años los subsidios.

Las razones por las cuales el apoyo a esta tecnología en Estados Unidos, se dio en el sector del transporte público a través de pruebas piloto con buses, son las siguientes, (Eudy, Chandler, & Gikakis, 2007):

- Ubicación y reabastecimiento de combustible centralizados
- Subsidios gubernamentales
- Operación y mantenimiento a cargo de profesionales
- Operado con rutas y horarios fijos
- Amplia tolerancia al incremento de peso por los requerimientos técnicos de los sistemas
- Costos bajos de arranque del proyecto
- Relaciona al público con la tecnología, posibilitando la transmisión de información pertinente y la generación de aceptación

Los buses han sido una creación conjunta de cuatro empresas, Van Hool encargado del chasis y carrocería, ISE provee la propulsión eléctrica y la integra con las celdas de combustible fabricadas por UTC, acompañadas por baterías ZEBRA2 compuestas de Sodio Cloruro de Níquel, fabricadas por la empresa MES-DEA (Eudy, Chandler, & Gikakis, 2007).

Las evaluaciones a las pruebas de buses en las diferentes regiones buscan identificar las modificaciones necesarias para obtener una duración y fiabilidad aceptables para el nivel de comercialización de la tecnología. Los mayores problemas en la entrada en operación de los vehículos ha sido mantener el control

y operación de las baterías ZEBRA, ya que estas mantienen niveles diferentes de estado de carga entre ellas, ocasionando sobre voltaje en el software del sistema de propulsión desarrollado por ISE. Para esto, han encontrado la necesidad de modificar el software de acuerdo con una información reportada por el fabricante de las baterías (Fuel Cell Buses in U.S, 2008).

Según reporte de (Chandler & Eudy, 2009) AC Transit participa del proyecto National Fuel Cell Bus Program (NFCBP), el nivel de uso y disponibilidad de los buses es de 58% contra un 85% de proyectado, medido en términos de horas de funcionamiento diario y días de la semana que operan los vehículos. Para completar la operación, el funcionamiento debe ser maximizado, incrementando las horas diarias de uso a un rango entre 16 y 19 horas todos los días de la semana, con el fin de ayudar a la planeación de recursos en una operación completa de los buses y también para contribuir con los fabricantes a establecer puntos clave para hacer modificaciones e incorporarlas en la siguiente generación de sistemas.

El funcionamiento de los buses ha sido contrastado a lo largo de todo el proceso con la operación de seis buses propulsados por combustión interna diesel, lo que ha mostrado el potencial de eficiencia de los buses, además de los puntos vulnerables para las mejoras futuras. El servicio ha incorporado un sistema de evaluación por parte del cliente que refleja la alta aceptación y respaldo a la iniciativa, por parte de los usuarios del transporte.

La información recopilada permite concluir que el interés por el desarrollo de esta tecnología, está estrechamente relacionados con la necesidad de diversificar sus fuentes energéticas, con el fin de hacer sostenible la perdurabilidad de su posición de potencia mundial, esto implica el apoyo y aporte del gobierno a la coordinación de todas las industrias existentes en ese país y que pueden desempeñar un papel muy importante en la red de producción y consumo que se requiere para disminuir su dependencia energética.

En el eje industrial de Estados Unidos podemos encontrar los siguientes avances:

La industria automotriz Chrysler ha contratado a Delphi Automotive Systems con el fin de desarrollar un sistema de automóviles a base de celdas de combustible.

FORD MOTOR CORPORATION estableció un programa denominado P2000 para desarrollar un sedán familiar ligero, el concepto del automóvil propuesto en el proyecto servirá como base para el desarrollo de automóviles impulsados por sistemas de celdas de combustible.

General Motors trabajo en colaboración con Delphi y Ballard desarrollando motores de celdas de combustibles.

A partir del año 1991 la Universidad de Georgetown entregó 3 autobuses impulsados por celdas de combustible de ácido fosfórico al Departamento de Energía de los Estados Unidos.

La empresa H-Power fue el integrador del sistema desarrollado en la universidad y actualmente desarrolla celdas de combustible para aplicaciones varias en automóviles.

International Fuel Cells fabricó celdas de combustible de 50kw utilizando para el funcionamiento de estas hidrógeno y aire del medio ambiente.

### 3.1.2 Canadá

A nivel mundial Canadá es un líder en el sector del hidrógeno y las celdas de combustibles como resultado de las tecnologías de vanguardia y productos desarrollados, la experiencia mundialmente reconocida, y una historia de 25 años de colaboración entre los gobiernos, la industria, y la academia; todo este proyecto liderado por “The Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association (CHFCA)” (the Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association), una organización nacional sin ánimo de lucro que presta servicios y apoyo a las empresas canadienses, los gobiernos y las instituciones educativas.

El principal objetivo de la CHFCA es crear conciencia de los beneficios económicos, ambientales y sociales del hidrógeno y de las celdas de combustible, abarcando los componentes, suministros, los sistemas de abastecimiento de combustible, almacenamiento de combustible y servicios de ingeniería y financieros e integración de sistemas, relacionados con el hidrógeno y las celdas de combustible.

El CHFCA se fundó en enero de 2009, como resultado de una fusión entre la Asociación Canadiense de Hidrógeno (CHA) y el hidrógeno y las celdas de combustible Canadá (H2FCC), con oficinas en Vancouver y Ottawa.

El sector canadiense ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos diez años, en la actualidad, el sector canadiense de hidrógeno y celdas de combustible cuenta con más de 100 actores, trabajando en las áreas:

- Producción de hidrógeno, purificación, distribución, almacenamiento y abastecimiento de combustible.

- Pilas de celdas de combustible
- Desarrollo de productos e integración de sistemas
- Sistemas de fabricación

En el 2009 La industria del hidrógeno tuvo ingresos por US \$ 215 millones; las ventas de productos generaron US \$ 111 millones de ingresos; en investigación, desarrollo y demostración los gastos fueron \$ 142 millones; el número de alianzas estratégicas reportado fue de 68 y hubo 350 asociaciones para la investigación.

El NSERC (NSERC H2CAN, 2010), es una red de Investigación, que agrupa a 29 investigadores principales, 5 centros universitarios de investigación especializados y 5 laboratorios del gobierno, localizados en 7 provincias diferentes. La red incluye a científicos reconocidos internacionalmente e ingenieros cuyas actividades cubren tres temas, producción y purificación, almacenamiento e infraestructura y seguridad.

Para el tema de producción se trabajan en tres grupos: Producción de hidrógeno a partir de la energía eólica, producción de Hidrógeno a partir de biomasa e hidrocarburos renovables; tecnologías de separación y purificación. De la misma forma para el tema de almacenamiento se trabajan en tres grupos Teoría y simulaciones, desarrollo y caracterización de materiales, diseño de sistemas de almacenamiento y optimización, y caracterización. Y por último se trabajan en los temas de infraestructura y seguridad.

Los objetivos de esta red es la superación de las barreras técnicas para la introducción de las tecnologías del hidrógeno para el desarrollo de métodos más limpios y renovables para la producción de hidrógeno de alta calidad a menor costo ya sea a partir de residuos o de los recursos renovables, el desarrollo de estrategias de almacenaje que sean prácticas y económicas y la elaboración de estrategias eficaces y seguras en cuanto a infraestructura para el despliegue de las tecnologías del hidrógeno. Los programas de investigación requieren de una investigación interdisciplinar entre ingeniería, física, química y biología.

En septiembre de 2008, NSERC otorgó \$ 5 millones de dólares en fondos de investigación para H CAN por cinco años. Esta cantidad se aprovecha en una proporción de 4:1 a través de I + D relacionados con las actividades de los investigadores de redes y recursos disponibles en la actualidad en las instituciones participantes.

De acuerdo con Gnanapragasam la producción de hidrógeno a partir de gas usando combustión con transportadores de oxígeno es una de las formas de producción desarrolladas en la actualidad en Canadá. El hidrógeno tiene un gran potencial como portador de energía, junto con los no carbonos mediante la entrega de energía química. Además de facilitar el uso de energías libres de carbono.

Durante el proceso de enriquecimiento el gas sintético y el vapor generado pasan a través de bancos de óxido de calcio y óxido de hierro, donde múltiples reacciones ocurren simultáneamente produciendo vapor de hidrógeno.

Posteriormente el Gas de síntesis y el vapor restante son reemplazados por aire para regenerar sólidos, obteniendo de esta manera una captura rápida del dióxido de carbono generado. La investigación en la purificación del hidrógeno producido a temperaturas entre los 600°C y 800°C, y los procesos de concentración del vapor, concentración del Gas de síntesis y la composición de sólidos, optimizaron el proceso y se aumentó la pureza del vapor de hidrógeno en un 99%.

La primera forma de producción utiliza como combustible el Gas de síntesis (SCL). El sistema involucra la combustión por transportadores de oxígeno después de la producción de gas de síntesis a través de la gasificación del carbón.

La segunda forma de producción es la reacción directa del carbono a través de la combustión química. Esta forma de producción no involucra gases como combustibles, genera de forma directa la reacción del oxígeno con los óxidos metálicos en un reactor. El no utilizar a este sistema la mezcla del combustible con el óxido de metal genera menos pérdidas de energía en la producción de hidrógeno.

Para los dos procesos la temperatura de trabajo de los reactores se encuentra entre los 700°C a 900°C y una presión de 30 bares. La principal diferencia entre los dos tipos de producción de hidrógeno radica en el uso de metano por parte de la combustión química directa (CDCL), lo cual permite una alta producción de hidrógeno a partir de tasas de entrada de aire bajas. El número de procesos involucrado en el sistema SLC es muy alto, incluso para el almacenamiento se utilizan dos procesos en reactores diferentes. El uso de más procesos para la producción de hidrógeno significa aumento de costos y pérdidas de energía para el sistema.

La empresa Power Ballard System, es actualmente el proveedor líder en celdas de combustible de membrana protónica (PEM) en el campo de las aplicaciones de transporte, ha desarrollado tecnologías en el área de las celdas de combustible con la colaboración de industrias automotrices como Ford Motors Company y Daimler-Benz, (Power Ballard System).

Sus investigaciones en las tecnologías del hidrógeno se desarrollan desde hace más de 20 años, fue la primera compañía en implementar las celdas de combustibles en un autobús en el año 1993 y actualmente los autobuses de esta marca operan en Canadá y Estados Unidos.

En normas y leyes Canadá es el primer país en tener un conjunto de normativas que establecen parámetros para la seguridad en el uso de tecnologías del hidrógeno, esta normatividad es la ISO/TC 197.

## 3.2 EUROPA

### 3.2.1 España

Este país ha sido referente mundial en temas de desarrollo y aprovechamiento de energías limpias, sus avances se aprecian en conformación de asociaciones sin ánimo de lucro, proyectos de prueba de la tecnología del hidrógeno, programas educativos abiertos al público por instituciones de educación superior españolas e iniciativas políticas.

En un análisis hecho en un reportaje de (Rtve.es, 2010) en Junio de 2010, se aprecia el panorama que envuelve a un país que produce vehículos, pero que depende del petróleo importado. En este reportaje se destaca la visión alineada del sector productivo, científico y gubernamental en incorporar el vehículo eléctrico como una decisión de carácter estratégico para España, con el fin de reducir la dependencia de los combustibles importados. Por otro lado también muestra la postura de un ambientalista español, que afirma, que subsidiar vehículos privados eléctricos no solo es desigual –debido a que la tercera parte de los hogares Españoles no cuenta con vehículo dificultando la implementación de políticas con aval popular en este sentido- y costoso, sino que también se requiere influenciar más la transición cultural para el uso del transporte colectivo (público).

El Dr. Alberto Vegas de la Asociación Española del Hidrógeno (Vegas, 2009), hace un análisis muy completo del entorno de esta tecnología, reconociendo que aunque su desarrollo tecnológico aun no la hace lo suficientemente competitiva se

está posicionando como una alternativa viable, flexible y limpia para el sector energético, pero que esta requiere de una serie de apoyos clave como son la investigación y desarrollo, medidas estrictas que impulsen el abandono del sistema energético actual, el estímulo al consumidor y una política fuerte en el aspecto académico, que provea al mercado de la mano de obra especializada requerida.

En educación e investigación en España se promueve y coordina la Red Iberoamericana de Celdas de Combustible e Hidrógeno (RED IBEROAMERICANA DE CELDAS (PILAS) DE COMBUSTIBLE E HIDRÓGENO, 2003), cuya página web muestra una agremiación con gran participación de países latinoamericanos pero la mayoría de los links a empresas provienen de la Unión Europea. De la misma manera se encuentra La Red de Hidrógeno (Red Iberoamericana de Hidrógeno, 2010) ver Figura 23, está conformada por universidades de 9 países de Latinoamérica y 2 europeos.

Figura 23. Países pertenecientes a RED  $H_2$ .

**Coordinador Internacional:** Miguel Angel Laborde - LPC

<p><b>Argentina</b> Punto Focal: Eduardo Agustín Lombardo INCAPE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Adrián Bonivardi INTEC</li> <li>Arnaldo Visintin INFIA</li> <li>Daniel O. Borio PLAPIQUI</li> <li>Juan P. Zagorodny ENARSA SA</li> <li>Gabriel Meyer ONEA-CAB</li> <li>Hugo Corso CAB-ONEA</li> <li>María C. Abello INTEQUI</li> <li>Nora N. Nichio CONDECA</li> <li>Norma Amadeo LPC-UBA</li> <li>Pío Aguirre INGAR</li> <li>Roberto Marques INNOVA-T</li> </ul>	<p><b>Costa Rica</b> &gt; Carlos Roldán Villalobos Inst. Tecnológico de Costa Rica</p>
<p><b>Brazil</b> Punto Focal: Luiz Magalhães Pontes UNIFACS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cesar A. Morales de Abreu UFPE</li> <li>Fabio Bellot Noronha Inst. Nacional de Tecnologia INT</li> <li>Soraia Teixeira Brandao Univ. Federal de Bahia UFBA</li> <li>Victor Teixeira da Silva NUCAT/COPE Univ. Federal de Rio de Janeiro</li> </ul>	<p><b>Cuba</b> Punto Focal: Erenio Gonzalez Suarez Univ. Central de Las Villas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hilda Oquendo Ferrer Univ. de Camaguey</li> <li>Tomás Pérez Guevara GEA, Villa Clara</li> </ul>
<p><b>Bolivia</b> &gt; Saul Orlando Cabrera Medina Instituto de Investigaciones Químicas - Univ. Mayor de San Andrés</p>	<p><b>España</b> Punto Focal: Miguel Angel Gutiérrez Ortiz Univ. del País Vasco</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Antonio Monzón Bescos Univ. de Zaragoza</li> <li>Carlos Sánchez López Univ. Autónoma de Madrid</li> <li>Juan Angel Botas Echeverría Univ. Rey Juan Carlos</li> <li>Fernando Rubiera González INCAR</li> <li>Francisco Castro Soler CONTEC Univ. Rey Juan Carlos</li> <li>Francisco V. Melo Faus ITQ - Univ. Politécnica de Valencia-UPVCSIC</li> </ul>
<p><b>Chile</b> &gt; Francisco Javier Gracia Coca Univ. de Chile</p>	<p><b>México</b> &gt; Mascha Afra Smit CICY - Mérida - Yucatán</p>
<p><b>Colombia</b> &gt; Viatcheslav Kafarov Univ. Industrial de Santander Bucaramanga</p>	<p><b>Portugal</b> Punto Focal: Alirio Egidio Rodrigues Univ. de Porto</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>José Luis Figueiredo Univ. de Porto</li> </ul>
	<p><b>Venezuela</b> Punto Focal: Josefina Pérez Zurita Univ. Central de Venezuela</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fausto Rene Posso Rivera Univ. de Los Andes</li> </ul>

Fuente: MORENO, Luis Gabriel. VARGAS, Carlos Eduardo. La tecnología del Hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. Trabajo de Grado (Magister en Dirección y Gerencia de empresas). Facultad de Administración. Universidad de nuestra señora del Rosario. Disponible [\[http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3\]](http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3)

Esta red busca coordinar esfuerzos para avanzar en la investigación en la tecnología del hidrógeno articulando sus capacidades de investigación a través de

reuniones por región y con el favorecimiento en términos de facilidades de publicación y pasantías de los doctorados. En la sección de publicaciones, existen 13 presentaciones sobre las investigaciones de la red, las cuales en su mayoría, corresponden a temas relacionados con procesos de producción y catalizadores, (Red Iberoamericana de Hidrógeno, 2010).

En la Universidad Pública de Navarra han llevado a cabo experimentos con un vehículo de calle, modificado para funcionar combustionando  $H_2$ , el cual ha permitido realizar pruebas de velocidad máxima de 140 *Km/h* (NextFuel, 2010). Estos experimentos son la prueba fehaciente de la practicidad de experimentar con este elemento y también de la viabilidad de realizar estudios aplicados, que permitan capacitar mano de obra adecuada.

