

**PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNO EN  
LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS INTERNACIONALES Y NACIONALES**

**NATALIA GARCÍA ARENAS**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA  
SANTAFÉ DE BOGOTÁ. DC  
2003

**PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNO EN  
LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS INTERNACIONALES Y NACIONALES**

**NATALIA GARCÍA ARENAS**

Tesis para optar al título de Ingeniera Eléctrico

Asesor

**ANGELA CADENA Ph.D.**

Profesora titular

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

SANTAFÉ DE BOGOTÁ. DC

2003

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi gratitud:

A Ángela Cadena. Ingeniera eléctrica, Phd. Asesora de grado, por su valiosa guía.

A los familiares que me apoyaron pero en especial a mi mamá, por su respaldo.

## CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| 1. INTRODUCCIÓN                              | 9    |
| 2. HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE                | 12   |
| 2.1 PRODUCCIÓN                               | 12   |
| 2.1.1 Reformado por medio de vapor.          | 12   |
| 2.1.2 Electrólisis                           | 15   |
| 2.1.3 Producción biotecnológica de hidrógeno | 16   |
| 2.1.4 Fotoproducción de hidrógeno            | 18   |
| 2.2 ALMACENAMIENTO                           | 21   |
| 2.2.1 Hidrógeno gaseoso                      | 21   |
| 2.2.2 Hidrógeno líquido                      | 22   |
| 2.2.3 Hidruros de metal                      | 22   |
| 2.2.4 Adsorción por medio de carbón.         | 23   |
| 2.2.5 Microesferas de cristal                | 23   |
| 2.3 DISTRIBUCIÓN                             | 24   |
| 2.4 USOS FINALES DEL HIDRÓGENO               | 24   |
| 2.4.1 Combustión                             | 25   |
| 2.4.2 Celdas de combustible.                 | 26   |
| 2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS                   | 28   |
| 2.5.1. Ventajas                              | 28   |
| 2.5.2. Desventajas                           | 30   |
| 3. PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO EN EL MUNDO    | 31   |
| 3.1 ESCENARIOS ENERGÉTICOS                   | 31   |
| 3.2 CERTIDUMBRES                             | 32   |
| 3.3 INCERTIDUMBRES                           | 33   |
| 3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS            | 35   |

|  |    |
|--|----|
| 3.4.1 Escenario A  | 35 |
| 3.4.2 Escenario B  | 36 |
| 3.4.3 Escenario C  | 36 |
| 3.5 ESCENARIO PARA EL HIDRÓGENO  | 41 |
| 4. PANORAMAS ENERGÉTICOS PARA COLOMBIA                                     | 44 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICA<br>COLOMBIANA ACTUAL | 44 |
| 4.1.1 Gas Natural  | 45 |
| 4.1.2 carbón   | 46 |
| 4.1.3 Energía eléctrica  | 47 |
| 4.1.4 Petróleo y derivados   | 48 |
| 4.1.5 GLP  | 50 |
| 4.1.6 Energías renovables  | 50 |
| 4.2 ESCENARIO PARA EL 2020   | 51 |
| 4.3. COLOMBIA DEL 2020 E N ADELANTE  | 57 |
| 4.4 PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA                                 | 57 |
| 5. CONCLUSIONES  | 59 |
| BIBLIOGRAFIA   | 62 |
| ANEXOS   | 64 |
| GLOSARIO   | 67 |

## LISTA DE TABLAS

|  | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Características de la reacción de reformación, 1º etapa.  | 13   |
| Tabla 2. Características de la reacción de reformación, 2º etapa.  | 14   |
| Tabla 3. Métodos de producción del hidrógeno   | 21   |
| Tabla 4. Métodos de almacenamiento del hidrógeno   | 23   |
| Tabla 5. Métodos de distribución del hidrógeno   | 24   |
| Tabla 6. Caracterización de los escenarios   | 38   |
| Tabla 7. Caracterización de los escenarios con relación a los ítems<br>para el logro de un desarrollo sostenible | 41   |
| Tabla 8. Propiedades del hidrógeno   | 65   |
| Tabla 9. Isótopos del Hidrógeno  | 66   |

**LISTA DE FIGURAS**

|  | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de deformación por medio de vapor              | 15   |
| Figura 2. Esquema de un electrolizador.  | 16   |
| Figura 3. Distribución del energético final según el estado en que se usó              | 33   |
| Figura 4. Requerimientos globales de energía primaria en los tres escenarios           | 40   |
| Figura 5. Incursión de las celdas de hidrógeno en la generación eléctrica              | 43   |
| Figura 6. Porcentaje de participación de los energéticos en el consumo colombiano 1999 | 45   |
| Figura 7. Reservas de Gas Natural  | 46   |
| Figura 8. Consumo de gas natural 1996  | 46   |
| Figura 9. Consumo de carbón por sectores 1996  | 47   |
| Figura 10 Consumo de energía eléctrica por sectores 1996                               | 48   |
| Figura 11. Producción nacional de combustible 2001                                     | 50   |
| Figura 12. Crecimiento del consumo de energía y del PIB 1975-1996                      | 52   |
| Figura 13. Consumo final de energía esperado para el 2010 en Colombia                  | 53   |

## RESUMEN

En este artículo se pretende dar un panorama de la situación energética actual y explorar las perspectivas que tendría un combustible como el hidrógeno de participar en el abastecimiento de energía en el futuro tanto a nivel internacional como nacional. Se revisa el estado de desarrollo y las posibilidades tecnológicas de producción, almacenamiento y distribución y las aplicaciones del hidrógeno. Mediante la técnica de escenarios, se discuten las trayectorias más probables de evolución de los sistemas energéticos, entre las cuales se pueden mencionar el sostenido aumento de la demanda, concentrado en una alta proporción en los países en desarrollo y atendido progresivamente con fuentes más limpias y mediante tecnologías más eficientes; la continuidad de la tendencia hacia la disminución de la intensidad energética, gracias a las innovaciones tecnológicas logradas en aras de una mayor competitividad económica y una reducción de la contaminación ambiental; la importancia creciente de las preocupaciones por las sostenibilidad del desarrollo que buscan un adecuado uso de los recursos naturales; y la considerable inercia del sector que obliga a que el cambio hacia sistemas energéticos más productivos y con menores impactos ambientales requiera de continuadas inversiones en I&D y proyectos de demostración. En este contexto, se espera que nuevas fuentes como el hidrógeno y nuevas tecnologías con las celdas de combustible desempeñen un importante papel en el abastecimiento de necesidades energéticas en el largo plazo y produzcan cambios substanciales en el perfil tecnológico, ambiental y organizacional del sistema energético global al migrar estos hacia sistemas más distribuidos.



## 1. INTRODUCCIÓN

El suministro de energía en todas sus formas ha sido y continuará siendo importante para garantizar la actividad económica y las condiciones de desarrollo de la sociedad. Aunque se espera que continúe la tendencia hacia una disminución de la intensidad energética, gracias a las innovaciones tecnológicas logradas en aras de una mayor competitividad económica, el consumo total de energía seguirá aumentando en el futuro cercano; en los países desarrollados como consecuencia de nuevas posibilidades de consumo de bienes y servicios y en los países en desarrollo como resultado de las crecientes tasas de crecimiento económico y de las aun bajas tasas de consumo per capita y por unidad de valor agregado.

De acuerdo con diferentes estimaciones, el suministro de energía deberá por lo menos duplicarse en el período 1990-2050, no obstante a las mejoras previstas en la utilización de la energía, hacen esperar una reducción de un 20% en el 2020 y un 35% en el 2050 de la cantidad de energía requerida para producir un dólar de valor agregado a nivel mundial<sup>1</sup>.

Este incremento del consumo será atendido progresivamente con fuentes más limpias y mediante tecnologías más eficientes debido a la importancia creciente de las preocupaciones por la sostenibilidad<sup>2</sup> del desarrollo que buscan un adecuado uso de los recursos naturales y una reducción de los niveles de contaminación. Fuentes como el hidrógeno y tecnologías como las celdas de combustible jugarán un papel importante en el abastecimiento de las necesidades energéticas en el largo plazo y podrán producir cambios substanciales en el perfil tecnológico, ambiental y organizacional del sistema energético global. Se puede afirmar que de una economía de combustibles

---

<sup>1</sup> Ver L. Barreto et al. [1], p 3.

<sup>2</sup> La Cumbre de Río definió el desarrollo sostenible como "aquél que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las generaciones futuras en la satisfacción de sus propias necesidades" [2]

fósiles se pasará a una economía del hidrógeno, con el gas natural y la biomasa como los energéticos más importantes de esta transición.

Este documento está organizado de la siguiente manera: Para comenzar se presentan las diferentes alternativas de producción del hidrógeno, las tecnologías de almacenamiento y distribución de este. Es de resaltar la importancia que tendría el manejo y producción de los biocombustibles para la obtención de hidrógeno a partir de la gasificación de la biomasa. A continuación se describen los principales escenarios en los cuales se pueden desenvolver los sistemas energéticos, a partir de diferentes ejercicios llevados a cabo a nivel global, sectorial o empresarial. Como certidumbres se tienen el incremento sostenido de la demanda con mayores tasas en los países en desarrollo, continuidad en las mejoras de las intensidades energéticas y mayores preocupaciones ambientales. Las incertidumbres radican en las tasas de crecimiento de las demandas de energía como resultado de las tasas de crecimiento de la población y de la actividad económica, de los niveles o metas de reducción de la contaminación y de la velocidad del cambio tecnológico.