En el desarrollo del proyecto la Agencia Andaluza de la Energía está liderando el Proyecto Hércules (Agencia Andaluza de la Energía, 2009), en el cual participan importantes empresas relacionadas con el sector energético y transporte. En el proyecto están construyendo un modelo completo de producción limpia, suministro y utilización del hidrógeno para el transporte, como parte de una estrategia de generación de experiencia aplicada que proporcionará el conocimiento necesario para potenciar el hidrógeno como el futuro del sector energético. Esta agencia promueve a través de conferencias e información publicada en su página la conciencia ambiental y el aprovechamiento de la energía en la vida cotidiana.

Según Javier (Dufour, 2009) el presupuesto para este proyecto fue de 10 millones de euros. Su duración es de 4 años y su inicio fue en el año 2009. Su objetivo consiste en demostrar la viabilidad económica y técnica del uso y producción de hidrógeno a partir de una fuente limpia e inagotable (el sol) e integrar el uso de pilas de combustible basadas en hidrógeno para medios de transporte terrestre, adicionalmente se desarrolla una planta de servicio en la planta actual de servicio termosolar ubicada en Sanlúcar La Mayor (Sevilla). Para el repostaje del prototipo este proyecto cuenta con el apoyo de empresas y organismos públicos en su mayoría de la ciudad de Andalucía como Abengoa (Hynergreen y Solúcar R&D), Santana Motor, INTA, Carbueros Metalicos, AICIA, GreenPower y la junta de Andalucía.

Para la producción de hidrógeno del proyecto los procesos utilizados son paneles fotovoltaicos y sistemas de Stirling que generan la energía eléctrica que debe utilizar el electrolizador para generar el hidrógeno mediante disociación de la molécula de agua. El hidrógeno resultante es envasado en tanques proporcionados por la empresa.

El auto a utilizar como prototipo es el todoterreno Santana 350, cuyo sistema de propulsión es una pila de combustible y un motor eléctrico, este auto tiene una autonomía de 400 *kilómetros*, el tanque de almacenamiento presenta una presión de 350 *bar* para el almacenamiento del hidrógeno.

También España se encuentra en proceso de creación de un clúster del sector de la energía en el mediterráneo, el “proyecto tiene un presupuesto cercano a los dos millones de euros y está financiado por la Comisión Europea en un 75%, a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional” (Agencia Andaluza de la Energía, 2012).

Su alcance Político y Legislativo a nivel nacional es dimensionable a través del Catálogo publicado por la Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible (PTE-HPC), en el cual se hace un compilación de las Empresas, Asociaciones, Centros Tecnológicos, Universidades y Organismos Públicos, en el cual se definen objetivos concretos que promueven integralmente el ingreso de esta nueva tecnología.

En el análisis del contenido de la página de la PTEHPC se puede identificar claramente el avance en la conformación de un clúster entorno al  $H_2$ , convocando a entidades de diferentes sectores nacionales y llevando a cabo espacios de discusión y difusión que generen el consenso necesario para iniciar la generación de redes comerciales que viabilicen la competitividad, inversión y desarrollo de la tecnología.

### 3.2.2 Alemania

La posición de este país al igual que la del resto de la Unión Europea es hacia una total des-carbonización de la producción energética. La iniciativa de la ley de promoción de energía de fuentes renovables ha sido utilizada hasta 2011 en por lo menos 61 países y 26 estados y provincias como modelo para leyes similares.

La universidad técnica de Berlín según su artículo sistema de producción de hidrógeno, tres grados microbianos - primeros resultados (SCHÄFER, SACKRETZ, & RECHENBERG), ha desarrollado una forma de producción de hidrógeno mediante el uso de los siguientes materiales:

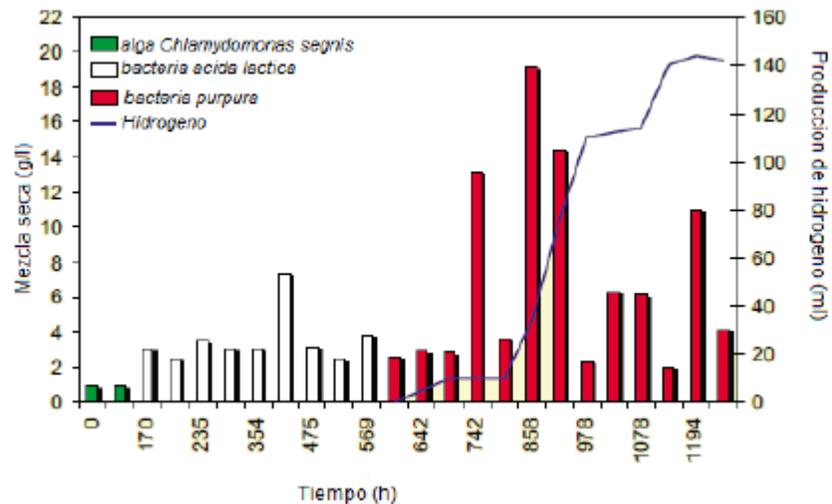
- Alga *Chlamydomonas segnis*, la cual pertenecía al cultivo de la universidad de Göttingen, cultivada a 30°C e iluminada constantemente por una luz de neón con una potencia incidente por unidad de superficie de 300  $W/m^2$ .

- La bacteria láctica ácida *Lactobacillus amylophilus* cultivada a una temperatura de 30°C y en ausencia de luz.
- La bacteria púrpura isolated wild strain iluminadas con lámparas de tungsteno con una potencia incidente por unidad de superficie de 850 W/m<sup>2</sup>.

Para la producción de hidrógeno, 250 ml del alga fueron mezcladas con 250 ml de la bacteria láctica mediante un transformador de carbohidratos producido dentro de la bacteria láctica, después de dieciséis días y medio de suspensión, la mezcla fue remezclada con 250 ml de la bacteria purpura, comenzando la producción de hidrógeno en forma de gas, del cual fue destilada el agua y almacenado en un cilindro de vidrio con una escala lineal de medición de volumen.

Al aumentar la cantidad de la bacteria láctica no se aumentó significativamente la cantidad de la mezcla seca significativamente, contrario al resultado con el aumento de la bacteria purpura; pero el aumento de esta última aumento la producción de hidrógeno como se observa en la figura 24.

Figura 24. Mezcla seca y producción de hidrógeno.



Fuente: SCHÄFER, SACKRETZ, RECHENBERG. L., M., I. A three step microbial hydrogen-producing system- first results. Technical University Berlin, Department of Bionics and Evolutionstechnique.

En la Universidad de Rostock descubrieron la forma de obtener hidrógeno a partir de ácido fórmico utilizando un catalizador de hierro disponible comercialmente en la actualidad. Esta reacción produce hidrógeno pero libera dióxido de carbono, lo que ha originado un nuevo enfoque en la investigación en conjunto con el Instituto

Federal Suizo de Tecnología en Lausana, el cual consiste en almacenar el dióxido de carbono para tratar de producir ácido fórmico (la Universidad de Rostock , 2001).

De acuerdo con (WINTER, 2009), Alemania cuenta con un sustento teórico y financiero para la aplicación de las tecnologías del hidrógeno en la industria del mismo país, desde la producción hasta su aplicación y con una gran variedad de formas para este desarrollo divididas en tecnologías ya desarrolladas, tecnologías que se estiman sean desarrolladas y aplicadas en 10 y 20 años ver Tabla 9.

Tabla 9. Aplicación de las tecnologías en la industria Alemana

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO		
Actualmente	Tecnologías a 10 años:	Tecnologías a 20 años:
Reformación de gas natural. Hidrógeno a partir de electricidad nuclear. Oxidación parcial de crudo.	Electrolisis de hidrógeno a partir de viento y energía solar térmica. Hidrógeno a partir de biomasa.	Descarbonización de hidrógeno a partir de combustibles fósiles con almacenamiento y captura de carbón. Radiólisis, termólisis y fotocatalización de hidrógeno.
TECNOLOGÍAS PARA EL ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN:		
Actualmente	Tecnologías a 10 años:	Tecnologías a 20 años:
Licuefacción de hidrógeno. Hidrógeno en refinerías. Contenedores de metal hídricos. Pilas de hidrógeno en dispositivos electrónicos móviles.	Tanques de hidrógeno móvil a 700 bares en presión.	Transporte de hidrógeno líquido en tanques marítimos. Nano almacenamiento en carbón.
TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO PARA DISTRIBUCIÓN Y USO:		
Actualmente	Tecnologías a 10 años:	Tecnologías a 20 años:
Hidrógeno para el transporte espacial. Celdas de combustible en sumergibles. Unidades auxiliares de poder alimentadas por hidrógeno (APUs).	Reservas rodantes de hidrógeno y oxígeno. Hidrógeno en APUs aerotransportados. Celdas de combustible a base de hidrógeno como remplazó de turbinas de aire en aviones. Estaciones de servicio de hidrógeno para automóviles.	Alimentación de transporte aéreo con hidrógeno a propulsión de chorro Propulsión de hidrógeno en ICE (máquinas de combustión interna) y celdas de combustible en trenes.

Fuente: Hydrogen energy – abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-change. WINTER, C.-J. (2009).

Las aplicaciones tanto actuales como mediano y largo plazo, se enfocan hacia máquinas para el transporte en los 4 campos (aéreo, terrestre, marítimo, espacial).

En desarrollo de Proyectos el Centro para la Energía Solar y el Hidrógeno<sup>2</sup> es una fundación sin ánimo de lucro enfocada en el desarrollo de todas las tecnologías de apoyo requeridas para la producción de hidrógeno a partir de energía solar y celdas fotovoltaicas.

En cuanto avances en la industria alemana para la aplicación de las tecnologías del hidrógeno, se encuentra el lanzamiento por la compañía automotriz BMW de los automóviles BMW Serie 7 cuyos motores son impulsados por gasolina e hidrógeno, las investigaciones de la compañía están enfocadas a reducir las emisiones de  $CO_2$  en sus automóviles en un 25% adicional al 30% que han conseguido desde el año 1995 para el año 2020. Además de incluir un sistema de auto regeneración de energía a partir de la energía cinética producida por el freno de los autos.

La ley de Fuentes Renovables de Energía (Ministerio Federal de Justicia, 2008), es el avance Político y Legislativo más importante, esta ley tiene por objeto incentivar la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y brindar un “subsidio” al consumo de estas en comparación a la energía generada de fuentes no renovables. Promueve la inversión e investigación en el sector, además de incrementar la cobertura de las redes energéticas en el país (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, 2010).

La confederación de los consumidores de energía, es la encargada de realizar análisis sobre la legislación y ejecución de proyectos en el sector energético, realizando una labor de veeduría ciudadana, (Asociación Consumidores de energía).

### 3.2.3 Francia

La (Comisión de Energía Atómica ), es el centro tiene una división para el desarrollo completo de todas las tecnologías requeridas para el aprovechamiento del hidrógeno, desde su producción a través de electrolisis y des-carbonización de hidrocarburos, hasta la investigación de pilas de combustible SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) para aplicaciones estacionarias, pasando por almacenamiento en todas sus formas.

El Instituto Nacional para el Medioambiente Industria y sus Riesgos (INERIS, 2010), tiene en sus prioridades la investigación en Riesgos Tecnológicos y Contaminación dentro de la cual incluye la investigación y desarrollo de nano-

---

<sup>2</sup> <http://www.zsw-bw.de/1/support/>

materiales y las otras tecnologías relacionadas con el hidrógeno. Han participado en proyectos de investigación encaminados a la puesta en marcha de pilas de combustible para aplicaciones en buses.

El Centro Nacional de Investigación Científica, coordina y lleva registro de las labores investigativas e inversión de los laboratorios y entidades asociadas. Entre los proyectos más sobresalientes, se encuentra la producción de hidrógeno por electrolisis utilizando nuevos materiales cerámicos y el incremento de la presión a 100 *bar* en el proceso de electrolisis. Por razones de seguridad se está llevando a cabo la sustitución de cilindros de almacenamiento de hidrógeno en todos los sistemas de producción de hidrógeno de los laboratorios asociados al Centro Nacional de Investigación Científica (Centre national de la recherche scientifique).

También participa en proyectos de investigación de la Unión Europea, como lo es el NANO-H que consiste en el desarrollo de estructuras de nano-carbono para el almacenamiento de hidrógeno.

En cuanto al desarrollo de Proyectos la Multinacional Francesa Air Liquide, fundada en 1902 tiene grupos de investigación en diversas áreas de tecnología de punta, como son los compuestos de alta pureza para la industria de los chips, participan en el proyecto del Gran Colisionador de Hadrones, fusión nuclear e investigaciones en tanques de almacenamiento de hidrógeno a presiones superiores a los 700 bar y estaciones de distribución de hidrógeno más eficientes del mercado (Air Liquide, 2004).

McPhy Energy, es una empresa dedicada a la investigación de formas de almacenamiento de hidrógeno y participa activamente en varios de los proyectos que se están llevando a cabo en este momento en la Unión Europea (McPhy Energy, 2009).

El gobierno Francés realizó una Convocatoria de proyectos<sup>3</sup>, con el objetivo de incentivar:

- La producción de hidrógeno a partir de fuentes y energía renovables
- Desarrollo de aplicaciones en el campo de la movilidad (servicios públicos, autobuses) al estilo de las aplicaciones en movilidad que se llevan a cabo en otros países.

---

<sup>3</sup> <http://www.investissement-avenir.gouvernement.fr/content/lancement-de-lappel-%C3%A0-manifestations-dint%C3%A9r%C3%AAt-hydrog%C3%A8ne-et-piles-%C3%A0-combustibles>

- La producción y el uso de energía descentralizada en un eco-barrio o ciudad.
- El despliegue de aplicaciones de energía de respaldo o equipo logístico.

### 3.2.4 Unión europea

ATLAS- $H_2$  es una asociación de universidades y la industria de almacenamiento de hidrógeno consolidada para el desarrollo y prueba en el corto plazo, con proyecciones de comercialización en el mediano y largo plazo, de los tanques de hidruros metálicos para aplicaciones de sistemas estacionarios y de compresión de hidrógeno.

El *Proyecto Energético en la Isla Utsira - Noruega*, consiste en construir un pequeño parque eólico para la generación de energía eléctrica, la cual será almacenada en tanques de hidrógeno, para el uso posterior en tiempos de poco viento, a través de una pila de combustible y un motor de combustión a hidrógeno.

El Proyecto HySAFE<sup>4</sup>, fue un proyecto ejecutado del 2004 al 2009, en el cual se establecieron las bases para los controles y procedimientos de seguridad para el manejo del hidrógeno. El consorcio estuvo conformado por 25 entidades de Alemania, Francia, Noruega, Holanda, España, Dinamarca, Grecia, Italia, Polonia, Suecia, Rusia y Canadá, (HySafe - Safety of Hydrogen as an Energy Carrier, 2007).

La meta europea para el año 2020 es reducir en un 20% la emisión de gases efecto invernadero, el incremento de la proporción de energías renovables en un 20% y la reducción en un 20% del uso de energías primarias, en aras de contribuir con la meta de largo plazo en el 2050, con la des-carbonización total del consumo energético.

## 3.3 ASIA

### 3.1.1 India

En India se creó el Ministerio de Fuentes de Energía no Convencionales, ahora el Ministerio de Energía Nueva y Renovable, con lo cual se ha posicionado el interés nacional político en explotar las fuentes naturales de energía de las cuales goza el territorio. El potencial energético de India, es muy diverso pues cuentan con un

---

<sup>4</sup> <http://www.hysafe.org/>

amplio potencial en diferentes campos de la producción de energía de fuentes no convencionales.

Esta iniciativa nacional ha llevado a la creación de un Grupo de Dirección encargado del diseño del Plan Nacional de Energía de Hidrógeno en la India, en el cual han participado importantes empresas interesadas en el desarrollo de esta tecnología. Este plan cubre la aplicación del hidrógeno en vehículos, en generación de energía, en almacenamiento y producción de hidrógeno y en sistemas de integración.

Dentro de las metas cuantificables del Plan Nacional, está el tener para el 2020 un millón de vehículos basados en energía de hidrógeno funcionando y 1000 MW de capacidad de generación de energía basada en hidrógeno y consideran como etapa intermedia en el proceso de implementación, el utilizar hidrógeno en motores de combustión interna, lo que significaría un paso en la transición que requeriría una menor inversión y se constituye como un camino válido en el montaje de infraestructura aprovechable para el objetivo de largo plazo, la utilización del hidrógeno en vehículos con pilas de combustible.

La apuesta India al desarrollo de una economía energética en torno al hidrógeno esta segmentada en acciones de corto, mediano y largo plazo, dando una alta relevancia a la investigación y desarrollo nacionales, al tratar de emular muchos de los sofisticados y costosos equipos que importan. Además, se considera muy importante la estrategia de incluir los motores de combustión interna dentro del plan de transición hacia la tecnología del hidrógeno, pues es la forma de aprovechar la infraestructura ya disponible y asimilada en el país.

### 3.1.2 China

Según la Central Intelligence Agency, 2011, China es el país más grande de Asia y el segundo más grande del mundo, con 9.6 millones kilómetros cuadrados y con más de 1300 millones habitantes, lo que conlleva a numerosos desafíos en términos de la provisión de energía, gestión de la contaminación y la seguridad energética.

El recurso natural más abundante en China es el carbón, de los cuales más del 80% de su electricidad proviene de este recurso y, en regiones remotas, el carbón se quema para calentar y cocinar (International Energy Agency, 2011). Estas emisiones han contribuido a que China esté entre los primeros emisores de CO<sub>2</sub> del mundo (en términos absolutos) en 2007, superando a la USA. El gobierno Chino es consciente de este problema y de los últimos años ha sido un líder

mundial en la instalación de tecnologías de energía renovable y una alta inversión en captura y almacenamiento de carbono.

China se convirtió en un importador neto de petróleo en 1993 y, en 2009, superó a Japón como el segundo mayor importador mundial de petróleo junto a los EE.UU.

En 1970 China inicia las investigaciones y el desarrollo sobre pilas de combustible, con un prototipo de celda de combustible alcalina para el programa espacial Nacional. En 1990 las investigaciones se centran en aplicaciones para automóviles, pero solo hasta 1999 se captó el interés de los socios comerciales y del Gobierno Chino. El actual interés académico y comercial se centra sobre pequeñas celdas de combustible portátiles para la alimentación de antorchas y dispositivos electrónicos de consumo y grandes sistemas estacionarios de energía de reserva para vehículos eléctricos.

China tiene una sólida base investigativa, donde todas sus universidades top están realizando Investigaciones sobre celdas de combustibles. Las universidades Tsinghua y Tongji, son dos de los más destacadas en cuanto a la evolución de celdas de combustible para vehículos; la Universidad tecnológica de Wuhan (WUT) tiene vínculos particularmente fuertes con la nueva empresa de Energía de Wuhan; y el instituto de Química Física Dalian (DICP) ha trabajado de la mano de la compañía Sunrise Power Co Ltd. Esta colaboración provee una ruta directa para que los nuevos desarrollos salgan al Mercado y al mismo tiempo ofrece a las empresas comercializadoras acceso a lo último en investigación y tecnología.

El número de patentes internacionales relacionadas con las celdas de combustibles provenientes de la actividad investigativa de China es baja en comparación con el resto del mundo, pero está creciendo, en el año 2005 se registraron 21 patentes pero no se concedió ninguna, en el 2010 de 14 registradas se concedieron 8 patentes.

En desarrollo de proyectos, en 2007, la primera estación de hidrógeno de China abrió sus puertas en Anting, un suburbio de Shanghai. Construido por Shanghai SunWise Energy Systems Co., la estación se actualizó en 2006. La compañía SunWise construyó dos unidades de reabastecimiento de combustible para la estación de la Expo Mundial, las que se utilizaron para abastecer de combustible los vehículos de turismo.

En general, China desarrolla proyectos en consonancia con las normas ISO para más información sobre las estaciones de hidrógeno en China se puede encontrar

visitando el sitio web [www.china-hydrogen.org](http://www.china-hydrogen.org), una página web gestionada por Shanghai SunWise Energy Systems.

El proyecto bus con celdas de combustible fue lanzado por el gobierno de China en marzo de 2003 en colaboración con el fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP). La primera fase tuvo lugar entre junio de 2006 y octubre de 2007, con tres autobuses Daimler-Chrysler de celdas de combustible en funcionamiento para su uso por el público de Beijing. Estos buses transportaban aproximadamente 57,000 pasajeros y una distancia total de más de 92,000 *km* con una disponibilidad del 90%. La segunda fase tuvo lugar en Shanghai y fue lanzado en Noviembre de 2007, transitando durante la World Expo in 2010.

Para las Olimpiadas de Beijing 2008, 600 vehículos híbridos compuestos por batería eléctrica y celda de combustible eléctrica fueron usados, los vehículos se usaron como carros de soporte para la maratón y el transporte de los organizadores e invitados especiales. Estos vehículos cubrieron una distancia total de más de 100.000 *kilómetros* sin ningún tipo de incidentes mayores, cada vehículo tiene una autonomía teórica de 235 *km* por tanque de hidrógeno.

Después de los Juegos Olímpicos, dieciséis vehículos de pila de combustible fueron enviados a California para las demostraciones de la flota en Fuel Cell Partnership (CAFPC). En este caso, la flota cubrió un adicional de 37.000 *kilómetros* entre febrero y junio de 2009.

En febrero de 2009, un proyecto de demostración comenzó a promover los vehículos nuevos de energía en trece ciudades. El gobierno puso a disposición fondos en forma de un subsidio para la compra de estos vehículos, que inicialmente se centrará en los vehículos de uso público, como taxis y autobuses. El proyecto espera contar con más de 60.000 vehículos limpios y autobuses en la carretera en estas ciudades para el año 2012.

Una oportunidad potencial para las pilas de combustible se dirige a la bicicleta eléctrica (e-bike) las cuales son cada vez más popular en el país.

La mayoría de Investigaciones en China relacionadas con hidrógeno y celdas de combustible se realiza con financiación del gobierno a través de dos programas: El 863 National High Technology Research and Development Program, (Inicia en marzo de 1986) y el 973 National Basic Research Program (Inicia En marzo 1997).

El Ministerio de Ciencia y Tecnología (MOST) fijó los objetivos de desarrollo y los niveles de financiación para los diferentes proyectos. Los proyectos planeados por el gobierno chino se presentan en bloques de 5 años, conocidos como “Planes quinquenales para el desarrollo económico y social Nacional para la República popular China”. En el noveno quinquenio (1996-2000), se invirtieron \$4.75 millones de dólares proporcionados por el programa 973 y \$60,143 dólares del programa 863. En el plan (2001-2005) se adicionaron \$4.75 millones de dólares para investigación, \$3.48 millones para la generación de hidrógeno a partir de energía solar y \$139 millones para el programa de Investigación y desarrollo para el avance de la tecnología del hidrógeno en vehículos híbridos con celdas de combustibles, además se invirtieron \$23.74 millones de dólares para proveer energías limpias y un vehículos de celdas de combustible.

En 2006 se inicia la ley de energía renovable de china, que beneficia a la electricidad generada con una prima de  $0,04 \text{ dólares/Kwh}$  de energía generada a partir de biomasa. En 2010, la comisión Nacional para el desarrollo y la reforma, aumenta dicha prima a  $0,12 \text{ dólares/kWh}$ .

El plan de (2010-2015) tiene como objetivo apoyar el desarrollo de nuevas industrias de energía como: Generadores de energía a partir de viento; energía solar más eficiente; el aprovechamiento del calor y la conversión de energía a partir de biomasa. En apoyo a esto, el gobierno chino proporciona incentivos atractivos para fomentar el desarrollo tecnológico.

En junio de 2011, 40 científicos de alto nivel procedentes de toda China se reunieron en Beijing para una mesa redonda tres días sobre el hidrógeno y las pilas de combustible. La reunión fue una oportunidad para el intercambio de información entre los académicos y fue apoyado financieramente por el gobierno.

2011 es el primer año del doceavo plan quinquenal con una inversión de \$ 15,8 millones de dólares para proyectos de celdas de combustible de hidrógeno, estos fondos son parte del proyecto 863. Además, el proyecto 973 apporto \$ 11,1 millones de dólares a la división de financiación de celdas de combustible disponibles en dos partes: la primera para la celda de combustible de óxido sólido (SOFC), y la otra para las celdas de platino sin combustible.

A pesar de estos objetivos tan ambiciosos, la mayoría de la electricidad generada en China aún proviene del carbón, y lo hará en el futuro previsible, ya que las necesidades de la población se deben satisfacer.

### 3.1.3 Japón

La siguiente experiencia muestra como los japoneses estructuran sus iniciativas procurando obtener resultados en varios ámbitos sociales y con una duración adecuada para permitir que los hallazgos encontrados se consoliden y sean la base de proyectos más complejos en el futuro.

Del 2002 al 2010 se llevó a cabo un importante proyecto de demostración de la tecnología, el cual fue apoyado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria. Este proyecto permitió recolectar información básica sobre producción de hidrógeno, rendimiento de la tecnología, características medio ambientales, eficiencia energética y seguridad, que cubrían el ciclo de uso del combustible desde su producción hasta su uso en la locomoción, mediante la puesta en marcha de vehículos que utilizaban celdas de combustible y estaciones de repostaje de hidrógeno producido por electrólisis y reformado con vapor de derivados del petróleo. (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project, 2002).

El proyecto tuvo dos etapas, la primera llevada a cabo del 2002 al 2005, buscaba exaltar la alta eficiencia energética de los vehículos movidos por celdas de combustible y la estructuración de todo el ciclo de vida del vector energético y la tecnología en general enfocada hacia el transporte. Esta primera etapa fue conducida por el Instituto Japonés de Investigación Automovilística y la Asociación para el Avance de la Ingeniería del Japón.

La segunda etapa se llevó a cabo del 2006 al 2010, analizaba detalles operativos sobre las condiciones actuales de operación, para definir procesos, generar controles y estándares, con el fin de posibilitar la diseminación del conocimiento en esta tecnología.

Se analizaron posibilidades de ahorros energéticos, mitigación de impactos ambientales, identificación de tendencias en políticas y en tecnologías. En la segunda etapa se integraron a la dirección el Centro Japonés de Energía Petrolera y la Asociación Japonesa de Gas. (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project, 2002).

Partiendo del aprendizaje generado por este proyecto, se generaron spin-offs que promovieron la producción de celdas de combustible para aplicaciones estacionarias, en maquinaria industrial y en el transporte masivo.

El alcance político de esta iniciativa se hace evidente al encontrar dentro de los organismos que apoyan el proyecto al Ministerio de Economía y más adelante a

otras empresas y entidades estatales relacionadas con el sector energético y automotriz.

En la segunda etapa del proyecto se hace uso de la información recopilada para establecer normatividad técnica al respecto para ser difundida como parte de la formación académica de estudios profesionales relacionados con la tecnología.

De la experiencia japonesa es importante resaltar el tiempo de experimentación establecido y la metodología incluyente aplicada, que posibilita la obtención información más completa vista hasta ahora en cualquier otro de los países, al involucrar a todas las entidades interesadas en evaluar la tecnología bajo un mismo proyecto, con contenido más completo para la difusión del conocimiento con miras a la implementación de la tecnología.

### 3.4 AMÉRICA DEL SUR

#### 3.4.2 Argentina

La Asociación Argentina del Hidrógeno que edita la revista Hidrógeno desde 1998<sup>5</sup> con volúmenes casi semestrales (Asociación Argentina del Hidrógeno, 2005). Tiene dentro de sus objetivos como asociación, la promoción de “la vinculación y coordinación entre sectores del gobierno, industrias, instituciones de investigación y desarrollo y universidades, para el establecimiento a nivel nacional de la industria del hidrógeno y su crecimiento ulterior”, al igual que la contribución con la difusión académica del conocimiento disponible sobre el hidrógeno a todos los niveles y la integración de la misma con otras fuentes y estructuras de energías renovables, con el fin de contribuir con la integración y desarrollo de esta tecnología en el país.

El proyecto nacional más importante es el de la Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado en la región de Santa Cruz en la Patagonia Argentina, la cual funciona como un centro de investigación y difusión de la tecnología, donde se disponen de instalaciones adecuadas para la ejecución de pruebas piloto con vehículos municipales (Módulo Taller), aulas para capacitación de técnicos y profesionales y una biblioteca para la capacitación de técnica y educativa abierta a la comunidad (Modulo II). Existen áreas para investigación en equipos (Laboratorio) y equipos en funcionamiento para análisis (Electrolizador y Compresores). De esta infraestructura la que más llama la atención fue el área

---

<sup>5</sup> “La primera publicación del mundo enteramente dedicada al Hidrógeno y a sus tecnologías en idioma español” – Tomado de <http://www.aah2.org.ar/revista.htm>

que aprovecha el producto calorífico derivado del proceso de producción de hidrógeno en un invernadero, con el fin de avanzar en el análisis de experiencias en la eficiencia en la producción de distintas especies vegetales. (La Planta Experimental de Hidrógeno, 2007).

Los centros de argentinos de investigación más importantes son el Centro Atómico de Bariloche (CAB)<sup>6</sup> e Instituto Balseiro (IB)<sup>7</sup>, los cuales cuentan con el respaldo de la Comisión Nacional de Energía Atómica. El Grupo Metalurgia del CAB se encuentra investigando en torno al proceso de producción y almacenamiento principalmente. A continuación se mencionan algunos de los participantes del proceso, (Centro Atómico Bariloche):

- Preparación de aleaciones formadoras de hidruros para almacenamiento de hidrógeno, caracterización de sus propiedades de absorción y desorción de hidrógeno.
- Construcción y ensayo de prototipos de almacenadores de hidrógeno.
- Construcción y ensayo de equipos de laboratorio para estudiar y optimizar la producción de hidrógeno por electrólisis del agua.

Una de las aplicaciones más interesantes de los materiales metálicos que pueden absorber hidrógeno y formar hidruros es la fabricación de electrodos para baterías recargables del tipo Níquel – Hidruro. Estas baterías, que ya se están empezando a utilizar en teléfonos celulares, están reemplazando gradualmente a las de Níquel – Cadmio, que tienen el inconveniente de la toxicidad del cadmio, con lo que resulta muy difícil su disposición final una vez agotadas

Han trabajado mancomunadamente con la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en la investigación de materiales. Este instituto desarrolló un mecanismo de concurso denominado el IB50K, por medio del cual se incentiva a estudiantes e investigadores con no más de 4 años desde su graduación, a presentar proyectos innovadores, que son auspiciados por importantes empresas del ámbito local argentino.

También se encuentra dentro de la lista de centros de investigación, el Instituto de Investigaciones Físico Químicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), el cual cuenta con un amplio rango de líneas de investigación, (El Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA)). El CAB y el INIFTA se encuentran “trabajando en colaboración para el desarrollo de nuevos materiales para

---

<sup>6</sup> Centro Atómico de Bariloche - <http://www.cab.cnea.gov.ar/>

<sup>7</sup> <http://www.ib.edu.ar/>

electrodos de baterías recargables, el estudio de sus propiedades frente al hidrógeno, y su comportamiento electroquímico.

En el desarrollo de este país se puede evidenciar el enfoque investigativo hacia la producción y almacenamiento del hidrógeno en pilas de combustible. Según Giunta, Mosquera, & Laborde, además de estas celdas de combustible, se han desarrollado en el país prototipos de celdas multimódulo de tipo PEM.

Según Tori, este tipo de celda consta de dos placas de acero inoxidable y varias placas de grafito cuyo material permite una alta conductividad eléctrica. La función de las 2 placas de acero inoxidable es permitir la entrada del hidrógeno y el oxígeno necesario por medio de resistencias calefactoras y acoples rápidos.

El prototipo multimódulo de 4 placas bipolares presenta potencias de alrededor de  $13W$  en un voltaje de  $1,6V$  lo que representa una ventaja frente a las placas monopolares, pero las pérdidas del prototipo multimódulo son altas, como consecuencia a cada una de las caídas óhmicas generadas por el aumento de ensambles de esta. Actualmente se trabaja en la reducción de estas pérdidas.

Según (Fasoli, Sanquinetti, & Lavorante, 2009) la obtención de energía por procesos eólicos y solares, son una gran alternativa a los problemas energéticos que puede llegar a generar los problemas relacionados con el uso de combustibles fósiles, siempre y cuando logren ser procesos de producción de energía continua, normalmente estas formas de producción eléctrica se encuentran en zonas poco pobladas y apartadas de las grandes ciudades, además de no ser continuas, desventaja que según el autor puede ser eliminada con el uso del hidrógeno como vector energético, en el almacenamiento de energía en pilas de combustible.

Estas pilas permitirían el almacenamiento de energía eléctrica para las ocasiones en que la demanda energética sobrepase los índices de producción. Para almacenar grandes cantidades de energía las pilas de combustible permiten ser conectadas en serie aumentando su capacidad; Para realizar este proceso se debe desarrollar pilas de combustible de tipo multimódulo.

Para el siguiente año los experimentos se enfocaran en realizar baterías que logren alcanzar una potencia de  $50W$ , aumentando la efectividad de las placas bipolares en la circulación de los gases, y la optimización de recursos que alimentaran los elementos individuales de las celdas. El potencial obtenido para el 2007 en las celdas alcanzó un máximo de  $10W$  y para el año 2009 un máximo de  $18W$ .