En estos escenarios se analiza el rol que podrá jugar un combustible como el hidrógeno. Se puede observar que la participación del hidrógeno en los sistemas energéticos dependen del gasto que se haga en investigación, desarrollo, demostración y difusión de las tecnologías de producción, almacenamiento, conversión, transporte y uso final, de tal manera que se permita a estas tecnologías desplazarse a lo largo de sus curvas de aprendizaje y así contribuir a la transición hacia sistemas más eficientes, limpios y flexibles<sup>3</sup>.

Para finalizar, se analizan las perspectivas del hidrógeno en el contexto energético colombiano. Aunque el país cuenta con gran diversidad de recursos agotables y renovables, los consumos más dinámicos se concentran en los sectores transporte e industrial, en donde la participación de los combustibles fósiles, principalmente del petróleo y sus derivados, es preponderante. Es de

---

<sup>3</sup> Ver L. Barreto et al., [1], [3], [4].

esperarse entonces que la búsqueda de nuevas opciones de abastecimiento será también una preocupación nacional. La condición agrícola del país y la incorporación de alcoholes a la gasolina y posiblemente de biodiesel al diesel convencional, posibilitan que los procesos de biorefinación, puedan convertirse en fases importantes para avanzar hacia la obtención del hidrógeno a partir de la gasificación de la biomasa. Adicionalmente, las reservas de gas natural, carbón y de fuentes hídricas con buenas condiciones de renovación bajo un adecuado manejo, nos colocan en una posición importante para la producción de esta fuente. Es igualmente importante examinar la participación de las celdas de combustibles y su incidencia en la configuración de sistemas distribuidos de energía.

## 2. HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

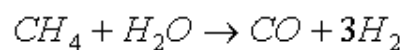
Hay dos maneras diferentes en las que el hidrógeno puede ser usado como un combustible, la primera, como cualquier otro combustible, por combustión como el gas natural. La segunda manera es por medio de celdas de combustible. Una celda de combustible es un dispositivo que produce electricidad por reacción química.

Lo que se debe tener en cuenta, es que el hidrógeno no es en sí una fuente energética, sino simplemente un medio. No genera energía, sino que la transporta.

### 2.1 PRODUCCIÓN [5] [6]

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y es muy común en la tierra, pero sólo se encuentra en la naturaleza en forma compuesta, por lo tanto debe producirse primero a través del uso de energía.

**2.1.1 Reformado por medio de vapor.** Este es el método más económico y común. Este procedimiento comprende 2 etapas. En la primera, una mezcla estequiométrica de hidrocarburos/agua es sometida a altas temperaturas en un reactor, obteniéndose en el caso que se utilice CH<sub>4</sub>, Metano, (gas natural) los productos H<sub>2</sub> y CO, de acuerdo a la siguiente reacción:

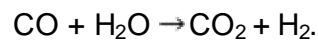


En la tabla 1 se presentan las características y las condiciones en que se lleva a cabo la reacción, de la primera etapa.

**Tabla 1. Características de la reacción de reformación, 1º etapa.<sup>4</sup>**

| Ítem        | Característica |
|-------------|----------------|
| Reacción    | Endotérmica    |
| Reactor     | Multitubular   |
| Fase        | Gas            |
| Catalizador | Níquel         |
| Temperatura | 790 °C         |
| Presión     | 13 atm         |

La segunda etapa comprende la transformación del CO y agua en CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, en un reactor tubular (shift reactor), de acuerdo a la siguiente reacción:



En la tabla 2 se presentan las características y las condiciones en que se lleva a cabo la reacción, de la segunda etapa.

---

<sup>4</sup> Fuente: Rase, Chemical Reactor Design for Process Plants, 1977

**Tabla 2. Características de la reacción de reformación, 2º etapa.<sup>5</sup>**

| Ítem        | Característica                       |
|-------------|--------------------------------------|
| Reacción    | Exotérmica                           |
| Reactor     | Tubular                              |
| Fase        | Gas                                  |
| Catalizador | Cu-Zn/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Temperatura | 320-220 °C                           |
| Presión     | 26 atm                               |

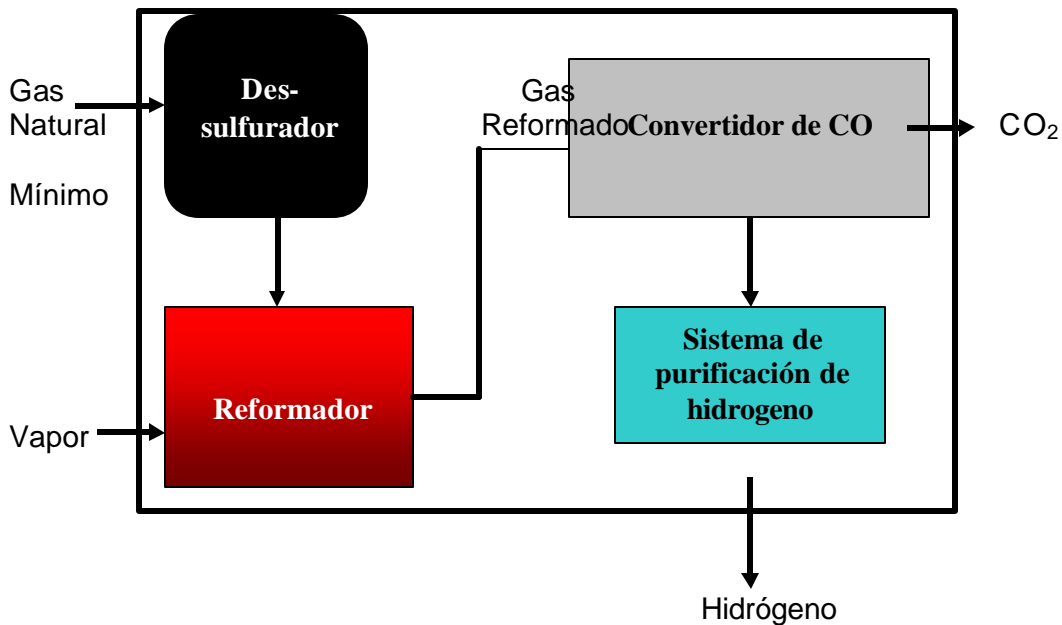
Otros hidrocarburos pueden ser reformados básicamente de la misma forma, Después de un quemado parcial para convertirlos en estado gaseoso. Algunas alternativas requieren procedimientos adicionales tal como la remoción de azufre u otras impurezas.

El contenido de energía del hidrógeno producido es efectivamente más alto, que el que consume el gas natural, pero se requiere una energía considerable para operar el reformador, así que la eficiencia neta de conversión es aproximadamente del 65%. El hidrogeno producido puede costar 65¢ de dólar por kilogramo.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Fuente: Rase, Chemical Reactor Design for Process Plants, 1977

<sup>6</sup> Ver referencias [5], [7]

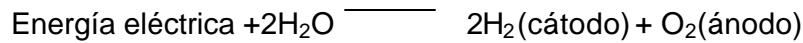
**Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de deformación por medio de vapor**



**2.1.2 Electrólisis.** La producción de hidrógeno electrolítico generalmente está limitada a pequeñas plantas, o bien es realizada en aquellos lugares donde el costo de energía eléctrica es bajo, con un costo de US\$2.40-US\$3.60 por kilogramo de hidrógeno producido. Las pérdidas de energía durante este proceso son relativamente pequeñas: 65% de eficiencia, y los electrolizadores pueden alcanzar entre 80% y 85% de eficiencia. Este es un proceso de interés, ya que es un proceso limpio y su insumo el agua es abundante.