Existe una iniciativa en el sector privado, que pretende desarrollar una industria de motores en torno a la mezcla de gas natural vehicular con un 20% de hidrógeno<sup>8</sup>, ya que la mezcla, permitiría aprovechar la capacidad del hidrógeno de quemarse con una muy pequeña cantidad de aire, lo cual le abriría paso a una combustión mucho más eficiente. La empresa Energía Argentina (ENARSA)<sup>9</sup>, está llevando a cabo investigación y desarrollo en el ámbito de producción de hidrógeno, para ello ha desarrollado una planta para la producción de hidrógeno a partir de bioetanol. También está apoyando una investigación en la que participa el Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEFA) y la Escuela Superior de Técnica (EST), en él se busca avanzar en el conocimiento y posibilidades técnicas para desarrollar prototipos de Pilas de Combustión PEM con potencias del orden de 15 a 50 *Vatios*, que puedan ser de utilidad para aplicaciones móviles y estacionarias, en particular en condiciones climáticas extremas como pueden ser las de la Antártida Argentina.

El Instituto Argentino de Normalización y Certificación ha avanzado en el tema la creación y adaptación de normas locales relacionadas con la tecnología de hidrógeno (IRAM – Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2009), como es el caso de la ISO/TC 197, cuyo alcance es la “normalización en el campo de los sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte, medición y uso del hidrógeno. Esto es muy importante al momento de avanzar en la implementación y difusión del conocimiento, ya que permitirá que la permeabilidad sea mayor, como consecuencia de la comprensión entre diferentes instituciones y organismos, en torno a un acuerdo normativo nacional, cuyos objetivos son la elaboración de normas para los siguientes ejes:

- Especificaciones del combustible y las tecnologías de uso del hidrógeno.
- Proveer lineamientos para el desarrollo de infraestructura de transporte y almacenamiento móvil y fijo del hidrógeno.
- Desarrollo de normas para el uso en vehículos de carretera.
- Desarrollo de normas para garantizar la seguridad de los procesos de uso del hidrógeno.
- Elaboración de normas sobre dispositivos de detección como válvulas de cierre y reguladores de presión para ser usados en sistemas de hidrógeno.

---

<sup>8</sup> La investigación de esta mezcla esta siendo apoyada por ENARSA y se evidencia en <http://www.enarsa.com.ar/enarsaid.pdf>

<sup>9</sup> <http://www.enarsa.com.ar/>

En este aspecto se resalta la Ley 26.123<sup>10</sup> por medio de la cual se legitima la tecnología de hidrógeno como un objetivo de carácter nacional, que aparte de incentivar la investigación, desarrollo y capacitación en este tema, también ha creado un marco normativo que incentiva tributariamente la participación en este nuevo sector. Por otro lado también contempla la creación del Fondo Nacional para el Fomento del Hidrógeno FONHIDRO. Por otra parte, la Comisión nacional de energía atómica ha venido desarrollando cada dos años ediciones del congreso HYFUSEN<sup>11</sup>, que se lleva a cabo en una región diferente de Argentina en cada ocasión, en el cual participan países de la región con exposiciones científicas, tecnológicas y educativas, y se promueve la capacitación en la tecnología a través de cursos previos a la iniciación del congreso.

Por otro lado Argentina cuenta con el plan de desarrollo para las tecnologías del hidrógeno liderado por el centro atómico Bariloche (Meyer, Caneiro, Corso, & Ponce, 2004). La finalidad de éste es contribuir al desarrollo de cada una de las etapas necesarias para lograr una economía del hidrógeno, algunos de los aspectos a mejorar son el desarrollo de materiales para la purificación y compresión del hidrógeno y la formación de recursos humanos capaces de idear métodos y generar los conocimientos necesarios en el tema.

En control de calidad para aumentar la fiabilidad de las tecnologías del hidrógeno se desarrolla actualmente software y equipos para estudiar y controlar procesos de almacenamiento del hidrógeno, medir la degradación de las propiedades mecánicas en la interacción con el hidrógeno, y la formación de recursos humanos para la asesoría a empresas privadas y entes gubernamentales, y la investigación y desarrollo.

### 3.4.3 Brasil

Según Lizana, 2007 en el eje estatal, Brasil es el país más avanzado en Latinoamérica, apoya iniciativas en cuanto a producción de hidrógeno a partir de etanol desde el año 1999. Los esfuerzos de las investigaciones se encuentran centrados a producción de hidrógeno y desarrollo de celdas de combustible.

El Ministerio de Ciencia y Tecnología creó el programa brasileño de hidrógeno y sistemas de celdas de combustible, con la finalidad de intensificar la ayuda interdisciplinaria de universidades y empresas privadas para aumentar el

---

<sup>10</sup> Ley de Promoción del Hidrógeno -

<http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=119162>

<sup>11</sup> HYFUSEN - [http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/hyfusen\\_2009/index.html](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/hyfusen_2009/index.html)

desarrollo en las áreas de producción de hidrógeno y celdas de combustible, los aspectos que busca mejorar el programa son:

- Desarrollo de celdas de combustible.
- Estaciones de producción.
- Almacenamiento y distribución.
- Capacitación de recursos humanos.
- Regulación y participación de los entes correspondientes a producción, distribución, venta.

A partir del año 2005 se centraron los esfuerzos del programa en producción de hidrógeno, celdas de combustible, celdas de óxido sólido, sistemas de integración y aplicaciones del hidrógeno y pilas de combustible.

El proyecto cuenta con el apoyo de diferentes universidades entre las cuales se encuentran la Universidad Federal do Maranhao, la Universidad Estadual Paulista, Universidad Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Universidades Federal de Santa Catarina entre otras.

Figura 25. Proyecto ómnibus hidrógeno.



Fuente: MORENO, Luis Gabriel. VARGAS, Carlos Eduardo. La tecnología del Hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. Trabajo de Grado (Magister en Dirección y Gerencia de empresas). Facultad de Administración. Universidad de nuestra señora del Rosario. Disponible [<http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3>]

En Brasil han avanzado en el interés de incorporar energías renovables al sistema de transporte desde 1992 ver figura 25, cuando empezaron a evaluar el gas natural como combustible alternativo. En 2001, se consolidó una alianza entre el Ministerio de Minas y Energía, la Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de Sao Pablo (EMTU) y la Universidad de Sao Pablo. Esta alianza, conocida como Ônibus Brasileiro a Hidrogênio, tiene como objetivo principal el desarrollo de un

ambiente favorable para los negocios en torno a la tecnología del hidrógeno, de modo que promueva un desarrollo económico con mayor inclusión social.

El proyecto es financiado con recursos del Global Environmental Facility (GEF) canalizados a través del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y busca desarrollar la industria del hidrógeno aplicado a las necesidades del sector del transporte urbano, aprovechando la infraestructura instalada en Brasil. En esta alianza participan también, varios sectores de la economía brasileña, con el fin de comenzar a desarrollar infraestructura y experiencia en la producción, almacenamiento, distribución, diseño y fabricación de buses movidos con celdas de combustible de hidrógeno.<sup>12</sup>

Las razones por las que se llevó a cabo este proyecto en Brasil, es principalmente debido a su amplio parque automotor de servicio público, catalogado como el mayor mercado mundial de autobuses del mundo y también su alta cuota del mercado mundial en cuanto a buses se refiere. Como motivación de carácter ambiental, Sao Pablo es la segunda ciudad con el mayor problema de contaminación en el mundo.

Dentro de los impactos esperados esta la contribución al avance de la tecnología y el mercado mundial, la generación de empleos, reducción de costos de la tecnología, mayor incentivo a la investigación, mejoras en la calidad de vida de los pasajeros y habitantes de la ciudad de Sao Pablo<sup>13</sup> y los efectos ambientales en general.

Los experimentos están encaminados a tomar como zona de prueba el Área Metropolitana de Sao Pablo, con el fin de iniciar la prestación de servicios con 8 buses dotados con esta tecnología por un periodo de 3 años, estableciéndose como promedio de recorrido esperado por vehículo 42.000 *kilómetros*, para un total cercano al millón de kilómetros recorrido al final de los tres años. La frontera de evaluación de la tecnología establecida es de 1.000.000 *de kilómetros*, ya que se espera que en este lapso de tiempo se alcancen a identificar las fallas más habituales, causas y soluciones, además de las oportunidades para disminuir costos, incrementar la rentabilidad y durabilidad de los vehículos.<sup>14</sup>

---

<sup>12</sup> Proyecto ÔNIBUS BRASILEIRO A HIDROGÊNIO - [http://www.mme.gov.br/programas/onibus\\_hidrogenio/](http://www.mme.gov.br/programas/onibus_hidrogenio/)

<sup>13</sup> Estas mejoras en la calidad de vida están principalmente resumidas en la disminución de la polución en el área metropolitana y la reducción de los niveles de ruido.

<sup>14</sup> Environmental strategy for energy: hydrogen fuel cell bus for Brazil

El suministro del hidrógeno estará a cargo de una estación ubicada en el estacionamiento de los buses, la cual también está contemplada como parte del proyecto. La estación de servicio producirá el hidrógeno a partir de electrólisis, montada por la Distribuidora BR, con apoyo de Petrobras, Hydrogenics y AES Electropaulo. La estación funcionará con energía proveniente de las hidroeléctricas y por ello se garantizara que el hidrógeno producido sea completamente libre de emisiones.

En cuanto a los centros de investigación brasileños, se pudo identificar que se articulan en torno al programa denominado ProH<sub>2</sub>, al cual pertenecen una red de universidades, centros de investigación y empresas, distribuidas en 5 grupos de investigación importantes, SOFC, PEMFC, Producción de Hidrógeno, Sistemas de Integración y Aplicaciones.

La información recopilada permite apreciar un gran interés del gobierno y el sector industrial en desarrollar la tecnología, vislumbrada como una posibilidad de constituir una industria en torno a la tecnología de hidrógeno, los problemas de alta contaminación, la posibilidad de aprovechamiento de fuentes hídricas de producción de energía. Todo este esfuerzo está claramente encaminado a desarrollar un fuerte sector productivo que en el futuro les permita participar más activamente en el mercado internacional.

En la industria de este país se encuentran actualmente empresas que comercializan generadores a base de hidrógeno con potencias de 5 y 50kW además de accesorios para la infraestructura necesaria.

### 3.4.3 Chile

Según Lizana, 2007 el país se encuentra en un estado inicial, sus proyectos en cuanto a tecnologías del hidrógeno se encuentran en fases experimentales, de momento no hay formación de entidades gubernamentales o centros destinados al desarrollo de dichas tecnologías, por otro lado el proyecto de ley sobre energías renovables no incluye al hidrógeno como fuente de energía.

La Comisión Nacional de Energía de Chile tiene una Base de Datos sobre Investigación, Desarrollo e Innovación en Energía de consulta sobre los proyectos investigativos relacionados con energía.

En el aparte de celdas de hidrógeno, están disponibles algunos proyectos de investigación ya concluidos, en los que participan grupos de investigación de varias Universidades. Dentro del inventario de proyectos, cuentan con dos

proyectos en almacenamiento de hidrógeno, uno de ellos enfocado a la investigación con nanotubos de carbono y el otro en estudios de absorción de hidrógeno en películas metálicas. Existen dos más en el área de producción de hidrógeno, uno centrado en la ácido-génesis para la producción biológica de hidrógeno, otro investiga la producción de hidrógeno a partir de alcoholes primarios; el proceso inició en el año 2006 y su duración fue de 3 años por parte de la Universidad de Chile.

Dentro de la misma universidad se encuentran investigaciones en el área relacionadas con:

- Formas alternativas en procesos de producción y almacenamiento de hidrógeno, para su aplicación en celdas de combustible.
- Estudio de catalizadores soportados de cobre para la producción de hidrógeno a partir de metanol.
- Controlador de módulo de celda de combustible mediante la herramienta Labview.

Dentro del eje industrial se encuentra el programa Eco desarrollado por la empresa Sistemas Automáticos S.A la cual busca desarrollar una planta eléctrica cuyo combustible sea el hidrógeno obtenido a partir de procesos eólicos y solares.

Con esta información se puede concluir que las investigaciones en Chile, avanzan de forma aislada y no hay un apoyo evidente por parte del gobierno a esta tecnología. Por otra parte la Empresa Nacional del Petróleo ENAP, ha inclinado sus proyectos hacia el desarrollo de biocombustibles. No hay indicios de agremiaciones o alianzas empresariales en torno a esta tecnología.

### 3.5 SÍNTESIS DE LAS EXPERIENCIAS MUNDIALES POR CONTINENTE

Las experiencias más relevantes a nivel mundial fueron analizadas tomando como base tres ejes que inciden sobre la implementación exitosa de una tecnología; la Educación e Investigación, el Desarrollo de Proyectos y el Apoyo Político y Legislativo como se muestra en la Tabla 10. Esta segmentación en tres ejes combinada con un análisis deductivo, permitió extraer y consolidar la lista de actividades específicas que constituyen las piezas básicas para la conformación de la estrategia de incorporación, las cuales guardan una estrecha relación con alguno de los tres grupos de actores de los que habla el modelo político-tecnológico del Triángulo de Sábado, Universidad-Estado-Empresa, como será descrito en los numerales siguientes del presente documento.

Tabla 10. Síntesis de las experiencias Mundiales por continente.

EJES	AMÉRICA DEL NORTE	EUROPA	ASIA	AMÉRICA DEL SUR
EDUCACIÓN E INVESTIGACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Utilización del hidrógeno como reserva de energía eléctrica, producido mediante electrolisis de energía obtenida de fuentes renovables.</li> <li><input type="checkbox"/> Investigación en producción de hidrógeno a partir de procesos biológicos de fermentación y otros métodos de aprovechamiento de microorganismos que liberen hidrógeno en sus procesos vitales.</li> <li><input type="checkbox"/> Investigaciones asociadas a la producción de hidrógeno por proxisis de biomasa y el desarrollo de catalizadores.</li> <li><input type="checkbox"/> Estudio de materiales para producción, conducción, almacenamiento y dispositivos de seguridad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Programas Educativos con relación a la Tecnología del Hidrógeno y Pilas de Combustible</li> <li><input type="checkbox"/> Proyectos de Investigación de Universidades</li> <li><input type="checkbox"/> Proyecto para la consolidación de un clúster de hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Proyectos de investigación para la obtención de hidrógeno de fuentes biológicas</li> <li><input type="checkbox"/> Entidades sin ánimo de lucro dedicadas a la investigación en la tecnología</li> <li><input type="checkbox"/> Institutos y Centros de Investigación de los requerimientos técnicos de la tecnología del hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Líneas de investigación relacionadas con la tecnología del hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Pruebas de la tecnología en vehículos diferentes (Buses, Camionetas y Automóviles)</li> <li><input type="checkbox"/> Educación en la Tecnología del Hidrógeno a diferentes de capacitación</li> <li><input type="checkbox"/> Documentación de las experiencias relacionadas con producción, almacenamiento, suministro y uso del hidrógeno en el sector transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Centros de Investigación en la Tecnología del Hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Eventos nacionales para dar a conocer los resultados de las investigaciones realizadas por los grupos de investigación de las diferentes universidades argentinas</li> <li><input type="checkbox"/> Grupos de Investigación en la Tecnología del Hidrógeno</li> </ul>
DESARROLLO DE PROYECTOS	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Proyectos de transporte público propulsado con celdas de combustible de hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Estudios económicos del potencial de investigación</li> <li><input type="checkbox"/> Empresas fabricantes de automotores que incluyen MCI propulsados a hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Confederación nacional de los consumidores de energía eléctrica</li> <li><input type="checkbox"/> Multinationales francesas que participan activamente en proyecto de investigación de punta a nivel mundial</li> <li><input type="checkbox"/> Empresas que participan en redes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Motor de Combustión Interna basado en hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Buses de servicio público de transporte de pasajeros basado en pilas de combustible de hidrógeno.</li> <li><input type="checkbox"/> Proyecto encaminado a la acumulación de experiencias para la conformación de un clúster de la Tecnología del Hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Implementación de buses propulsados por pilas de combustible de hidrógeno en el marco de un proyecto que busca registrar la experiencia en la tecnología para el posterior desarrollo</li> </ul>

EJES	AMÉRICA DEL NORTE	EUROPA	ASIA	AMÉRICA DEL SUR
		<p>de cooperación internacional en proyectos relacionados con la tecnología del hidrógeno</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Asociación Universidad Empresa de desarrollo de un proyecto productivo relacionado con el suministro de tanques de almacenamiento de hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Proyectos de generación distribuida con sistemas energéticos de respaldo basados en hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Red internacional de cooperación en proyectos relacionados con la tecnología</li> </ul>		<p>de una industria competitiva.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Suministro de mezcla de Gas Natural e Hidrógeno a través del sistema de distribución de Gas Natural domiciliario e industrial</li> </ul>
ALCANCE POLÍTICO Y LEGISLATIVO DE LA INICIATIVA	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Subsidios a la compra y producción de vehículos potenciados por hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Participación relevante de entidades no gubernamentales en la difusión de la tecnología</li> <li><input type="checkbox"/> Consolidación de un clúster de hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Fondos para investigación</li> <li><input type="checkbox"/> Normatividad en seguridad para el manejo del Hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Participación relevante de entidades no gubernamentales en la difusión de la tecnología</li> <li><input type="checkbox"/> Redes Internacionales de Cooperación en Educación con relación a la Tecnología del Hidrógeno y Pilas de Combustible</li> <li><input type="checkbox"/> Legislación que promueve la des carbonización de la producción energética</li> <li><input type="checkbox"/> Convocatorias gubernamentales para investigación y proyectos relacionados con la tecnología del hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Definición de regulación técnica del manejo y almacenamiento del hidrógeno en el país</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Inclusión de las Energías Renovables en la estrategia país de largo plazo con el Diseño del Plan Nacional de Energía de Hidrógeno en la India</li> <li><input type="checkbox"/> El Plan de Gobierno creó el Ministerio de Fuentes de Energía no Convencionales</li> <li><input type="checkbox"/> Iniciativas gubernamentales encaminadas a la reducción del impacto ambiental de las actividades humanas</li> <li><input type="checkbox"/> Apoyo financiero Gubernamental para investigación en la tecnología del Hidrógeno.</li> <li><input type="checkbox"/> Consolidación de normatividad de seguridad en manejo y almacenamiento de hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Normatividad de seguridad para el manejo y almacenamiento de hidrógeno</li> <li><input type="checkbox"/> Iniciativas gubernamentales para la consolidación de un clúster en torno a la tecnología del Hidrógeno</li> </ul>

Fuente: MORENO, Luis Gabriel. VARGAS, Carlos Eduardo. La tecnología del Hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. Trabajo de Grado (Magister en Dirección y Gerencia de empresas). Facultad de Administración. Universidad de nuestra señora del Rosario. Disponible [\[http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3\]](http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3)

## 3.6 PATENTES A NIVEL MUNDIAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA

### 3.6.1 Toyota

Toyota logra vehículo híbrido de hidrógeno con autonomía de 830 kilómetros. Biocombustibles, hidrógeno

El nuevo vehículo, FCHV-adv (Fuel Cell Hybrid Vehicle-Advanced) ha sido homologado con la nueva batería Toyota FC, de nuevo diseño y alto rendimiento, que aún será mejorada en una nueva fase de desarrollo.