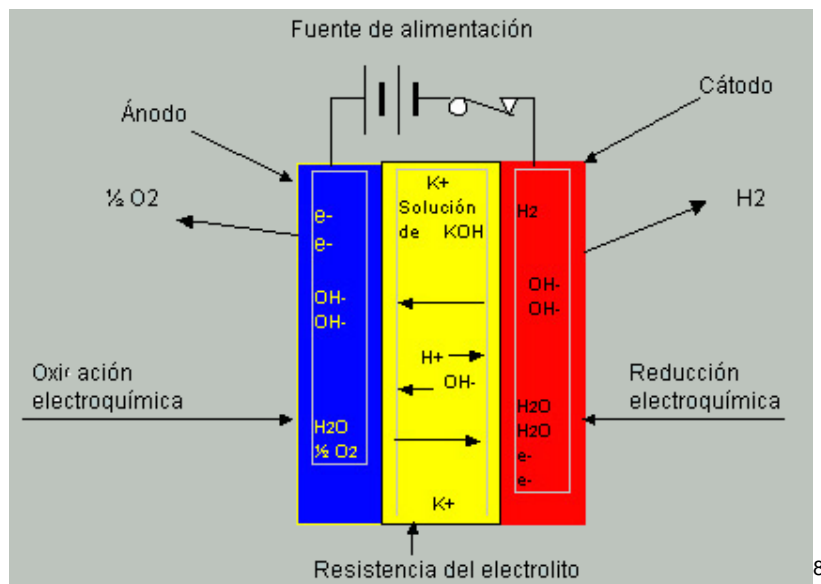
La electrólisis es un proceso; por medio del cual se rompen moléculas utilizando corriente, para este caso romperemos moléculas de agua para liberar átomos de oxígeno e hidrógeno. Dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (H<sub>2</sub>O) son eléctricamente atraídos en una molécula de agua. Cuando la corriente eléctrica pasa a través del agua se rompe el enlace químico con dos cargas positivas (iones positivos) y una carga negativa (ión negativo). Las cargas negativas o iones de oxígeno emigran al electrodo positivo (ánodo). Los iones de hidrógeno cargados positivamente son atraídos por el electrodo negativo (cátodo). Y así se produce la disociación de agua con la consecuente

generación de hidrógeno y oxígeno en forma separada, de acuerdo a la siguiente reacción:



El voltaje requerido para separar el hidrógeno del oxígeno a 25°C y 1 atm es de 1.24 V, el que puede ser reducido al manipular las condiciones de operación. De acuerdo a esto, la mínima cantidad de energía eléctrica necesaria para hidrolizar 1 mol de agua es 65.3 kWh, por lo que producir 1 m<sup>3</sup> de hidrógeno requerirá 4.8 kWh.<sup>7</sup>

**Figura 2. Esquema de un electrolizador.**



**2.1.3 Producción biotecnológica de hidrógeno.** [6] Según la cantidad de agua que posea la biomasa, ésta puede ser destinada a gasificación (humedad < 20%) o fermentación (humedad > 30%).

<sup>7</sup> Ver [5]

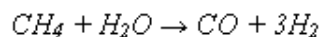
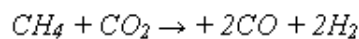
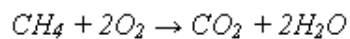
<sup>8</sup> Ver [5]



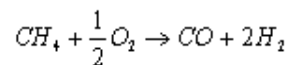
**Gasificación de biomasa** La gasificación de biomasa (proceso análogo a la gasificación por medio del vapor), es un proceso de oxidación parcial, que consiste en hacer reaccionar en un horno de oxidación, hidrocarburos y oxígeno en presencia de vapor de agua. La descripción del proceso se hará tomando como base hidrocarburos.

Para fines prácticos se tomara el metano  $CH_4$  como insumo.

Existen tres versiones comerciales del proceso, los desarrollados por Texaco, Shell y Montecatini. Todos emplean la combustión parcial no catalítica de los hidrocarburos alimentados con oxígeno y en presencia de vapor en una cámara de combustión, con temperaturas de llama entre 1300-1500°C. Con metano como principal insumo, las reacciones que se llevan a cabo son (Austin, Manual de procesos químicos en la industria, 1988):



La primera reacción es muy exotérmica y produce calor suficiente para mantener las otras dos reacciones, que son endotérmicas. La reacción neta es la siguiente:



Para el caso general, no solo con el metano, el gas producido tiene una composición que depende de la relación hidrógeno/carbono del hidrocarburo utilizado, así como también de la relación hidrocarburo/agua del insumo. La presión no tiene un efecto significativo sobre la composición y por lo general el proceso se realiza entre 2-4 MPa, lo que permite el empleo de equipo más compacto y reduce los costos de compresión.

El producto gaseoso producido debe ser luego sometido a un proceso de conversión del CO a H<sub>2</sub>, similar al proceso de *shift reaction* descrito para la reformación con vapor.

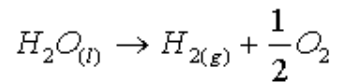
**Fermentación anaeróbica de biomasa.** El biogás generado por bacterias anaeróbicas que digieren materia orgánica (biomasa) en ausencia de oxígeno, está constituido principalmente por metano, el que antes de ser metabolizado por dichas bacterias se encuentra en equilibrio con el gas H<sub>2</sub>.

De acuerdo a lo anterior, el hidrógeno puede ser producido utilizando metano proveniente de la fermentación anaeróbica de la biomasa mediante alguno de los procesos descritos anteriormente (reformación con vapor u oxidación parcial) o bien, interrumpiendo alguna de las vías metabólicas que las bacterias utilizan para generar el metano, de modo que el biogás producido sea una mezcla gaseosa rica en H<sub>2</sub>.

**2.1.4 Fotoproducción de hidrógeno.** [5] [6] La fotoproducción de hidrógeno mediante el uso de energía solar ha sido objeto de mucha investigación y desarrollo desde la década del 70 cuando Fujishima y Honda (1972) reportaron la generación de hidrógeno y oxígeno en una celda fotoelectroquímica usando un electrodo de dióxido de titanio iluminado con luz cercana al UV. Los fotones provenientes de la luz solar son succionados en un absorbedor, el que puede convertir parte de la energía en electricidad (como en el caso de una celda fotovoltaica) o bien almacenarla como energía química mediante alguna reacción endergónica, siendo esta energía posteriormente utilizada en la producción de hidrógeno.

Dentro de la categoría de procesos de fotoproducción de hidrógeno se encuentran los procesos fotoelectroquímicos, fotoquímicos y fotobiológicos (Bolton J., 1978, 1985, 1995) que serán descritos a continuación.

**Procesos fotoquímicos:** Imitan la fotosíntesis natural usando moléculas sintéticas. Los procesos fotoquímicos para producir hidrógeno están basados en la siguiente reacción (hidrólisis):



El agua pura absorbe en el rango del IR (razón por la cual es considerada un gas invernadero), donde la energía de los fotones es insuficiente para producir la hidrólisis, siendo necesario adicionar alguna molécula o semiconductor capaz de absorber en otra región y permitir que se lleve a cabo la reacción.

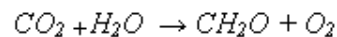
Dado que la absorción de un fotón permite la transferencia de un electrón en el proceso redox, será necesario utilizar además un catalizador para permitir el almacenamiento de los equivalentes electroquímicos, debido a que la reacción requiere dos electrones.

El único sistema fotoquímico en el que la reacción completa ha sido estudiada corresponde al trabajo de Katakis (1992, 1994), quien ha reportado una producción sostenida de hidrógeno en razón molar  $H_2:O_2$  de 2:1, con una eficiencia en el almacenamiento de la energía de un 7%. El resto de los trabajos que se hallan en la literatura están referidos al estudio de alguna de las semireacciones involucradas, con eficiencias menores a un 1%.

**Procesos fotoelectroquímicos:** El proceso consiste en términos simples, en producir hidrógeno mediante electrólisis como se describió anteriormente, utilizando para ello energía eléctrica generada a partir del sol, mediante el uso de paneles fotovoltaicos. Estos paneles están constituidos de un material semiconductor en el que los fotones son absorbidos, creando un exceso de electrones en la banda de conducción y un exceso de vacancias en la banda de valencia del mismo. Si el semiconductor contiene una unión n-p, el potencial

químico puede ser convertido a electricidad. Los mejores prototipos aún en investigación, tienen una eficiencia del 13%, lo cual se espera que mejore.

**Procesos fotobiológicos:** Están basadas en ciclos de fotosíntesis usados por plantas y por algunas bacterias y algas. En condiciones naturales los microorganismos fotosintéticos no sintetizan hidrógeno, sino que reducen el CO<sub>2</sub> a carbohidratos de acuerdo a la reacción genérica de fotosíntesis:



Sin embargo estos microorganismos tienen la capacidad de sintetizar hidrógeno mediante la transformación de la energía bioquímica que poseen, energía que ha sido obtenida a partir del sol. Para ello hay que modificar las condiciones de crecimiento de modo tal que el reductor final del proceso fotosintético (fotosistema I) esté acoplado a una enzima que catalice la síntesis de hidrógeno, sea ésta una hidrogenasa o nitrogenasa. Benemann (1994a, 1994b), Melis (1999, 2000) y Ghirardi (1999, 2000), han cubierto esta área muy bien y han puesto de manifiesto que el más efectivo sistema para producir H<sub>2</sub> (con la consecuente producción de O<sub>2</sub>) está basado en la utilización de algas verdes y/o cianobacterias (algas verde-azules).

Las algas verdes producen hidrógeno después de haber sido sometidas a condiciones de anaerobiosis y oscuridad (Boichenko, 1994; Schulz, 1996), en donde se induce la síntesis y actividad de la hidrogenasa. Cuando estas algas son sometidas nuevamente a la luz, producen H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> con una eficiencia inicial del orden de un 12% (Greenbaum, 1988), la que decae en el tiempo tras restablecerse la fotosíntesis.

En relación con la eficiencia del sistema que utiliza algas, hay que señalar que en condiciones ideales es cercana al 10%. Greenbaum (1995) señala que se han alcanzado eficiencias del orden del 15-20% al utilizar una especie mutante de *Chlamydomonas reinhardtii* (alga verde) carente del fotosistema I, resultado debatido por parte de la comunidad científica (Redding, 1999).