El Toyota FCHV-adv ha sido probado a altas temperaturas por la California Fuel Cell Partnership en Estados Unidos, en tanto que las pruebas a bajas han sido realizadas en Timmins (Canadá).

Asimismo, TMC ha desempeñado una constante labor de investigación para afrontar los problemas técnicos a medida que se presentaban.

A partir de los resultados proporcionados por estas pruebas, Toyota perfeccionó el sistema de pila de combustible de este vehículo para mejorar la autonomía y el arranque a bajas temperaturas, que habían frenado hasta ahora el uso generalizado de los vehículos de pila de combustible.

La unidad esencial de la batería Toyota FC es el conjunto de electrodos y membrana (MEA, en sus siglas en inglés), donde el principal problema para los ingenieros fue el agua que aparecía en el interior y que interfería con la generación eléctrica dentro del MEA a bajas temperaturas.

Se llevó a cabo una importante labor de investigación, que incluyó pruebas de visualización interna, para comprender el comportamiento y la cantidad del agua generada en la pila de combustible, lo que permitió a los ingenieros optimizar el diseño del MEA para mejorar el arranque a bajas temperaturas.

Como consecuencia, el Toyota FCHV-adv puede arrancar y funcionar en zonas frías a temperaturas de hasta 30 grados bajo cero, lo que significa que el vehículo se puede utilizar en una mayor variedad de condiciones y climas.

Ello llevó a una mejora de la eficiencia del combustible en un 25%, gracias al nuevo rendimiento de la pila de combustible, el perfeccionamiento del sistema de frenado regenerativo y la reducción de la energía consumida por el sistema auxiliar.

Otras modificaciones introducidas en la versión avanzada del vehículo son la incorporación de un control de degradación del catalizador del electrodo y la mayor duración de la pila de combustible.

El coche está equipado con depósitos de hidrógeno de alta presión a 70 Mpa, desarrollados por Toyota, con los que el vehículo puede recorrer unos 830 kilómetros sin repostar; es decir, más del doble que el antecesor del Toyota FCHV-adv, el Toyota FCHV.

Al tiempo que continúan las tareas de investigación y desarrollo para mejorar aspectos como el aumento de la duración y la reducción de costes de la batería Toyota FC, la compañía automovilística colabora con el gobierno, las compañías eléctricas y otros agentes interesados, para fomentar el uso generalizado de los vehículos de pila de combustible.<sup>15</sup>

### 3.6.2 Mazda

Mazda ha querido acortar distancias entre el automóvil actual y el hidrógeno poniendo a punto una versión de su motor rotativo Renesis para que pueda funcionar indistintamente con hidrógeno y con gasolina normal.

La puesta a punto del motor Renesis para que también pudiera funcionar con hidrógeno se concluyó en 2004 y en marzo del presente año, tras ser debidamente homologado, se entregaron las cuatro primeras unidades del RX8, que es el único modelo de Mazda que actualmente utiliza el motor rotativo, equipadas con esta variante mecánica.

Estas primeras unidades han sido cedidas en leasing a empresas y agencias del Gobierno japonés a fin de que se pueda hacer un seguimiento de los coches. Más adelante, Mazda tiene la intención de ampliar esta disponibilidad del RX8 Hydrogen RE —así se llama la versión— a otros sectores de la sociedad que deberán pagar un alquiler mensual de unos 2.795 euros.

Mazda puede presumir de 15 años de experiencia en motores que funcionen con hidrógeno. Su primer proyecto en esta área fue hacer que el motor rotativo funcionara con hidrógeno, cosa que logró por primera vez en 1991, año en que presentó el prototipo HR-2.

---

<sup>15</sup> Olmedo, Fernando(2008).Toyota logra vehículo híbrido de hidrógeno con autonomía de 830 kilómetros.Biodisol. Recuperado el 21 de agosto de 2015,de:  
<http://www.biodisol.com/biocombustibles/toyota-logra-vehiculo-hibrido-de-hidrogeno-con-autonomia-de-830-kilometros-biocombustibles-cambio-climatico-energias-limpias/>

Después, aunque también ha experimentado con vehículos equipados de pila de combustible, sistemáticamente ha ido mejorando la versión de hidrógeno de los motores rotativos, emblemáticos para esta marca que, aunque no los desarrolló, logró hacerlos fiables. Por eso, cuando sacó el Renesis, su última evolución, tardó en prepararla para hacerla funcionar con hidrógeno, además de con gasolina.

Los motores de tipo rotativo se adaptan al empleo de carburantes alternativos como el hidrógeno mejor que los tradicionales de pistones alternativos por el hecho de que cada una de las cuatro fases de su funcionamiento —admisión, compresión, explosión y escape— tiene lugar en cámaras diferentes, a las que el rotor va empujando la mezcla combustible. Esto hace que las temperaturas sean menores, eliminando el riesgo de la autodetonación que en caso del hidrógeno resulta fácil que se produzca dado su alto poder de ignición.

El hidrógeno llega en estado gaseoso a cada uno de los dos rotores de que se compone el motor Renesis, a través de dos inyectores electrónicamente controlados. El que sean dos los inyectores por rotor se debe a la necesidad de asegurar un suficiente llenado del motor pese a la baja densidad del hidrógeno. Pese a ello, la potencia del motor cuando funciona con hidrógeno se ve drásticamente mermada. De 207 caballos que desarrolla con gasolina, desciende a 109.

Las modificaciones no son muchas. La principal es la instalación en el comportamiento de equipajes, que por tanto queda anulado, de una bombona con capacidad para 110 litros de hidrógeno comprimido. De momento, la presión a que se mantiene el hidrógeno comprimido es de 350 bares por ser ésta la presión a que se suministra en las estaciones de repostaje en Japón. Pero el subirla, dado que en Europa se comienza a ofrecer también a 700 bares, no les supondría ningún problema. No obstante, el compartimento de equipajes queda separado por una mampara de seguridad.<sup>16</sup>

### 3.6.3 Honda

Honda presentó su primera estación solar de hidrógeno para su modelo FCX Clarity. Un adelanto en tecnología e innovación que logrará que los coches que se muevan con este combustible tengan un lugar donde cargarse. Este se presentó en su centro de investigación y desarrollo de Los Ángeles, California.

---

<sup>16</sup> Piccione, Sergio.(2006).MAZDA RX8 HYDROGEN RE ¡Un soplido de hidrógeno, por favor! Recuperado el 21 de agosto de 2015, de: <http://www.elmundo.es/elmundomotor/2006/09/22/coches/1158915403.html>

Esta es una estación de servicio doméstica que produce en 8 horas medio kilo de hidrógeno, cantidad suficiente para cubrir los desplazamientos cotidianos. La misma tiene como propósito cargar durante la noche coche propulsados por célula de combustible como el Honda FCX Clarity.

A diferencia de la anterior estación de la firma, la nueva cuenta con la novedad de poder prescindir del elemento de compresión consiguiendo un tamaño más reducido que permite integrarlo en un garaje normal y una mejora de rendimiento del 25%. Con el nuevo electrolizador de alta presión diferencial, pudieron eliminar por completo el compresor. Esta innovación reduce el tamaño de otros componentes clave.

La nueva estación permite cargar al vehículo durante la noche sin necesidad de almacenar el hidrógeno y usando energía eléctrica nocturna y barata, además durante el día genera electricidad fotovoltaica que se puede inyectar a la red eléctrica.

Este desarrollo de Honda permite que cualquier vehículo con célula de hidrógeno pueda ser cargado sin problemas. Las marcas y empresas están empeñadas en el uso de las baterías de Ion-litio, pero también deberían perfeccionarse en el uso del hidrógeno.<sup>17</sup>

#### 3.6.4 Mercedes Benz

Mercedes acaba de iniciar la comercialización de su primer modelo de serie que utiliza hidrógeno como carburante. Es el Clase B Fuel Cell, a la venta en Alemania y Estados Unidos, los únicos países que al menos de momento ofrecen una red suficiente de hidrogeneras. Hemos conducido este coche por las calles de Valencia.

Nadie sabe, a día de hoy, cómo serán en el futuro los automóviles, porque no depende solo de los ingenieros y de los fabricantes, sino que, en el fondo, la responsabilidad es de los gobiernos a nivel mundial. Y por esta razón, los fabricantes trabajan cada día en desarrollar nuevas tecnologías cada vez más limpias que permitan la movilidad sostenible en el futuro, a la espera de las decisiones de los políticos.

Y la marca alemana Mercedes es un ejemplo, ya que tiene un amplio abanico de tecnologías disponibles de cara a un futuro próximo. Tiene híbridos, híbridos

---

<sup>17</sup> Tomado de: Adrian(2010). HONDA PRESENTÓ SU ESTACIÓN SOLAR DE HIDRÓGENO. Recuperado el 21 de agosto de 2015, de : <http://cocheseco.com/honda-presento-su-estacion-solar-de-hidrogeno>

enchufables, eléctricos y de hidrógeno. Y nos ha dado la oportunidad de probar, por las calles de Valencia, toda su gama eléctrica. Desde el espectacular SLS, hasta la furgoneta Vito, pero lo que más me interesaba inicialmente era el Clase B Fuel Cell, o dicho de otra forma el Clase B de hidrógeno. Para muchos analistas el hidrógeno representa el futuro del automóvil a medio plazo, al menos para distancias medias-largas y para coches de carretera con los que hacer viajes.

Mercedes lleva años trabajando en la tecnología del hidrógeno. Hay que remontarse muchos años atrás, a mediados de los años noventa, para ver una Vito con pila de hidrógeno en la que prácticamente toda la zona trasera estaba llena por la propia pila de hidrógeno y todos sus mecanismos asociados. Pero la evolución ha sido constante en estos últimos años.

La última generación del Clase A ofrecía en 2004 una versión movida por hidrógeno en fase todavía experimental. Con respecto a aquella versión, ya más cercana en el tiempo, lo que es la pila de combustible es un 40% más pequeña de tamaño, ofrece un 30% más de potencia e igualmente tiene un consumo un 30% inferior en el nuevo Clase B. Sólo una aclaración, la pila de combustible (Fuel Cell o pila de hidrógeno) es el sistema encargado de producir electricidad a partir del hidrógeno almacenado en el depósito.

Según algunos estudios de la Unión Europea, en el entorno del año 2050 cerca de un 35% de los coches del parque comunitario debería estar movido solo por hidrógeno, y estamos hablando de un parque total estimado en 235 millones de vehículos y de ellos más de 80 millones de coches Fuel Cell.

Pero vayamos con nuestra toma de contacto con el Clase B F-Cell. Este Clase B es idéntico en su manejo a un coche normal. Se pone en marcha y solo hace un pequeño ruido y se encienden los testigos. El coche ya está preparado para rodar. Y a partir de ese momento el coche funciona exactamente igual que uno eléctrico, es decir con una caja de cambios sin marchas, que tiene la posibilidad de ir hacia delante o hacia atrás.

Sorprende su capacidad de aceleración, pero es algo a lo que tenemos que acostumbrarnos con los coches eléctricos. Con un vehículo como este no hace falta que el motor esté funcionando a un régimen o a otro para poder acelerar con más o menos rapidez. Aquí es siempre lo mismo. El motor siempre empuja por igual y solo hay que acelerar más o menos para que el coche aumente su velocidad o no.

Nuestra toma de contacto la hicimos por las calles de Valencia, en las proximidades de la Ciudad de las Artes y las Ciencias. Un buen recorrido porque permite acelerar con brusquedad, permite estar en una zona más atascada, hacer cambios de carril y todo lo que habitualmente conlleva el tráfico urbano.

Y en este sentido el funcionamiento del coche es perfecto. Se muestra muy receptivo a las órdenes de su conductor. Además, el funcionamiento del freno motor está bien calculado. Permite recuperar energía, pero no deja parado nuestro coche en cuanto levantamos el pie del acelerador.

En el cuadro de instrumentos encontramos un gran reloj, a la derecha, que nos indica el consumo o la recarga de energía. En condiciones normales en parado está en cero. Cuando aceleramos empieza a subir hasta 40 o 50, aunque se puede llegar a alcanzar los 80 kW ante una aceleración fuerte. Y cuando levantamos el pie del acelerador, la aguja indica por debajo del cero y nos indica que está recuperando energía.

Y a ambos lados del cuadro, en los extremos, encontramos un indicador con la carga del depósito de hidrógeno y en el lado izquierdo otro que nos indica el funcionamiento de la pila de combustible. Un sistema que funciona en base a lo que pisemos el acelerador.

Todos los sistemas del vehículo van situados en el capó delantero, por lo que tanto las cinco plazas del habitáculo como su maletero son idénticos a los de un Clase B normal de gasolina. De hecho dispone de 416 litros de maletero, una cifra muy buena en un coche de estas dimensiones.

Esta ha sido nuestra toma de contacto con el Clase B de hidrógeno, pero ahora llega el momento de contarles algunos datos oficiales del coche que no he podido llegar a comprobar. Por ejemplo, la recarga de los depósitos, su presión de funcionamiento y el tiempo necesario para el rellenado. Pero igualmente sobre sus consumos, autonomía, velocidad máxima y demás.

El motor, eléctrico, tiene una potencia de 136 caballos, mientras que su par motor es de 290 Nm. Este par está disponible desde el momento del arranque. Con ello, su velocidad máxima es de 170 km/h, lo que permite que el Clase B sea un coche utilizable para viajar con él. Pero sobre todo tiene capacidad de recuperación muy buena.

Hablemos de su consumo, que traducido a consumo de gasóleo para poder comparar con otros vehículos, es de 3,3 litros cada 100 kilómetros según el valor

homologado. El consumo real está en torno a los tres kg. de hidrógeno cada 100 kilómetros. El vehículo incorpora unas baterías para acumular la electricidad de 1,4 kWh.

El rellenado de los depósitos, que son tres y van situados bajo el habitáculo del vehículo, se realiza según los técnicos de la marca en unos 3 minutos, aunque este dato tampoco pudimos comprobarlo. Pero es una operación muy sencilla y segura. La presión a la que se almacena el hidrógeno es de 700 bares y la capacidad de cada uno de ellos es de 4 kg de hidrógeno en estado gaseoso.<sup>18</sup>

### 3.6.5 Primera planta alimentada de hidrógeno

El grupo de energía italiano inauguró en la localidad de Fusina, próxima a Venecia (noreste de Italia), la primera planta energética del mundo de ciclo combinado alimentada por hidrógeno, con una potencia total de 16 megavatios.