**Tabla 3. Métodos de producción del hidrógeno**

| <b>Procesos de producción de H<sub>2</sub></b> | <b>Estado del arte</b>                  |
|--|---|
| Reformación de gas natural                     | Comercial (alta eficiencia y económico) |
| Oxidación parcial de hidrocarburos             | Comercia (baja eficiencia)              |
| Gasificación de carbón                         | Comercial (Altas emisiones)             |
| Electrólisis del agua                          | Comercial (muy eficiente, costoso)      |
| Procesos biotecnológicos                       | Investigación y desarrollo              |
| Procesos electroquímicos                       | Investigación y desarrollo              |
| Fotoproducción de H <sub>2</sub>               | Investigación y desarrollo              |

[7]

Los insumos principales para la producción de hidrógeno en la actualidad son el gas natural y el petróleo, con el 76% y el 23% respectivamente. Lo cual se espera que cambie, hacia insumos más limpios como la biomasa.

## **2.2 ALMACENAMIENTO [3] [8]**

El almacenamiento de hidrógeno tiene 3 aspectos críticos: el peso del sistema de almacenamiento del combustible, el volumen del sistema y la velocidad o facilidad de reaprovisionamiento del combustible.

Los principales métodos de almacenar hidrógeno son:

**2.2.1 Hidrógeno gaseoso.** Una manera de guardar hidrogeno; es en gas comprimido sobre o bajo tierra en cilindros, en Europa se guardan en cavernas

y en minas. Nuevos materiales han permitido que se fabriquen tanques de almacenamiento que pueden contener hidrógeno a presiones extremadamente altas. Tanques ligeros, fuertes, capaces de almacenar más hidrógeno con menos peso, son muy costosos, pero la tecnología está ya disponible.<sup>9</sup>

**2.2.2 Hidrógeno líquido.** Para que el hidrógeno este en estado líquido se requiere de un proceso de licuefacción. La licuefacción tiene varios pasos en los cuales el hidrógeno se comprime y se refresca para formar un líquido denso. El hidrogeno líquido se debe almacenar a temperaturas bajas, debajo de los -250 °C en un sistema criogénico.

Este sistema permite almacenar y transportar una mayor cantidad de hidrógeno. La gran desventaja de este tipo de almacenamiento, es su costo que es de 4 a 5 veces más que las del gas comprimido y también requiere un alto suministro de energía , por la licuefacción.

El hidrógeno como líquido, contiene casi tres veces más energía que un peso equivalente de gasolina, y sube sólo 2.7 veces de volumen para un contenido de energía igual.

**2.2.3 Hídridos de metal.** Varios metales puros o aleaciones pueden combinarse con hidrógeno, produciendo metales hídridos estables, el hidrógeno se almacena en los espacios interátomo de un metal granular. Los hídridos se descomponen cuando se calientan, liberando el hidrógeno.

Este método es confiable y estable. Las desventajas de los hidruros de metal es que son pesados, tienen bajas densidades, requieren energía para ser llevados y son costosos.

---

<sup>9</sup> Celdas de combustible hidrógeno / oxígeno. *Edgar Alberto Medina Bohorquez*, 2002

**2.2.4 Adsorción por medio de carbón.** El hidrógeno es almacenado por presión sobre una superficie de grafito superactivado muy porosa. La absorción por medio de carbón es muy similar al almacenamiento por gas comprimido pero el tanque está lleno de grafito, lo que permite almacenar más hidrógeno a la misma presión manteniendo el volumen.

Se están explorando dos tipos: los nanotubos que son como emparedados de carbón compuestos de moléculas y clasificados según el tamaño. Se ha logrado una captación del 5 – 10 %. Y las nanofibras de grafito, apiladas de los nanocristales, forman una pared de poros pequeños, por medio de esta manera se espera almacenar el 74%.

**2.2.5 Microesferas de cristal.** Las microesferas de cristal son micro-globos pequeños y huecos de cristal. Estas pueden contener hidrógeno a altas presiones, cargadas con gas a altas temperaturas que van desde 200°C a 400°C. Este método es deseable cuando el factor de peso es importante.

**Tabla 4. Métodos de almacenamiento del hidrógeno**

| <b>Método</b>                 | <b>Uso general</b>                             |
|-------------------------------|--|
| Bajo tierra                   | Grandes cantidades, largos periodos de tiempo  |
| Líquido                       | Grandes cantidades, largos periodos de tiempo  |
| Gas comprimido                | Grandes cantidades, largos periodos de tiempo  |
| Metales hídridos              | Pequeñas cantidades, cortos periodos de tiempo |
| Absorción por medio de carbón | Pequeñas cantidades, cortos periodos de tiempo |

### 2.3 DISTRIBUCIÓN [3] [8]

La manera más común de transporte se hace en camiones de petróleo, llevan hidrógeno líquido y en hidruros de metal. Japón y Canadá han desarrollado el vehículo apropiado para transportar hidrogeno en los transatlánticos,

La opción más eficiente para entregar el gas de hidrogeno es a través de una red de tuberías subterráneas, estas tuberías son similares a las usadas en el transporte de gas natural, pero deben ajustarse para manejar densidades más bajas de energía y un índice más alto de gas en relación con el hidrogeno. La entrega de gas por medio de tuberías ya existe en algunas partes industriales de Estados Unidos y Canadá.

**Tabla 5. Métodos de distribución del hidrógeno**

| <b>Método</b>    | <b>Uso general</b>                    |
|------------------|---------------------------------------|
| Tuberías         | Grandes cantidades, largas distancias |
| Líquido          | Largas distancias                     |
| Metales hídridos | Pequeñas distancias                   |

### 2.4 USOS FINALES DEL HIDRÓGENO [8] [9]

La mayor parte de los usos comunes de hidrógeno no implican su empleo como un combustible, su principal uso en la actualidad es en el sector químico; como reactivo en la producción de amoníaco, la refinación de productos de petróleo, en la producción de metanol, reductor, síntesis de amoníaco (Proceso Haber), metanol, ácido clorhídrico y combinaciones orgánicas. También para la producción de gas natural sintético y la fabricación de diversos plásticos.

También se usa en la industria alimentaria; procesado de alimentos por ejemplo en hidrogenación de aceites, y en la fundición: soldadura autógena



para procesos de soldadura submarina. También se usa como refrigerante en estado líquido.

El hidrógeno puede ser usado como combustible de combustión o como celdas de combustible.

**2.4.1 Combustión.** El hidrógeno se usa como cualquier otro combustible. El hidrógeno es empleado en naves espaciales, en el cual se quema el hidrógeno para propulsión.

En aeroplanos, algunas características de este empleo del hidrógeno tienen sus ventajas como lo son; el alto contenido de energía del hidrógeno comparado con su peso. Ya que el peso del combustible que debe ser llevado, es un factor importante para el avión. Entre otras consecuencias, la reducción de peso conllevaría a una reducción del tamaño del motor reduciendo no solo el costo sino el ruido del motor. La alta velocidad de propagación de llama del hidrógeno es también un rasgo importante. Una desventaja es la capacidad de volumen requerida para este combustible, ya que es mayor a la ocupada por otros combustibles.

El avión de Aéreo Espacio Nacional (NASP), que actualmente está siendo desarrollado por la NASA y el Departamento de Defensa, es abastecido por hidrógeno como combustible. La idea es almacenar combustible a bordo en forma semicongelada. Aunque esto requiera temperaturas inferiores a las de almacenamiento líquido, esto reduce el volumen del depósito necesario para almacenar el hidrógeno.

También se usa en carros, camiones y autobuses, los cuales queman el hidrógeno en un motor de combustión interna, similar a un motor de gasolina convencional. Agregar una pequeña fracción de hidrógeno a otro combustible, como la gasolina o el gas natural, es otra opción.

Un auto abastecido con algún tipo de combustible que sea una mezcla con hidrógeno, presenta índices inferiores de emisión a las de un vehículo común abastecido por gasolina, debido a las características de ignición del hidrógeno. Por ejemplo; un auto que se abastece con un combustible que posee un 5% de hidrógeno en su gas natural, reducirá las emisiones de 6 a 8 veces.

La mayoría de aplicaciones en las cuales se quema gas natural puede ser convertidas al hidrógeno. En una casa de Utah, se ha usado hidrógeno, por varios años, para el abastecimiento del combustible del horno, calentador, chimenea, baño turco, otros equipos.

La principal dificultad en esta forma de suplir energía, en el sector de transporte. Es el almacenamiento a bordo. Como es un gas, el hidrógeno a temperatura y presión ambiental aumenta aproximadamente 3000 veces más el espacio que requiere una cantidad equivalente de energía de gasolina. Para esto se requerirá una compresión, como la licuefacción.

**2.4.2 Celdas de combustible.** Las celdas de combustible (también llamadas pilas de combustible) son noticia en todo el mundo en casi todos los campos de la producción eléctrica. A pesar de que la tecnología para estas fuentes de energía electroquímicas existen desde, hace aproximadamente 150 años, sólo recientemente las celdas de combustible han ganado reconocimiento. Las celdas de combustible son el candidato más tentador en cuanto a producción de energía "verde" se refiere, ya que es limpia, eficiente, silenciosa y con cero emisiones de  $\text{NO}_x$ . Ya han sido probadas comercialmente para uso doméstico, industrial y en vehículos.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten directamente energía química en eléctrica, son eficientes. Sin partes móviles internas, las celdas de combustible operan de forma similar a las pilas secas, excepto que para la producción continua de electricidad requieren un suministro continuo de combustible.