Según informó hoy en un comunicado de prensa el grupo italiano, accionista mayoritario de la española Endesa, la planta opera con un ciclo combinado alimentado por hidrógeno para producir energía eléctrica y calor, desarrollando una potencia en la primera etapa de unos 12 megavatios.

Ese rendimiento aumenta aprovechando el calor presente en los gases de escape para producir vapor a alta temperatura que, enviado a una cercana central de carbón, genera más energía para lograr una capacidad añadida de 4 megavatios, llegando así a los 16 de capacidad total.

La central, que utiliza 1,3 toneladas de hidrógeno por hora, es capaz de ofrecer un rendimiento eléctrico cercano al 42 por ciento y de producir energía para satisfacer las necesidades de 20.000 familias, evitando que se liberen además más de 17.000 toneladas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.<sup>19</sup>

### 3.6.6 Avión espía sin piloto impulsado por hidrógeno

Boeing ha presentado el 'Phantom Eye' (Ojo Fantasma), un innovador avión espía impulsado por dos motores de hidrógeno a explosión de Ford Escape 150 Hp y dirigido por control remoto (UAV - Unmanned Aerial Vehicle), que puede volar a 20.000 metros de altitud, sin hacer ninguna parada durante cuatro días.

---

<sup>18</sup> CANCELA, Carlos. (2010). AL VOLANTE DE COCHE HIDRÓGENO. Recuperado el 21 de agosto de 2015, de: [http://www.elconfidencial.com/motor/2010-12-13/al-volante-del-coche-de-hidrogeno\\_700965/](http://www.elconfidencial.com/motor/2010-12-13/al-volante-del-coche-de-hidrogeno_700965/)

<sup>19</sup> Tomado: <http://agencias.abc.es/agencias/noticia.asp?noticia=450983>

Esto le permite dar la vuelta al mundo despegando y aterrizando desde la misma base en los EEUU; de manera más simple y barata que un satélite de observación; además sin depender de órbitas fijas, pudiendo realizar observaciones mucho más específicas, de menor altitud y mayor detalle que los satélites espías.

Cada uno de los motores de Ford Escape, tiene 2.3 L y cuatro cilindros, abastecidos por dos balones de hidrógeno líquido ubicados en el fuselaje y no en las alas como hacen los de combustible convencional, lo que simplifica su diseño y permite adosar allí más "carga útil". Es bastante grande, comparado con otros UAV, con su 45 m de envergadura de alas (como un avión de pasajeros).

Sin embargo la propulsión a hidrógeno pesa la mitad que la de su prototipo antecesor a combustible fósil, el "Condor", lo que no solo permite su extraordinaria eficiencia y alcance, sino que lo hace no contaminante. Más allá de que su construcción inicial sea para la NASA y el Pentágono, las tecnologías desarrolladas dejan a Boeing a un paso de construir aviones civiles de pasajeros a hidrógeno, totalmente libres de contaminación.<sup>20</sup>

### 3.6.7 Vector energético en la Antártida de Argentina

En enero de 2009 comenzó a funcionar el primer Módulo Argentino de Energía Limpia (MAEL I), para proveer de energía limpia a la Base Esperanza en la Antártida. Según el secretario técnico de la Asociación Argentina del Hidrógeno (AAH), José Luis Aprea, luego de cumplido más de un año "puede hacerse un balance positivo en todos los renglones, excepto en la duración de los componentes expuestos a la inclemencia climática, como es el caso de los aerogeneradores, que han resultado dañados durante un temporal único que implicó condiciones absolutamente inusuales como vientos del orden de los 300 kilómetros por hora".

Lejos de cualquier actitud pesimista, el secretario técnico de la AAH afirma que este obstáculo les "permitirá estudiar los problemas suscitados y proponer eventuales cambios en el diseño y en los materiales".

El resto de los componentes del MAEL I funcionaron perfectamente y su impacto fue apreciado por los habitantes de la Base, que pudieron comprobar las aplicaciones del hidrógeno en sus labores cotidianas. Ahora, la palabra clave es "continuidad", ya que -concluye Aprea- "se seguirán requiriendo recursos,

---

<sup>20</sup> Tomado: <http://www.elmundo.es/elmundo/2010/07/14/ciencia/1279096630.html>

esfuerzos y buenas relaciones para garantizar la continuidad en el tiempo de las acciones experimentales para que estas devengan en realidades concretas”. La experiencia del MAEL I, además, podría replicarse en sitios aislados de la Patagonia o en áreas de compromiso ambiental, como las grandes ciudades con niveles altos de contaminación.

El MAEL I produce energía eléctrica a partir del viento, sin contaminar el ambiente, que es utilizada para calefaccionar, cocinar y hacer funcionar motores a hidrógeno. Con este proyecto la Argentina se convierte en el segundo país en instalar equipos de hidrógeno en la Antártida. El MAEL I es un desarrollo totalmente argentino que surge del trabajo conjunto entre el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), la Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado, la Asociación Argentina del Hidrógeno y la Escuela Superior Técnica del Ejército y está destinado a proveer con energía limpia a sitios aislados. Se alimenta con energía eólica –pero puede usar cualquier otra energía renovable– para poder producir y almacenar hidrógeno y oxígeno a 30 bar, sin usar compresores.

“Lo importante es que el resultado final es agua, en todo el ciclo no hay contaminación porque se aprovecha la energía del viento, y el resultado final es agua o vapor”, explica el licenciado Ricardo Lauretta del departamento de Ingeniería Mecánica del ITBA, que coordinó a sus alumnos para poder desarrollar el MAEL I.

El emprendimiento fue posible gracias al impulso económico brindado por el gobierno de la provincia de Santa Cruz, la empresa Pan American Energy y al aporte del Banco Mundial a través del Fondo para el Medio Ambiente Global (GEF) que consideró de máxima importancia a este proyecto cuando fue presentado en la convocatoria de 2006.

Por su parte, el ITBA diseñó y desarrolló la tecnología para producir y almacenar hidrógeno a alta presión, sin usar compresores. Aplicando dicha tecnología construyó el electrolizador del MAEL I, que consume 0,8 litros de agua para producir 1 m<sup>3</sup>N de hidrógeno que con una potencia aplicada de 5kW, obtiene 0,7 m<sup>3</sup>N/h de hidrógeno. El electrolizador posee operación automática y puede ser comandado a distancia vía Internet.

En tanto, la Planta Experimental de Hidrógeno que opera en Pico Truncado, Santa Cruz, junto a la Asociación Argentina del Hidrógeno, crearon para el MAEL I el aerogenerador de 5 kW y varios de los equipos alimentados con hidrógeno como

el quemador y el horno con llama directa; el grupo electrógeno a partir de un motor originalmente naftero y el almacenador de hidrógeno en hidruros.

La Escuela Superior Técnica del Ejército desarrolló y perfeccionó una pila de combustible tipo PEM que a partir del hidrógeno proporciona electricidad suficiente para el funcionamiento de elementos de computación e informática. Asimismo, esta institución colabora con docentes para la capacitación y difusión de estas energías renovables en la Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado, y tiene a su cargo proveer el personal capacitado para operar el MAEL I en la Base Esperanza de la Antártida.

¿Por qué se eligió la Antártida? La explicación debe partir de un dato de la realidad: desde el punto de vista de su calefacción y suministro eléctrico, todas las bases ubicadas allí funcionan con combustibles fósiles que deben ser transportados periódicamente desde el continente. Esto incluye gasoil, fuel oil, gas licuado, combustible para aeronaves (JP) y acetileno para los equipos de soldadura. “El costo del combustible y de la energía en la Antártida es altísimo”, asegura Laurretta, y cita como ejemplo el caso del gasoil antártico, que debe ser desparafinado para poder soportar las bajas temperaturas, cuyo costo puede llegar a ser entre cinco y diez veces superior al valor que encontramos en el surtidor en Buenos Aires.

En cuanto a la cantidad de energía utilizada, cada metro cúbico de hidrógeno requiere para su producción entre 4,5 y 5 kilovatios/hora (kW/h). A su vez, ese metro cúbico es capaz de entregar posteriormente un máximo de 3,3 kW/h. “Si producimos energía eléctrica con una celda de combustible, recuperamos 2,5 kW/h, mientras que si lo quemamos en un motor de combustión interna, con un rendimiento todavía más bajo, podríamos recuperar 1 kW/h”, detalla Laurretta, quien aclara que aunque no suene muy atractivo, ese rendimiento es mucho más eficiente que el de un automóvil último modelo, que utiliza menos del 5% de la energía que tiene almacenada en su tanque.

“El sistema presenta una arquitectura muy sólida; sin embargo, es experimental ya que las condiciones en la Antártida son extremas desde el punto de vista climático”, asegura José Luis Aprea.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> ARGENTINA EOLICA. 2010. EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO EN LA ANTÁRTIDA. Recuperado el 21 de agosto de 2015, de:

### 3.6.8 Estaciones de hidrógeno

Las tres compañías automovilísticas han acordado colaborar conjuntamente para ayudar a acelerar el desarrollo de una infraestructura de estaciones de hidrógeno para vehículos de pila de combustible —Fuel Cell Vehicles (FCV)—. Las medidas concretas que adoptarán los tres fabricantes se determinarán más adelante.

Toyota señala en un comunicado que “para que los vehículos a base de hidrógeno ganen popularidad, no solo es importante lanzar productos atractivos, sino que también es preciso desarrollar una infraestructura de estaciones de hidrógeno. Actualmente, las empresas de infraestructuras están haciendo todo lo posible por crearla, pero les es muy difícil instalar y explotar las estaciones de hidrógeno mientras los FCV no se generalicen en las carreteras”.

Japón es el país más adelantado en esta carrera. En junio de 2014 formuló un Plan Estratégico para el Hidrógeno y las Pilas de Combustible, y ahora el gobierno nipón ha puesto el acento en la importancia de desarrollar una infraestructura de estaciones de hidrógeno lo antes posible, a fin de popularizar los FCV. Toyota afirma que la Administración japonesa no solo está respaldando la instalación de estaciones de hidrógeno a través de subvenciones, sino que también ha decidido aprobar una serie de políticas adicionales destinadas a promover actividades que generen una nueva demanda de FCV, tales como subvencionar parcialmente el coste de explotación de las estaciones de hidrógeno.

Toyota, Nissan y Honda quieren garantizar que no resulte complicado repostar. Por ello, han reconocido conjuntamente la necesidad de que los fabricantes de automóviles se involucren, junto con la administración y las empresas de infraestructuras, en el desarrollo de estas estaciones, con vistas a alcanzar los objetivos del mencionado plan, fuente de las subvenciones de apoyo del gobierno.

Los tres fabricantes estudiarán minuciosamente las distintas iniciativas a poner en marcha, como por ejemplo cubrir una parte de los gastos asociados a la explotación de las estaciones de hidrógeno.<sup>22</sup>

---

[http://www.argentinaeolica.org.ar/portal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1015&Itemid=3](http://www.argentinaeolica.org.ar/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=1015&Itemid=3)

<sup>22</sup> Energías Renovables. 2015. TOYOTA, NISSAN, HONDA Y LAS ESTACIONES DE HIDRÓGENO. Recuperado el 21 de agosto de 2015 de: <http://www.energias-renovables.com/articulo/toyota-nissan-honda-y-las-estaciones-de-20150213>

## 4. LA MECATRÓNICA Y EL HIDRÓGENO

Siendo el Hidrógeno un vector energético, este necesita de otras fuentes de energía para ser producido, y es por su misma naturaleza que cada proceso de producción difiere significativamente de uno al otro; pero estos tienen algo en común: La Mecatrónica.

Los procesos que utilizan fuentes térmicas como la termólisis, la reducción del metano con vapor (SMR), procesos biológicos, la destilación, entre otros, son procesos que requieren de unas especificaciones técnicas y tecnológicas con altos estándares de calidad, control, y monitoreo constante, para asegurar que la producción se haga de la manera más eficiente posible.

### 4.1 PRODUCCIÓN

#### 4.1.1 Procesos térmicos

Utilizan como principal variable de control y monitorización la temperatura, ya que es gracias a esta que se realiza la descomposición de los elementos químicos dentro de las moléculas, sean de metano, gas natural, o derivados del petróleo, para así liberar el hidrógeno que se encuentra dentro de las mismas.

Estos tipos de procesos se realizan a temperaturas entre los 800°C y los 1500°C, y dependiendo del proceso, las moléculas se deben llevar de una temperatura a otra entre las diferentes etapas. Es de vital importancia que las etapas del proceso se controlen de manera muy precisa, ya que de esto dependen las huellas de carbono que puedan quedar como impurezas en el hidrógeno.

Los procesos térmicos son relativamente sencillos de controlar, ya que no intervienen tantas variables, y los deltas de tolerancia permiten trabajar con algunos cuantos grados de diferencia, siempre y cuando se controlen adecuadamente las etapas de cada proceso y la duración de las mismas.

En los procesos térmicos es donde la relación costo-beneficio es menor, es por esto que son los procesos más ampliamente usados, ya que además de generar hidrógeno, también se generan otros subproductos que son aprovechados.

El problema de este tipo de procesos es que utilizan combustibles fósiles para realizar los procesos, lo cual no apunta hacia la economía verde para la cual esta idealizada en la “economía del Hidrógeno”.

#### 4.1.2 Procesos eléctricos

Los procesos eléctricos son aquellos que se valen del paso de una corriente eléctrica por el agua para que esta se vaya dividiendo en los átomos de Hidrógeno y Oxígeno.

En los procesos eléctricos es necesario controlar la intensidad de corriente que fluirá por el medio, ya que de esta depende con que velocidad se realice la división de las moléculas, como a su vez incrementa el desgaste y la deposición en los electrodos de elementos contaminantes presentes en el medio.

Los procesos eléctricos tienen un alto grado de pureza en cuanto a la calidad del hidrógeno que entregan, pero su costo de producción es más elevado, ya que por lo general, se debe utilizar fuentes de energía como combustibles fósiles, fuentes geotérmicas o en algunos casos energía eólica y solar para producirla.

Para controlar este proceso hace falta de instrumental adecuado para medir la corriente que pasa por los electrodos (amperímetro), sensores de oxígeno para monitorear la cantidad de oxígeno que está saliendo del proceso y por medio de la relación estequiométrica, determinar la cantidad de hidrógeno que se está liberando.

#### 4.1.3 Procesos foto-biológicos

Los procesos foto-biológicos son aquellos que utilizan microorganismos para realizar la función de descomponer las moléculas, principalmente de hidrocarburos, y liberar el hidrógeno atrapado en ellas.

Estos procesos tienden a tener un grado de dificultad mayor al momento de realizar el control sobre los mismos, y la monitorización de sus variables tiene que ser constante y en tiempo real, puesto que un cambio abrupto en la presión, temperatura, PH, intensidad lumínica, entre otras; puede llevar a una disminución significativa de la población de los microorganismos encargados del proceso y frenar así la producción de Hidrógeno.

Para este tipo de procesos se debe implementar un control adaptativo o de redes neuronales, para que ajuste adecuadamente los parámetros dependiendo de todas las condiciones y combinaciones que se puedan presentar durante el proceso.

## 4.2 ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCIÓN Y USO DEL HIDRÓGENO

Los procesos de almacenamiento, distribución y uso del Hidrógeno deben cumplir con las normas de seguridad establecidas, para garantizar que su manipulación y utilización no pondrá en riesgo la integridad de personas, maquinaria y equipos.

Debido a la alta tasa de expansión del Hidrógeno y su alta inflamabilidad, una fuga en los sistemas de almacenamiento y distribución puede generar condiciones inseguras, al igual que causar pérdidas millonarias en hidrógeno desperdiciado.

Es por esto que los procesos de distribución, almacenamiento y uso, deben contar con sistemas que los controlen y automaticen, sistemas que integren la mecatrónica para reducir al máximo los errores e imprevistos que puedan surgir.

### 4.2.1 Almacenamiento

Para el correcto almacenamiento del hidrógeno es sumamente importante controlar y monitorear la presión y la temperatura a la que este se está envasando, principalmente para que no se sobrepase la capacidad de presión de los envases; estos envases están diseñados para soportar presiones entre 200 y 900 bar, dependiendo del diseño y los componentes utilizados en la fabricación del envase.

Para las misiones espaciales se ha estado utilizando el hidrogeno como fuente de combustible para impulsar los transbordadores y para la generación de electricidad y agua potable que se necesitan durante los viajes. Este almacenamiento se hace por lo general en estado sólido, a temperaturas criogénicas; para que esto sea posible, es necesario que la temperatura se mantenga en un rango cercano a la temperatura de ebullición del Nitrógeno (77,4°K), esto se logra utilizando compresores de gas nitrógeno y helio, los cuales por medio de un sistema de control, son llevados a la presión y temperatura requerida.