Las celdas de combustible se apartan de las técnicas estándar en la moderna producción de energía, que consiste en la extracción de calor de un combustible, la conversión de este calor en energía mecánica y, finalmente, la transformación de energía mecánica en eléctrica.

Las celdas de combustible también fueron usadas en proyectos de naves espaciales, de hecho, este ha sido el sector que más ha impulsado su desarrollo. El transbordador espacial sale con 100,000 kilogramos de hidrógeno líquido en sus depósitos de combustible, usa una celda alcalina de combustible (65% de eficiencia) para suplir las necesidades eléctricas a bordo. Ofrece ventajas tales como que el agua es el subproducto de las celdas de combustible y que el hidrógeno líquido puede ser usado para mantener el resto de la nave fresca.

Las celdas de combustible también se pueden usar en carros, camiones y autobuses. Es en este sector, transporte, en donde mayores posibilidades se observan para la comercialización de este producto. La implementación de las celdas de combustible en los autos requiere de cambios en el diseño de los vehículos actuales. Agregando eficiencia al auto y por lo tanto una mayor potencia referente a la misma cantidad de combustible.

Las celdas de combustible de hidrógeno también tienen utilidades eléctricas entre las que se incluye: el almacenamiento de energía, la producción de potencia y la transmisión de energía a larga distancia. Ya que el hidrógeno no es un combustible primario, debe ser producido de alguna otra fuente de energía

Las celdas eléctricas de hidrógeno pueden ser usadas para transmisión eléctrica substituyendo cables de transmisión de larga distancia, con un sistema de plantas de producción de hidrógeno y tuberías de hidrógeno. El hidrógeno sería conducido por medio de tuberías al centro de demanda y usado así para producir electricidad con las celdas de combustible. Este

sistema es mas eficiente ya que reduce las pérdidas, además es más fácil de controlar y dirigir el flujo de energía.

Otra opción es la utilización de las celdas de combustible de baja potencia en un sistema energético distribuido, en los cuales los generadores se encuentren cerca del sitio de demanda energética.

## **2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS [10] [11]**

Las ventajas y desventajas del hidrógeno derivan de sus propiedades físicas básicas.

**2.5.1. Ventajas.** La molécula de hidrógeno es la más ligera, la más pequeña, es relativamente estable y es una de las moléculas más simples . El hidrógeno tiene más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible y, en caso de accidente, se dispersaría rápidamente. Sirve para almacenar, transportar y convertir en otras formas de energía. También permite la combustión a altas relaciones de compresión y altas eficiencias en máquinas de combustión interna. Cuando se le combina con el oxígeno en celdas de combustible electroquímicas, el hidrógeno puede producir electricidad directamente, rebasando los límites de eficiencia del ciclo de Carnot obtenidos actualmente en plantas generadoras de potencia.

El hidrógeno es un combustible extraído de la naturaleza, casi todos los organismos poseen hidrogeno, lo cual lo hace un recurso muy abundante e inagotable en el mundo, pudiendo producirse a partir de una gran variedad de insumos , de modo que no habrían crisis económicas ni disputas por obtener combustible.

Es un combustible con un alto **CONTENIDO ENERGÉTICO**, que proporciona 28.6696 kcal por cada gramo, frente a 11.953 kcal/gr del gas natural, 10.780 kcal/gr de la gasolina, 10.932Kcal/gr del butano y 10.0792 Kcal/gr del propano

Con oxígeno puro y una chispa, arde violentamente, produciendo una gran cantidad de calor. La combustión del hidrógeno con el aire es limpia, evitando así la contaminación del medio ambiente. Los productos de la combustión son en su mayoría vapores de agua, los cuales son productos no contaminantes .

El hidrogeno, como combustible, tiene dos ventajas importantes frente al queroseno. La primera, debida a su poder energético, aproximadamente tres veces superior, origina un consumo de combustible tres veces inferior, con el consiguiente ahorro de masa en el despegue y consiguiente aumento de carga útil. La segunda es relativa a su compatibilidad medioambiental, su contaminación medioambiental es mínima. En el proceso de combustión produce vapor de agua y no dióxido de carbono, desapareciendo los efectos medioambientales de este último. Por el contrario, produce una masa de vapor de agua, similar a la producida por el queroseno, pero con la particularidad de que su vida media es 100 veces inferior a la del dióxido de carbono, siendo mínimos sus efectos medioambientales. Los niveles de otro contaminante importante, los  $\text{NO}_x$ , son también inferiores. Los niveles de contaminación, en los procesos de producción de  $\text{H}_2$ , podrían también ser reducidos a niveles mínimos mediante el uso de energías renovables. [10]

Las razones por las cuales se considera la combustión del hidrógeno como una combustión limpia, son las siguientes: Los productos de la combustión del hidrógeno con aire son: vapor de agua y residuos insignificantes donde la máxima temperatura es limitada. Algunos óxidos de nitrógeno son creados a muy altas temperaturas de combustión (2000 °C), afortunadamente, la temperatura de autoignición del hidrógeno es solamente de 585 °C

Una máquina de combustión interna que utiliza hidrógeno como combustible puede ser ajustada para que la emisión de  $\text{NO}_x$  sea 200 veces menor que la de

los vehículos actuales. Una forma práctica para controlar la temperatura de combustión consiste en inducir agua a la mezcla hidrógeno - aire. Con la inyección de agua, el escape de los vehículos manejados con hidrógeno es simplemente vapor de agua que retorna a la atmósfera sin contaminar el aire ni producir lluvia ácida. [11]

**2.5.2. Desventajas.** El hidrogeno tiene el inconveniente importante de ser gas en condiciones atmosféricas. Para su utilización debe ser licuado, aproximadamente a  $-250^{\circ}$  C con el consiguiente problema de aislamiento térmico, e incluso en estas condiciones su densidad es aproximadamente cuatro veces inferior a la del queroseno, con el consiguiente aumento de volumen, peso en vacío y complejidad. Esto origina la necesidad de toda una nueva estrategia para su implementación, obligando a realizar nuevos diseños.[10]

Como desventajas, el hidrógeno tiene una temperatura de licuefacción extremadamente baja ( $20^{\circ}$  K) y una energía muy baja por unidad de volumen como gas o como líquido (más o menos una tercera parte de la del gas natural o gasolina, respectivamente). Otras desventajas son: la obtención del hidrógeno líquido requiere de un proceso altamente consumidor de energía, el transporte de hidrógeno gaseoso por ductos es menos eficiente que para otros gases, los contenedores para su almacenaje son grandes y el almacenamiento de cantidades adecuadas de hidrógeno a bordo de un vehículo todavía representa un problema significativo. El hidrógeno no es tóxico y no es contaminante, pero es difícil de detectar sin sensores adecuados ya que es incoloro, inodoro y su flama en el aire es casi invisible.

Como no es un combustible primario entonces se incurre en un gasto para su obtención. Requiere de sistemas de almacenamiento, costosos y aun poco desarrollados, también requiere de un elevado gasto de energía en la licuefacción del hidrógeno.

### **3. PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO EN EL MUNDO**

#### **3.1 ESCENARIOS ENERGÉTICOS [4] [12] [13]**

El estudio de escenarios de sistemas tiene como objeto el análisis e interpretación del desarrollo económico y social, de las sociedades en el futuro. En los posibles futuros de la humanidad, está el deseo del desarrollo sostenible como una meta que se debe alcanzar. Teniendo en mente este propósito tomaremos la actividad energética ya que este es uno de los principales factores que influyen en el desarrollo de los países.

Con este objetivo en mente deduciré una serie de posibles escenarios energéticos a futuro, basados en estudios ya realizados [1].

Utilizaremos la técnica de escenarios para analizar y determinar las tendencias energéticas más probables en el futuro. Los escenarios son imágenes de futuros alternativos, no son ni predicciones, ni pronósticos. Cada uno se puede interpretar como una imagen particular de cómo el futuro podría desarrollarse. La técnica de escenarios es una herramienta útil para investigar futuros alternativos de progreso y sus implicaciones, para así entender el comportamiento de sistemas complejos.

Los escenarios descritos en este capítulo serán más cualitativos que cuantitativos. En este trabajo se hacen las proyecciones en tres escenarios A, B y C, para dos periodos de tiempo mediano 2050 y largo plazo 2100.

### 3.2 CERTIDUMBRES

Teniendo en cuenta nuestro estilo de vida actual, de consumistas, podemos predecir un sostenido aumento de la demanda energética global, enfocadas en los países en vía de desarrollo. Los factores que más influyen en el aumento de la demanda son el crecimiento de la población y el desarrollo económico.

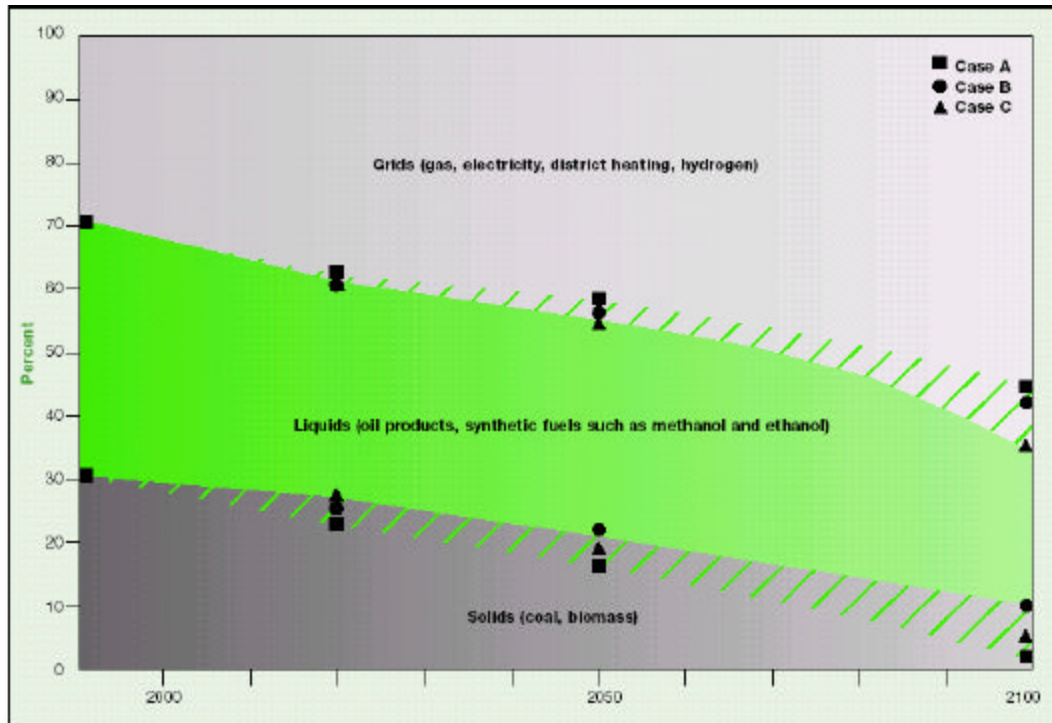
Paradójicamente también se espera una creciente preocupación por el medio ambiente, la cual se verá reflejada en un incremento de la búsqueda de mejoras tecnológicas orientadas a la obtención de fuentes energéticas más limpias y eficientes a las actuales. Lo cual probablemente hará que el suministro energético sea más caro. Uno de los mecanismos previstos para ello es la denominada Implementación Conjunta de proyectos de reducción de emisiones

Los cambios tecnológicos en la humanidad no han sido impulsados por la necesidad, si no por la búsqueda de la eficiencia, ventajas, y reducción de costos. Para todos los escenarios la intensidad energética -que es la cantidad de energía primaria necesaria por unidad de PIB - disminuye, debido a los progresos tecnológicos. Las tecnologías ineficientes son remplazadas por tecnologías más eficientes. En algunas regiones en desarrollo la intensidad de la energía comercial aumentará inicialmente como es usual, pero la intensidad energética total disminuye. La reducción en la intensidad energética, por experiencia histórica, variará entre el 0.8 por ciento y el 1.4 por ciento.

Se prevé en los tres escenarios que el uso final directo de sólidos, por los consumidores desaparezca para el 2050. Las fuentes de energía sólidas se convierten cada vez más y más en líquidas y orientadas a la canasta de portadores energéticos como lo son los gases de energía y la electricidad. Como se muestra en la figura 3.



**Figura 3. Distribución del energético final según el estado en que se usó**



### 3.3 INCERTIDUMBRES

La población es una de las fuerzas impulsoras de las necesidades energéticas en el futuro. La mayoría de las proyecciones de población concluyen que la tendencia de la población mundial es a duplicarse para el 2100, eso sería alrededor de 10 billones de personas. IIASA estima para el 2100 una población cercana a los 10.4 billones, con un 95 por ciento de probabilidad de que la población del mundo estará entre 6 billones y 17 billones de personas.<sup>10</sup>

Para facilitar las comparaciones entre los distintos escenarios supondremos el mismo crecimiento demográfico mundial, para los tres escenarios, que será de 10 billones de personas para el 2050 y 11.7 billones para el 2100. Estos

<sup>10</sup> Hay tres fuentes principales de las proyecciones poblacionales mundiales; Las Naciones Unidas (UN, 1998), el Banco Mundial (Bos y Vu, 1994), e IIASA (Lutz, Sanderson y Scherbov, 1997).

valores son más elevados que las proyecciones medias de IIASA que son del 10.4 billones de personas para el 2100. Esto significa un adecuado acceso a los servicios de energía en los tres escenarios. Haciendo estas proyecciones altamente flexibles a altos crecimientos en la población o en la demanda energética.

El desarrollo y crecimiento económico son fundamentales para lograr un incremento en la calidad de vida y en la equidad mundial. Por lo tanto las suposiciones que se hagan del desarrollo económico son factores importantes, en la determinación de los escenarios energéticos. Para medir el grado de desarrollo económico generalmente se usa el Producto Interno Bruto (PIB). Según estudios de IIASA-WEC se esperan tasas de crecimiento anual en un rango de variación entre el 1.1 y 3.2 por ciento<sup>11</sup>. Según las anteriores previsiones, la demanda energética global atravesará un incremento entre 1.5 y 3 veces, de la demanda actual, para el 2050 y entre 2 y 5 veces para el 2100.

La preocupación fundamental a nivel mundial sobre los impactos ambientales del consumo de energía es la posibilidad de un cambio climático global ocasionado por las emisiones de CO<sub>2</sub>. Con los crecimientos que se proyectan para el consumo mundial de energía entre 1995 y 2015, se estima que las emisiones de carbono aumentarán en 3.500 millones de toneladas y en el 2015 excederán en 61% los niveles que se tenían en 1990.

También se sabe que los procesos de mejora de la competitividad y de reducción de impactos ambientales negativos presionaran la innovación tecnológica, aunque se desconoce cual sea su ritmo pues este dependerá de las inversiones en investigación, desarrollo, demostración y difusión tecnológica; que pueden a su vez ser presionadas por mayores restricciones en las metas de reducción de la contaminación. Así como también se desconoce los niveles de reducción de la contaminación.

---

<sup>11</sup> Estudios de IIASA -WEC.(1998)

### 3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS

Los escenarios descritos en este capítulo serán más cualitativos que cuantitativos. En este trabajo se hacen las proyecciones en tres escenarios A, B y C, para dos periodos de tiempo; mediano 2050 y largo plazo 2100.

**3.4.1 Escenario A** Este escenario prevé un futuro con un alto crecimiento del PIB con un desarrollo económico vigoroso e implementación de muchas mejoras tecnológicas, y por lo tanto un alto grado de desarrollo económico.

Es un escenario en donde los mercados son la fuerza dominante con liberalización de mercados, sin regulación, ni control del gobierno, solo con regulación anti-trust. El sector privado financia los costos de investigación y desarrollo que requieren las nuevas tecnologías, la liberalización y la privatización resuelven los problemas económicos, sociales y políticos más importantes. Puede impulsar los mercados distribuidos de energía impulsando así la co-generación (producción conjunta de potencia y calor) estacionaria y distribuida.

Se prevé un cambio estructural primero hacia el gas natural y después hacia opciones de energía renovables con muy altos niveles del rendimiento energético. Bajos impactos ambientales, la equidad se alcanza con el rápido desarrollo. Las regiones que están en desarrollo actualmente, alcanzan un alto nivel de desarrollo para finales del siglo 21.

La brecha entre pobres y ricos se angosta, incrementando la equidad mundial. Este escenario tiene características de sostenibilidad. Lo cual se logra principalmente con un desarrollo vigoroso. (Sin tener que distribuir los insumos).

El rápido desarrollo económico y tecnológico permite acceso a una base de recursos siempre en expansión con una disminución en los requerimientos energéticos y de materiales, ósea un aumento en la eficiencia, conduciendo a una reducción en los efectos para el medio ambiente

La preocupación por el medio ambiente no será un factor que defina las tendencias políticas, más sin embargo este será beneficiado debido a las constantes incursiones de las mejoras tecnológicas en las diferentes industrias.

**3.4.2 Escenario B.** Este escenario representa una tendencia media, con un desarrollo económico intermedio y una modesta implementación de mejoras tecnológicas. Fue diseñado para representar un futuro caracterizado por cambios incrementales y graduales. Para así servir como referencia.

Este escenario es realista para las primeras décadas del siglo, pero conforme pasa el tiempo se convierte en algo poco probable ya que es inimaginable que no sucedan cambios, tanto a nivel social como tecnológico, en un periodo de tiempo largo como lo son 100 años.

**3.4.3 Escenario C.** Este escenario conduce a un futuro rico y verde. Representando una trayectoria con un desarrollo fundamentalmente diferente ya que incluyen un progreso tecnológico sustancial y una cooperación internacional sin precedentes centrada explícitamente en la protección del medio ambiente y en la equidad mundial. Esto incluye una redistribución activa de la riqueza y muy altos niveles de eficiencia y conservación de la energía. Este escenario supone un incremento por la preocupación del medio ambiente por parte de la sociedad.

Este escenario también refleja una sustancial transferencia de recursos de países industrializados a países en vía de desarrollo. Para estimular el crecimiento económico y erradicar la pobreza. Para lograr esta transferencia se requiere de impuestos y rigurosos incentivos ambientales internacionales.