El almacenamiento en estado sólido también se puede realizar en materiales con alto índice de adsorción y absorción, ya que dependiendo de las propiedades del material, el hidrógeno se adhiere superficialmente o se integra en las redes moleculares; para la posterior liberación del hidrógeno y permitir su aprovechamiento, estos materiales sólidos se deben exponer a catalizadores o a temperaturas que lleven a la degradación y reformación del material y se libere controladamente el hidrógeno almacenado. El material más utilizado para este almacenamiento solido es el magnesio, puesto que es un elemento que se

encuentra ampliamente en la naturaleza, sus costes de producción son bajos y posee unas características que cumplen con los requerimientos del proceso.

#### 4.2.2 Distribución

Aunque el hidrógeno no cuenta con tuberías para la distribución como el gas natural o el petróleo, se tiene una red de distribución basada en los cilindros y envases en los que se almacenan, siendo las empresas las encargadas de realizar la distribución a los usuarios finales, para esto se deben contar con camiones cisternas con sistemas especializados, y en especial con sistemas electrónicos y mecánicos de seguridad, para evitar y reducir los riesgos.

#### 4.2.3 Uso

El hidrógeno se puede aprovechar de diferentes maneras en la industria: como combustible para pilas de combustible o para su uso en motores de combustión interna, y como base de otros productos como abonos, entre otros.

Las aplicaciones del hidrógeno en el sector energético y de transporte requieren que se utilice las tecnologías más avanzadas, y la integración de diferentes áreas del conocimiento para que se saque su mayor rendimiento.

Todos los procesos en los cuales el hidrógeno se vea implicado, son directa o indirectamente proceso mecatrónicos, ya que estos procesos deben contar con una fase de control, de potencia y de medición.

## **5. INTEGRACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA Y EN EL SECTOR ENERGÉTICO**

### **5.1 IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO**

Finalizando la década de los ochenta y a principios de los noventa, Colombia estaba comenzando a sentir los efectos de una infraestructura insuficiente para la generación energética, al presentarse cortes de energía eléctrica y obligar al gobierno a adelantar el horario laboral, mientras se avanzaba en inversiones en hidroeléctricas e interconexión. El expresidente Cesar Gaviria Trujillo le propuso al país un profundo “revolcón” a la economía con el fin de romper con el antiguo modelo de crecimiento orientado hacia adentro, y que no era capaz de garantizar un nivel de crecimiento que le acortara el paso a naciones desarrolladas a un buen ritmo. Los cambios fundamentales a la legislación en materia económica, establecieron nuevos pisos para la norma laboral que rige actualmente, la reforma cambiaría en su visión estimularía los movimientos de capitales con más rapidez, la creación de organismos y reformas estatales orientados a atender en diferentes sectores sus fallas –por ejemplo el PNR, el Plan Nacional de Salud, los Programas para la Juventud, los Hogares de Bienestar, la Reforma Agraria entre otros-. Este conjunto de medidas posibilitaron que Colombia se posicionara en Latinoamérica como uno de los países exportadores de energía eléctrica a través del suministro de fluido eléctrico por interconexiones transnacionales.

En el caso Colombiano el Gobierno lanzó una ambiciosa política llamada Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales (PROURE, 2010), del Ministerio de Minas y energía cuyo principal objetivo es crear mecanismos de mayor impacto e importancia que permite asegurar el abastecimiento energético, la competitividad de la economía nacional, la protección del consumidor, la protección del medio ambiente y la promoción de las fuentes energéticas no convencionales como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional de acuerdo con lo establecido en la ley.

En la Ley 1715 de 2014, “por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional”.

Con esta Ley se establece un nuevo escenario para el sector eléctrico, que favorece el uso eficiente de los recursos energéticos y la diversificación de las fuentes tradicionales de energía eléctrica. Se definen las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (Fncer), como: “aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente

sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran Fncer la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares. Otras fuentes podrán ser consideradas como Fncer según lo determine la Upme”.

Uno de los principales beneficios es la autorización para entregar en la red excedentes de energía de los Auto-generadores, quienes hasta el momento únicamente podían producir energía eléctrica para su propio consumo, y por tanto debían desaprovechar los excedentes de energía que pudieran tener. La Ley extiende esta posibilidad a todos los Auto-generadores independientemente del recurso energético que empleen en su proceso de generación, un cambio trascendental respecto a algunas de las versiones durante el trámite legislativo. Los excedentes de energía de los pequeños Auto-generadores que usen Fncer se reconocerán como créditos de energía, los cuales podrán ser negociados conforme la regulación que expida la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). La Ley incorpora una nueva clasificación de Auto-generadores: de pequeña y gran escala, aunque solo se refirió a la forma de entrega de energía de quienes sean calificadas como de pequeña escala según los criterios que fije la Unidad de Planeación Minero Energética (Upme).

Otro gran avance de la Ley 1715 es el envío de señales de precios de energía del Spot a la demanda nacional. Con esta inclusión se garantiza una real participación del usuario final de energía eléctrica en el mercado, en la medida que tendrá la oportunidad tomar decisiones de consumo según la señal de precio que observe principalmente en las horas pico. Hasta antes de la Ley, los consumidores finales no tenían acceso a esta información.

La generación distribuida también constituye una modificación importante del sector eléctrico respecto a cómo fue establecido en 1994. La nueva Ley permite que un generador cercano a un centro de consumo y conectado a un Sistema de Distribución Local (SDL) entregue energía directamente al usuario final.

El Congreso de la República aceptó las objeciones formuladas por el Presidente de la República, y aceptó no incluir el Gas Licuado de Petróleo (GLP) y el Gas de Esquisto como Fncer. Sin perjuicio de lo anterior, y dado que no fue objeto de objeción, se mantuvo la posibilidad de subsidiar la generación con GLP en zonas donde sea más eficiente este recurso en reemplazo del Diesel.

Por otra parte, los incentivos para las Fncer son:

- De carácter tributario, mediante deducciones en la declaración de renta de las inversiones relacionadas con estos fines.
- Arancelarios, a través la exención en el pago de derechos arancelarios de importación de maquinaria y equipos destinados a este tipo de generación.
- Contables, en materia de depreciación acelerada de activos.

Finalmente, la Ley dispone la creación del Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge), con el que se podrán financiar total o parcialmente programas y proyectos dirigidos al sector residencial de estratos 1, 2 y 3, tanto para soluciones de autogeneración a pequeña escala, como para la promoción de eficiencia energética y buenas prácticas.

La Upme y la CREG quedan a cargo de la expedición de la regulación aplicable a las Fncer, a los nuevos esquemas de Autogeneración, y a las señales de precio a la demanda, entre otros. La Ley concedió doce meses al Gobierno Nacional para expedir la reglamentación a su cargo.

La entrega de excedentes de los Auto-generadores, la respuesta de la demanda, la generación distribuida y los incentivos fiscales implican cambios trascendentales en el sector eléctrico actual y contribuyen a la posibilidad de diversificar la matriz energética del país.

Se espera que con la participación del sector público, privado, universidades y centros de investigaciones puedan lograr para el 2020 disminución de los impactos ambientales, el mejoramiento de la calidad de vida y el acceso a fuentes limpias y renovables para todos los ciudadanos, como ejemplo de estas políticas está el proyecto por el Sistema Nacional de Regalías el cual otorgó por \$81.000 millones para su implementación y uso en los departamentos de Vichada, Casanare, Caquetá así como una convocatoria por Colciencias para la implementación de la energía solar en la Guajira por un valor de \$1.900 millones en el 2013.

Colombia es un país privilegiado por la posición geográfica en diferentes tipos de explotación de energías alternativas y es así como estas podrían servir en un futuro no muy lejano en la producción de hidrógeno económico y principalmente no contaminante en su proceso.

## 5.2 LA HIDROELECTRICIDAD EN COLOMBIA, FAVORABLE A LA ECONOMÍA DE HIDRÓGENO

La investigación de este trabajo está fundamentada en el hecho de contar en Colombia con abundantes recursos hidráulicos, estableciendo condiciones muy favorables para una economía de  $H_2$ : se trata de energía renovable y de fácil disponibilidad en el País, con amplia distribución en la geografía nacional, buena parte en la zona andina, precisamente donde se concentra la mayor parte de la población, potencialmente consumidora del  $H_2$ .

Los recursos hidroeléctricos en el país se estiman en 96 GW, con 20 GW adicionales para pequeñas y medianas centrales. Tan sólo en seis Departamentos se han identificado un potencial de 3.6 GW, principalmente en Huila y Tolima.

La capacidad nacional de generación anual en los últimos años es aproximadamente de 13,440 MW, con un 67%, o sea, 8,994 MW de hidroelectricidad, incluidos 420 MW instalados en las zonas no interconectadas, 90 % hidroeléctricos.

Aplicando uno de los criterios principales de este estudio para la producción de  $H_2$ , de sistemas más favorables al medio ambiente, y en concordancia con últimas tendencias hacia la generación distribuida, requiriendo plantas de mediano tamaño, en este estudio se seleccionaron sólo plantas hidroeléctricas medianas a filo de agua, esto es, sin embalse. Además, actualmente estas son de mayor interés en el país por su instalación menos onerosa y más simple que las convencionales, de menor exigencia financiera, a la vez haciendo posible la atención de demandas progresivas y más localizadas, con disminución de pérdidas de transmisión y evitando el impacto ambiental de las represas. Adicionalmente, la explotación económica de este tipo de centrales puede verse también beneficiada por el almacenamiento de la energía en forma de  $H_2$ , ya que las plantas al filo de agua están más sujetas a las oscilaciones permanentes de caudal, no solamente estacionales sino también diarias, no coincidentes con variaciones de la demanda eléctrica. Esto le da una operación más firme y confiable, produciendo el  $H_2$  con electricidad en exceso, por lo que resultaría más económico.

Otro punto importante a resaltar es la oportunidad de exportar el  $H_2$ . Ante una posible demanda futura interna del  $H_2$  no muy alta en Colombia, como resultado, según criterio de los autores, de las condiciones especiales del país de climas

benignos y su baja intensidad de consumo eléctrico per cápita, se explotarían así en gran escala los abundantes recursos hidroeléctricos nacionales convirtiéndolos en  $H_2$  para mercados externos, avizorando la posible gran demanda futura internacional, con el agregado de la de agua ventajosa localización estratégica del país. Un aspecto adicional surge relacionado con el posible aprovechamiento de múltiples ríos para producir  $H_2$ , y es que Colombia se obligaría al cuidado y conservación de las cuencas hidrográficas, lo cual se traduciría en resguardo de las fuentes de agua para poblaciones y para la agricultura, adicionalmente protegiendo los recursos forestales y la biodiversidad.

### 5.2.1 Central de Amoyá

La central de Amoyá, de propiedad mayoritaria de ISAGEN S.A., fue escogida por sus características especiales, como planta prototipo para los propósitos de este estudio, según se explica más adelante. Sección: Metodología.

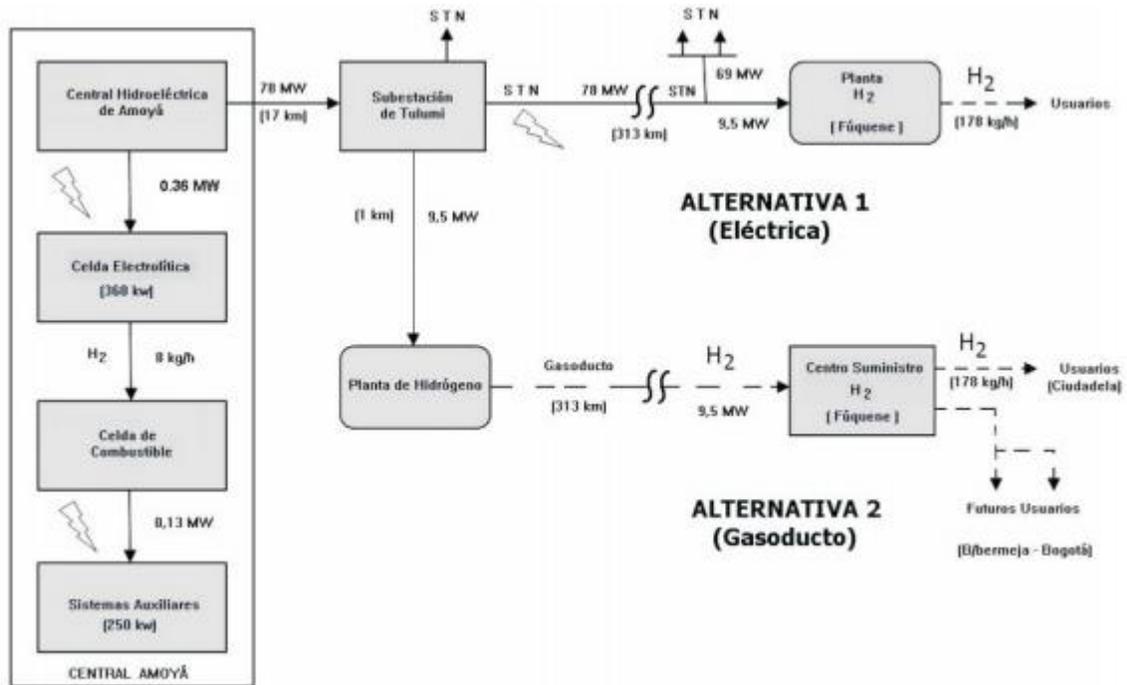
Esta planta, está situada en la parte alta del Municipio de Chaparral, sobre la vertiente oriental de la Cordillera Central, dentro del Parque Natural de las Hermosas.

Diseñada a 'filo de agua', para un salto neto de 5173 m y caudal nominal de operación de 18,4 m/s, con capacidad instalada de 78 MW, produce aproximadamente unos 510 GWh de electricidad al año. Está conectada al Sistema Nacional de Transmisión (SNT) por medio de la subestación Tuluní situada cerca de Chaparral, a 17 km de la planta (ISAGEN). Desde aquí se conectaría la planta productora de  $H_2$ , según muestra la figura 27.

Parte de la capacidad de generación de la central está dedicado a la producción de  $H_2$ . Adicionalmente, los sistemas auxiliares de la planta son alimentados parcialmente, como un sistema que a manera de demostración está instalado en el sitio, consistente en una celda de combustible acoplada a un electrolizador productor del  $H_2$  que es necesario para este propósito.

La central de Amoyá, por su diseño especial en consideración al medio ambiente, aspecto que se tuvo en cuenta como criterio en la investigación, recibió el premio Energy Globe Award (Austria) en el año 2003. Adicionalmente, el ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero que representa su funcionamiento, le permitió negociar certificados MDL (mecanismos de desarrollo limpio) por contribuir a la reducción de emisiones.

Figura 27. Esquema y balance energético del sistema de generación de  $H_2$  con hidroelectricidad de la central de Amoyá.



Fuente: CARVAJAL O, Hernán. BABATIVA, Jhon H. ALONSO, Julio. Estudio sobre producción de  $H_2$  con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. Ingeniería y Competitividad, Volumen 12, No. 1, p. 31-42 (2010).

### 5.2.2 Metodología

Inicialmente se efectuó un análisis del sistema hidroeléctrico colombiano, determinando su situación actual y desarrollo, y las características afines con el propósito de la producción de  $H_2$  en proyección hacia una economía de  $H_2$  en el futuro a mediano plazo. Se consideraron: comportamiento y crecimiento de la demanda energética, suplencia con hidroelectricidad, tamaños y tipos de plantas en funcionamiento y previstas para los próximos años, diferenciando pequeñas y medianas centrales. Se consideró conveniente para el propósito de este trabajo escoger una planta real prototipo, para lo cual se aplicaron como criterios: centrales sólo a filo de agua, nivel medio-bajo de potencia (20-100 MW), de reducido impacto ambiental, y conectividad al SNT. No contó su localización específica.

Para los cálculos, se tomó la producción de  $H_2$  establecida en un proyecto anterior realizado por el Grupo IENA (Pinzón & Segura, 2007), en la cantidad de  $178 \text{ kg } 3 H_2 / h$  ó  $1,980 \text{ Nm}^3 / h$ . Esta cifra resultó de los 2 requerimientos de electricidad de una ciudadela ficticia que se modeló en dicho proyecto, la cual constaría de 3,950 unidades habitacionales con 15,800 habitantes, con demanda eléctrica residencial de  $2.4 \text{ MW}$ , para un consumo de promedio mensual por vivienda de  $190 \text{ kWh}$ ; más un centro comercial mediano de 324 locales demandando  $239 \text{ kW}$  eléctricos, un hotel con 247 habitaciones ( $214 \text{ kW}$ ), y una clínica de 80 camas ( $462 \text{ kW}$ ). Además, se consideró abastecer la carga térmica del hotel y la clínica (para calentar agua y para la cocina y lavandería), en potencias de  $150 \text{ kW}$  y de  $100 \text{ kW}$ , respectivamente; energía que sería suministrada aprovechando el calor excedente producido en la operación de las celdas de combustible, por lo que no suma a la demanda de electricidad para producir el hidrógeno.