Este escenario asume específicamente; que los impuestos energéticos e impuestos a las emisiones de gases, se aplicaran universalmente. Más sin embargo a diferentes tarifas y sincronización. También asume que los ingresos de los impuestos se usaran para promover el desarrollo. Lo que significa que la recolección de estos impuestos de los países industrializados se transferirán a los países en desarrollo, y destinados al desarrollo de la infraestructura energética, en tecnologías limpias, eficientes y de conservación.

Este escenario requiere de un cambio fundamental de los paradigmas actuales de la socioeconomía, la tecnología y en las tendencias del desarrollo ambiental. Nuevas políticas serán requeridas para lograr el futuro descrito. Nuevas políticas que promuevan la difusión de avances tecnológicos, acceso a una energía confiable y viable, un vigoroso crecimiento y reducción de las emisiones de gases

Se requiere de la implementación de controles en las tecnologías y cambios en políticas energéticas, como: incentivos para animar tanto a consumidores como a productores para que utilicen la energía más cuidadosa y eficientemente con impuestos 'verdes', con acuerdos internacionales y transferencia de tecnología. Con implementaciones de mejoras tecnológicas en las energías renovables

Para este panorama la actuación de los gobiernos es vital debido a la necesidad de grandes capitales de inversión y con tiempos de recuperación largos para las inversiones de apoyo a nuevas tecnologías. Como también son fundamentales las políticas y medidas que tome el gobierno a corto plazo como; leyes e impuesto que impartan a las compañías que violen cierta cantidad de emisiones de gases o leyes que brinden incentivos apoyando las energías limpias

Este escenario busca la equidad, ya que este es un factor fundamental en el desarrollo sostenible, lo cual se puede conseguir con la Incorporación de

impuestos ambientales y energéticos, para transferir la abundancia del norte al sur para así realizar la equidad económica. Este escenario conduce a disminuir el uso de energía pero también conduce a un alto crecimiento en conjunto especialmente para los países en desarrollo.

El escenario C es el que ilustra más vivamente las condiciones para lograr un alto grado de sostenibilidad y equidad en el mundo. Incrementando la equidad, tanto en el sentido ecológico como económico entre regiones y países.

**Tabla 6. Caracterización de los escenarios <sup>12</sup>**

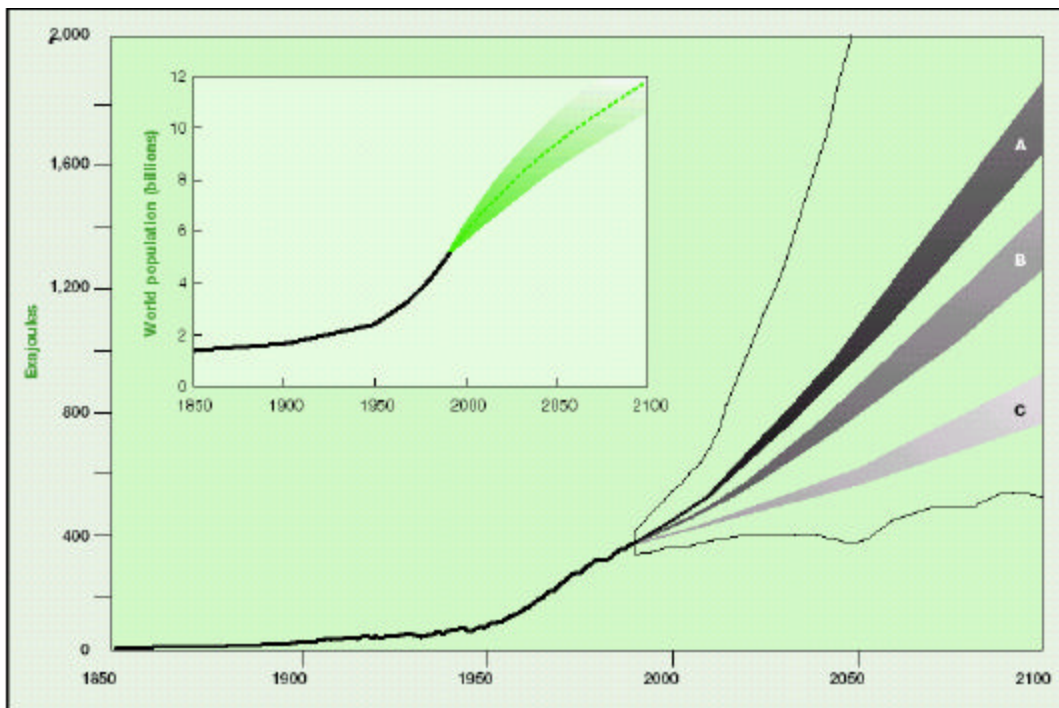
|  |             | <b>Escenario A<br/>Crecimiento<br/>alto</b> | <b>Escenario B<br/>Crecimiento<br/>medio</b> | <b>Escenario C</b> |
|--|-------------|---|--|--------------------|
| <b>Población en billones</b>   | 1990        | 5.3   | 5.3  | 5.3                |
|  | 2050        | 10.1  | 10.1   | 10.1               |
|  | 2100        | 11.7  | 11.7   | 11.7               |
| <b>Producto Bruto mundial (trillones de dólares de 1990 )</b>                                | 1990        | 20  | 20   | 20                 |
|  | 2050        | 100   | 75   | 75                 |
|  | 2100        | 300   | 200  | 220                |
| <b>Producto Bruto mundial (porcentaje de cambio anual)</b>                                   |             | Alto  | Medio  | Medio              |
|  | 1990–2050   | 2.7   | 2.2  | 2.2                |
|  | 1990–2100   | 2.5   | 2.1  | 2.2                |
| <b>Intensidad energética primaria (Mega joules por dólar 1990 de Producto bruto mundial)</b> | 1990        | 19.0  | 19.0   | 19.0               |
|  | 2050        | 10.4  | 11.2   | 8.0                |
|  | 2100        | 6.1   | 7.3  | 4.0                |
| <b>Índice de mejoras en la intensidad energética primaria (porcentaje de cambio anual )</b>  |             | Medio                                       | Bajo   | Alto               |
|  | 1990–2050   | -0.9  | -0.8   | -1.4               |
|  | 1990–2100   | -1.0  | -0.8   | -1.4               |
| <b>Consumo de energía primaria (Hexa joules)</b>   | 1990        | 379   | 379  | 379                |
|  | 2050        | 1,041                                       | 837  | 601                |
|  | 2100        | 1,859                                       | 1,464  | 880                |
| <b>Consumo de energía primaria acumulativa, 1990–2100 (Miles de Hexa joules)</b>             | Carbón      | 8.9 – 30.7                                  | 17.5   | 7.1 – 7.2          |
|  | Aceite      | 27.6 – 15.7                                 | 15.3   | 10.9               |
|  | Gas Natural | 18.4 – 28.7                                 | 15.8   | 12.2 – 12.9        |
|  | Energía     | 6.2 – 11.2                                  | 10.5   | 2.1 – 6.2          |

<sup>12</sup> Referencias: [4] [12]

|   |               |             |       |           |
|---|---------------|-------------|-------|-----------|
|   | Nuclear       |             |       |           |
|   | Hídrico       | 3.7 – 4.2   | 3.6   | 3.6 – 4.0 |
|   | Biomasa       | 7.4 –14.3   | 8.3   | 9.1 –10.1 |
|   | Energía Solar | 1.8 – 7.7   | 1.9   | 6.3 – 7.4 |
|   | Otros         | 3.0 – 4.7   | 4.3   | 1.4 – 2.2 |
|   | Total Global  | 94.0 – 94.9 | 77.2  | 56.9      |
| <b>Reducción de costos en la tecnología energética (curvas de aprendizaje)</b>                                      | Fósil         | Alto        | Medio | Bajo      |
|   | No-fósil      | Alto        | Medio | Alto      |
| <b>Índice de difusión de tecnología Energética</b>  | Fósil         | Alto        | Medio | Medio     |
|   | No-fósil      | Alto        | Medio | Alto      |
| <b>Impuestos ambientales<br/>Inversiones en el sector defuentes energéticas<br/>(trillones de dólares de 1990 )</b> |               | No          | No    | Si        |
|   | 1990–2020     | 15.7        | 12.4  | 15.7      |
|   | 2020–2050     | 24.7        | 22.3  | 24.7      |
|   | 2050–2100     | 93.7        | 82.3  | 93.7      |

La tabla 6 muestra las diferentes características cuantitativas de los diferentes escenarios.