Seguidamente, se hizo la selección de las celdas electrolíticas según oferta comercial en el exterior (NREL), bajo los criterios de nivel de potencia y capacidad de producción, eficiencia energética y vida de la celda. Se trata de las celdas de producción del  $H_2$  requerido por la ciudadela, y otra celda electrolizadora menor para ser instalada junto con una celda de combustible dentro de la central, para suministrar  $130 \text{ kW}$  como parte de la demanda eléctrica de los sistemas auxiliares (de  $250 \text{ kW}$ ), correspondiente a  $8.1 \text{ kg/h}$  de  $H_2$  para ser producidos en el sitio.

Para el transporte de la energía a la ciudadela, se consideraron dos opciones transportar el  $H_2$  por gasoducto desde la central hasta el punto de suministro a la ciudadela, cerca de Bogotá (en Fúquene, sitio determinado en el trabajo de Segura & Pinzón), o, como alternativa, transmitir por el SNT la electricidad producida en la central hasta el punto donde fue instalada la planta para producir  $H_2$  en cercanía a la ciudadela modelo. En esta segunda opción, bastaría tomar en compra de la red la electricidad equivalente para producir la misma cantidad de  $H_2$ ; por tanto, no habiendo necesidad de construir una línea, por lo que tampoco hubo diseño de ésta. Se anota como positivo en esta segunda opción que la regulación nacional de comercialización de electricidad permite negociar la compra de electricidad directamente con el generador, independiente del sitio donde se tome la electricidad de la red nacional.

Para el gasoducto se estimó una longitud de  $313 \text{ km}$  (Babativa & Alonso), desde la subestación de Tuluní, cerca de Chaparral, a  $18 \text{ km}$  de la central de Amoyá, hasta Fúquene, a  $116 \text{ km}$  de la Capital. Para el trazado, el único criterio que se tuvo en cuenta fue la facilidad de comunicación y de transporte de tubería y materiales

para la construcción, por lo que se escogió un recorrido prácticamente paralelo a la carretera principal. El diseño se hizo en base a cálculos hidráulicos tradicionales para tuberías y sus accesorios (Babativa & Alonso, 2008, Anexo J), sin incluir cálculos mecánicos ni requerimientos de la propia instalación, tampoco considerando estaciones de bombeo.

Para el estudio del impacto ambiental del transporte de energía, se aplicó el método de la Matriz de Leopold, sirviéndose del modelo aplicado por ISAGEN para la central de Amoyá. Se parte desde el análisis de los componentes del proyecto, su identificación, clasificación y jerarquización, determinando los impactos con diferentes grados de afectación según tres grandes componentes: geoambiental, biótico y socioeconómico. En la matriz de Leopold, las columnas representan las acciones que tienen efectos sobre el ambiente, y las filas a los factores o características del medio. Donde se cruzan, se hace una valoración tanto de la magnitud como de la importancia del factor ambiental dentro del proyecto, con lo cual, se calculan los promedios ponderados que indicarán cuán beneficiosa o dañina es la acción. En el estudio no se incluyeron planes de manejo ambiental ni sus implicaciones económicas.

Luego, se estimaron los costos para producir y transportar el  $H_2$ , incluyendo las dos celdas electrolizadoras, además de la celda combustible para la central, así como el costo de instalación, operación y mantenimiento del gasoducto, en comparación con la alternativa del transporte de la electricidad hasta el sitio cercano al usuario donde se produciría el  $H_2$ .

### 5.3 VENTAJAS

A corto plazo será necesario que esta tecnología sea eficiente y económicamente viable y los esfuerzos en este sentido se centran en materiales que absorban hidrógeno pues en la práctica su densidad volumétrica es mayor que la del hidrógeno líquido. Uno de los hidruros metálicos promisorios es el hidruro de magnesio  $MgH_2$  que presenta una alta densidad de energía  $9 MJ/kg$  de  $Mg$  además de su bajo costo y abundancia (Martínez et al, 2012). La ventaja radica en que los hidruros metálicos son completamente seguros presentando una alta densidad de energía el principal problema son las altas temperaturas para absorción y desorción de hidrógeno así como su lenta cinética en la reacción.

En cuanto a las investigaciones en estos sistemas es muy poco lo que se hace, se conocen trabajos de pregrado y maestrías en la UIS y la Universidad Nacional sin embargo el apoyo por los actores gubernamentales es irrelevante como para

iniciar un trabajo a gran escala, contradictoriamente se cuenta con el recurso humano altamente capacitado para emprender esta tarea.

#### 5.4 PRESENTE Y FUTURO

Actualmente en Colombia dos empresas extranjeras una de origen español Ecowill Engineering Group y la francesa Mcphy energy se radicaron en Bogotá, cuentan con diferentes patentes en los procesos de extracción y almacenamiento de hidrógeno con fines energéticos. Estas empresas afirman lo siguiente “La tecnología McPhy se está desarrollando en Europa con filiales en Alemania e Italia. Nuestro deseo de implementación en Colombia con la colaboración de Ecowill Engineering Group responde a nuestros objetivos de expansión por América del Sur.

Colombia va a jugar un papel fundamental en la construcción de una futura economía del hidrógeno en esta zona. Colombia constituye para McPhy un mercado con un alto potencial de desarrollo de las energías renovables” (DIC). Estas empresas afirman que uniendo la experiencia que cuenta la empresa española en producción de energía con fuentes renovables como solar, eólica y plantas de biodiesel unida con la experiencia de la compañía francesa de crear y almacenar energía para difundirla por Centroamérica y sur américa.

La tecnología creada en el laboratorio del CNRS en Grenoble Francia almacena la energía en forma de hidrógeno solido por medio de hidruros de magnesio y se convierte en electricidad por medio de una pila de combustible o de una turbina de gas que funciona con hidrógeno. Desde ese punto de vista el gran reto es dar a conocer y demostrar que este tipo de opción energética es viable en un futuro no muy lejano.

Solo necesitamos voluntad política para que se destinen los recursos económicos porque el capital humano en cada una de nuestras universidades existe, además la zona geográfica en la que se encuentra favorecida Colombia la hace privilegiada para que desde nuestro país sea un foco de desarrollo así como un portador de energía verde sin contar con la excelente opción de la creación de nuevas empresas en este sector.<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> Estudio de factibilidad de la Economía del Hidrógeno en Colombia. Alejandro Martínez, Daniela Bellon, Diana Barreneche, Diana Latorre, Alex Porras, Luis Rincón. Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2013

## 6. CONCLUSIONES

Se pudo obtener una visión clara acerca del hidrógeno; sus posibles formas de obtención, de almacenamiento, y su enorme potencial a ser sucesor de las fuentes de energía convencionales. En este contexto, existe una gran factibilidad al desarrollar la tecnología del hidrógeno como una alternativa altamente ecológica y de mayor eficiencia en comparación con los combustibles fósiles y se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Debido a la gran dependencia de la sociedad actual al petróleo y a otros combustibles fósiles para todo tipo de productos y al consumo a gran escala de estos combustibles principalmente para transporte y generación de electricidad, se han producido graves alteraciones en el medio ambiente e incluso en la economía mundial. A causa de estos efectos sobre el medio ambiente y el cada vez más cercano pico de agotamiento del petróleo se hace necesario que tanto científicos como ingenieros investiguen nuevas fuentes de energías renovables y alternativas. Una de ellas es el hidrógeno que, aunque aún está en fase de desarrollo, parece ser uno de los vectores energéticos del futuro. Entre sus principales ventajas está su gran abundancia en el planeta, y su uso que evitaría o reduciría en gran medida los monopolios de las empresas petrolíferas.
- Las ventajas principales del uso del hidrógeno es su ausencia de emisiones contaminantes. El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, es solo un vector para su transporte y utilización. Como vector solamente puede competir con la electricidad por su más fácil almacenamiento ya que requiere de esta para ser producido. Y con el transporte solamente puede competir con los hidrocarburos en cuanto a su no emisión de gases de efecto invernadero y su mayor cantidad de energía en joules por kilogramo.
- Todos los procesos involucrados en la producción, almacenamiento, transporte, distribución y aplicaciones del hidrógeno como vector energético, son procesos de carácter netamente mecatrónico, puesto que requieren medición y control sobre las variables que intervienen y son propias de cada proceso. Lo que convierte a la ingeniería en mecatrónica y otras ingenierías afines como lo son la ingeniería de materiales, la ingeniería física, la ingeniería química y la ingeniería en electricidad; como los pilares principales para el desarrollo e implementación, por medio del trabajo conjunto, de la tecnología necesaria para el aprovechamiento de este recurso.

- Gracias a los recursos hídricos y la geografía de Colombia, se encuentra favorable que la producción a gran escala de gas hidrógeno sea viable, posicionándolo como uno de los muchos otros productos de venta y exportación hacia otros países; esto, siempre y cuando se realice una buena inversión en tema de tecnología y sistemas de punta, que permitan que su obtención, manejo, almacenamiento y distribución cumplan con todos los estándares de seguridad y calidad necesarios.
- El proceso con mayor viabilidad para la generación de hidrógeno en Colombia es el de electrolisis del agua; ya que el país cuenta con el recurso hídrico para generar el hidrógeno, y la electricidad necesaria para realizar este proceso se obtendría a partir de plantas hidroeléctricas, este proceso se tornaría amigable con el medio ambiente, y su producción no sería tan costosa comparadas con el precio de otros países más desarrollados que utilizan fuentes de energía a partir de combustibles fósiles o plantas de energía nuclear.

## 7. RECOMENDACIONES

Ya que la economía del Hidrogeno y los procesos relacionados con obtención y uso del hidrogeno todavía se encuentran en fase de desarrollo, se encuentra necesario seguir las siguientes recomendaciones:

- Verificar los avances tecnológicos e investigaciones que se han desarrollado después de la presentación de este documento.
- Analizar la situación energética en cuanto al consumo y fuentes de energía, a nivel regional, nacional y mundial, y reajustar los parámetros de oferta, demanda y costos de la producción del hidrogeno.
- Investigar sobre los nuevos avances e innovaciones que el sector del transporte y las diferentes marcas de automóviles estén planeando a mediano y largo plazo, como apoyo a los protocolos y tratados ambientales existentes.
- Proponer y apoyar las políticas y leyes que exalten el uso de fuentes de energía alternativas y del uso de combustibles no orgánicos, que favorezcan al medio ambiente y a su preservación.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Hydrogen Futures: Toward a sustainable energy system. Seth Dunn. Worldwatch Institute. Washington D.C 2001.
- La economía del Hidrógeno: La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la Tierra. Jeremy Rifkin. Ed. Paidós. Barcelona 2002.
- “El hidrógeno, combustible del futuro.” – Luis Gutierrez Jodra. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 2005.
- Introducción a la refinación del petróleo: su historia, la tecnología y su desarrollo, los productos y sus mercados, combustibles alternativos, su economía. - René A. Dubois. -Ed.Eudeba. Buenos Aires 2006.
- “El hidrógeno como vector energético” - José Ignacio Linares Hurtado, Beatriz Yolanda Moratilla Soria. Anales de Mecánica y electricidad 2007.
- El Hidrógeno, Fundamento de un futuro equilibrado. Mario Aguer Hortal. Ángel L. Miranda Barreras. Ed. Díaz de Santos. Madrid 2007.
- “Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production.” – Hoycheng Zhang, Guoxing Lin, Jincan Chen. International Journal of hydrogen energy. 2010.
- “Hydrogen generation by water electrolysis using carbon nanotube anode.” – P.K. Dubey, A.S.K Sinha, S. Talapatra, N. Koratkar, P. M Ajayan, O.N. Srivastava. International Journal of Hydrogen Energy. 2010.
- “Photovoltaic- assisted alkaline water electrolysis: Basic principles.” – A. Djafour, M. Matoug, H. Bouras, B. Bouchekima, M.S. Aida, B. Azoui. International Journal of hydrogen energy. 2010.
- Actas de la Reunión de París (Francia) sobre Producción Nuclear de Hidrógeno, 2-3 octubre 2000, NEA-OCDE. París (2001).

- Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambientes: [www.asades.org.ar](http://www.asades.org.ar)
- "Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. Module 1: Hydrogen Properties." U.S. DOE. 2001
- J.O. Bockris, The origin of ideas on a Hydrogen Economy and its solution to the decay of the environment, Int J Hydrogen Energy. 27 (2002) 731-740.
- Los combustibles fósiles. <http://www.grupopaleo.com.ar/paleoargentina/combustibles.html> [consulta 17-05-2015]
- Estudio sobre producción de  $H_2$  con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia <http://hdl.handle.net/10893/1653> [consulta 17-05-2015]
- El petróleo. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/badillo\\_c\\_a/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo2.pdf) [consulta 17-03-2015]
- Hydrogen, properties, uses and applications. <http://www.uigi.com/hydrogen.html> [consulta 18-03-2015]
- Babativa, J. H. & Alonso, J. A. (2008). Evaluación técnica del proceso de producción de hidrógeno a partir de la hidroelectricidad, con visión a una economía de hidrógeno en Colombia. Proyecto de coinvestigación, en Monografía, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- Carvajal-Osorio, H. (2008). Condiciones y oportunidades en Colombia para una economía de hidrógeno. En Memorias del Congreso Internacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía, CIUREE2008, nov. 13-15, Medellín, Colombia.
- Ordoñez, S. & Iván, D. (2001). Diseño básico de un reformador de gas natural para el suministro de hidrógeno en celdas de combustible.

Monografía de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

- Guerrero, J. C. (1995). Evaluación económica ambiental de aplicación de tecnologías basadas en hidrógeno como respuesta al problema efecto el Niño en la energía colombiana. Monografía Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- ISAGEN. (2007). Energía productiva. Proyectos de generación - Proyecto hidroeléctrico del Río Amoyá Sur del Tolima. Medellín Colombia. <<http://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoInproyectoRioAmoya> >.
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). (2008). Plan de expansión de referencia 2008 2022, Bogotá, Colombia. [Disponible en línea] <[http://www.upme.gov.co/Docs/Plan\\_Exp\\_Refer\\_2008\\_2022.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Exp_Refer_2008_2022.pdf) >
- KÖRNER, Alexander. (2015). Technology Roadmaps: Hydrogen and Fuel Cells. International Energy Agency. Paris, Francia.[Disponible en línea] <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>>
- MUHICH, Christopher. (2013). Efficient Generation of H<sub>2</sub> by Splitting Water with an Isothermal Redox Cycle. Department of Chemical and Biological Engineering. University of Colorado. Reportaje Revista Science Vol. 341 no. 6145. Páginas 540-542. [Disponible en Línea] <<https://www.sciencemag.org/content/341/6145/540.short>>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention of Climate Change). (1998). Kyoto Protocol of the United Nations Framework Convention of Climate Change. Kyoto, Japón. [Disponible en Línea] <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>>
- TEWARI, Pradip. (2014). International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications. Publicación seriada. New Deli, India.
- OEERE (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy). (2014). Hydrogen Production. Virginia. United States of America. [Disponible en Línea]< <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>>

- TRYGVE, R. and HAGEN, Elisabet. (2006). Hydrogen Production and Storage. International Energy Agency. Paris, Francia.[Disponible en línea]  
<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydrogen.pdf>>
- LIPMAN, Timothy. Phd. (2011). An Overview of Hydrogen Production and Storage Systems with Renewable Hydrogen Case Studies. Clean Energy States Alliance. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. [Disponible en línea]  
<<http://www.cesa.org/assets/2011-Files/Hydrogen-and-Fuel-Cells/CESA-Lipman-H2-prod-storage-050311.pdf>>
- REFINERIA BALBOA, Grupo Alonso Gallardo. (2009). Proyecto para la instalación de una Refinería de Petróleo en Extremadura. Memoria de Proyecto. Extremadura. España. [Disponible en Línea]  
<<http://www.grupoag.es/refineriabalboa/medioambiente/pdf/larefineria.pdf>>
- GUTIERREZ, Miguel. ROJAS, Néstor. MORENO, Juan C. (2003). Evaluación de Electro-catalizadores para la Producción de Hidrógeno a partir de Electrólisis de Agua. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. [Disponible en Línea]  
<[http://www.ing.unal.edu.co/grupos/calidad\\_aire/doc/eventos/xsmh187.pdf](http://www.ing.unal.edu.co/grupos/calidad_aire/doc/eventos/xsmh187.pdf)>
- ARIEMA ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE. (2013). Contenedores de Almacenamiento de Hidrógeno Basados en Hidruros Metálicos de tipo LaNi<sub>5</sub>. Madrid. España. [Disponible en Línea]  
<<http://www.ariema.com/productos/Catalogo%20Labtech%20general.pdf>>
- ARES, José R. (2010). Nuevos Métodos de Almacenamiento de Hidrógeno para su Uso en Vehículos de Transporte. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. España.