**Figura 4. Requerimientos globales de energía primaria en los tres escenarios**



La figura 4 ilustra la caracterización de los requerimientos energéticos para los tres escenarios. Como se puede observar son muy dispersos dependiendo de las características propias de cada escenario. Las líneas que se ven fuera de los rangos de los escenarios, son los límites, a los cuales han llegado otros estudios de IIASA de escenarios.<sup>13</sup>

**Tabla 7. Caracterización de los escenarios con relación a los ítems para el logro de un desarrollo sostenible**

| Elementos de sostenibilidad                              | 1990    | Escenario A | Escenario B | Escenario C |
|--|---------|-------------|-------------|-------------|
| Erradicación de la pobreza                               | Baja    | Muy alta    | Mediana     | Muy alta    |
| Reducir la diferencia en la distribución de ingresos     | Baja    | Alta        | Mediana     | Muy alta    |
| Proporcionar acceso universal a la energía               | Baja    | Muy alta    | Alta        | Muy alta    |
| Incremento en la capacidad de proporcionar energía       | Baja    | Alta        | Mediana     | Muy alta    |
| Reducción de los impactos adversos en la salud.          | Mediana | Muy alta    | Alta        | Muy alta    |
| Reducción de contaminación                               | Mediana | Muy alta    | Alta        | Muy alta    |
| Limitación de las emisiones de GHG                       | Baja    | Alta        | Baja        | Muy alta    |
| Mejoras en la eficiencia del suministro energético       | Mediana | Alta        | Baja        | Alta        |
| Incremento de la eficiencia del uso final de la energía. | Baja    | Alta        | Mediana     | Muy alta    |
| Aceleración de la difusión tecnológica                   | Baja    | Muy alta    | Mediana     | Alta        |
| Liberalización internacional del comercio de energía     | Media   | Muy alta    | Alta        | Baja        |

<sup>13</sup> Estudios de IIASA -WEC (1998)



### 3.5 ESCENARIO PARA EL HIDRÓGENO

Para la introducción del hidrogeno en el sistema energético global, se pueden asumir los escenarios A o C explicados anteriormente. Con la diferencia de que en el escenario C es más pronta y amplia la incursión del hidrógeno en el sistema energético.

Este escenario, llamémoslo *H*, asume un mundo con un alto grado de conciencia ambiental y social, combinado con la coordinación de esfuerzos globales para lograr un desarrollo sostenible y lograr reducir la brecha de los ingresos en las regiones, para lograr un desarrollo sostenible. Es un escenario optimista básicamente con los mismos requerimientos que en el escenario C descrito con anterioridad.

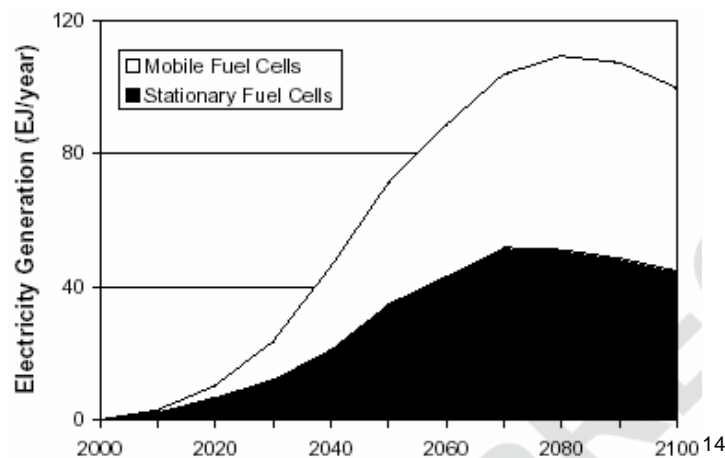
La producción de hidrógeno primero se hará a partir de combustibles fósiles, competitivos en la actualidad, para luego ir cambiando paulatinamente a fuentes renovables lo cual conduciría el sistema de producción hacia una trayectoria sostenible a largo plazo. No obstante, si las metas de reducción de la contaminación se hacen mas estrictas, es posible que esta trayectoria se modifique, acelerándose un poco la utilización de fuentes renovables para la obtención del hidrógeno; biomasa para la gasificación y agua o incluso geotermia para la electrólisis.

Para que el hidrógeno entre al sistema energético se requiere de un gasto económico significativo y de mejoras en el funcionamiento de las tecnologías de producción, almacenamiento, conversión, transporte y del uso final de la energía. También se requiere de la combinación de investigación, desarrollo y esfuerzos demostrativos. Así como también es necesario un despliegue comercial, que conduzca a las mejoras tecnológicas necesarias y la reducción de costos. Adicionalmente los beneficios de la comercialización de las tecnologías con hidrógeno requerirán de estrategias de mercado que estimulen la coordinación de diferentes segmentos del mercado.

Los nichos de mercado para el hidrogeno pueden ser por ejemplo donde sean importantes los criterios ambientales. El uso del hidrogeno puede ser atractivo y probablemente jugar un papel decisivo en su difusión, un ejemplo de esto son las celdas de combustible, donde la pureza, confiabilidad y flexibilidad compensa los altos costos; por ejemplo abastecer electricidad donde hay cargas muy sensibles con severas normas de confiabilidad y suministro.

La co-generación (producción conjunta de potencia y calor) estacionaria y distribuida tiene aplicaciones en edificios y en la industria, junto con aplicaciones de transporte, esta podría ser la clave para estimular el crecimiento inicial del mercado del Hidrogeno. En estos mercados energéticos se vería la incursión de las celdas de combustibles (estacionarias), las cuales también se aplicarían al sector de transporte (móviles). Ver figura 5.

**Figura 5. Incursión de las celdas de H<sub>2</sub> en la generación eléctrica.**



El mercado potencial para los edificios y vehículos, puede hacer de la economía del hidrógeno una alternativa más atractiva que ayude así a superar la barrera de la infraestructura inicial. También podrían usarse aparatos de producción de hidrógeno que sean instalados en los edificios, los cuales

<sup>14</sup> Ver L. Barreto et al., [1]

puedan usarse también como fuentes de reaprovisionamiento de combustibles para los vehículos.

Los vehículos accionados por celdas de combustible, podrían ser una fuente de electricidad mientras están parqueados.

## **4. PANORAMAS ENERGÉTICOS PARA COLOMBIA**

Para analizar las posibilidades de penetración de un nuevo combustible como lo es el hidrogeno nos concentraremos en la situación actual energética en Colombia, para así desarrollar un escenario energético colombiano a 20 años. Haré un breve recorrido por estas variables, analizando su importancia y dando, a partir de las tendencias históricas, una primera deducción de las tendencias futuras, que serán tratadas con más detalle en el transcurso del trabajo.

La información que vamos a utilizar como base para las proyecciones es seleccionada de estudios y proyecciones de la UPME.<sup>15</sup>

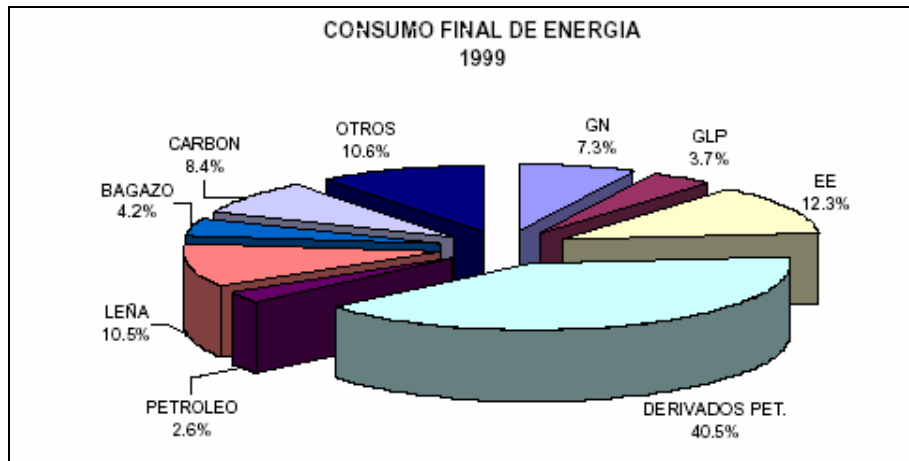
### **4.1 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICA COLOMBIANA ACTUAL [15]**

Colombia cuenta con una gran variedad de energéticos que le permiten tener alternativas de generación de energía eléctrica. Posee recursos energéticos convencionales y de energías alternativas o renovables.

---

<sup>15</sup> UPME [15]

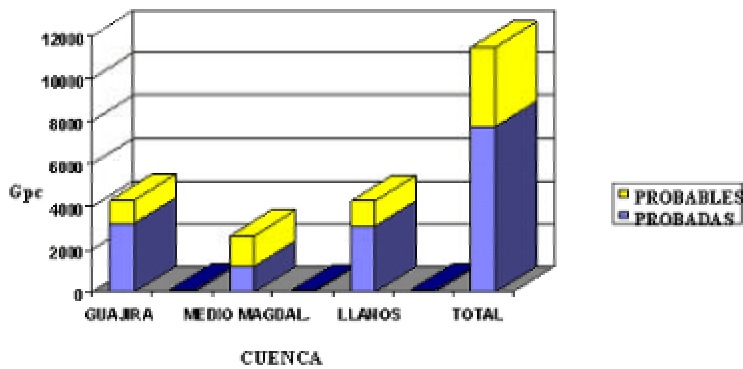
**Figura 6. Porcentaje de participación de los energéticos en el consumo colombiano 1999**



Este consumo se realiza en su orden en el sector transporte que es el mayor consumidor de energía –99% derivados del petróleo y 1% gas natural, seguido por los sectores industrial, residencial y comercial. La tasa de crecimiento del consumo interno ha estado por encima de las tasas de crecimiento del PIB. Fue del 4% promedio anual en el periodo 1987 – 1995, mientras que la del PIB que fue del 3.7% promedio anual en el mismo periodo.

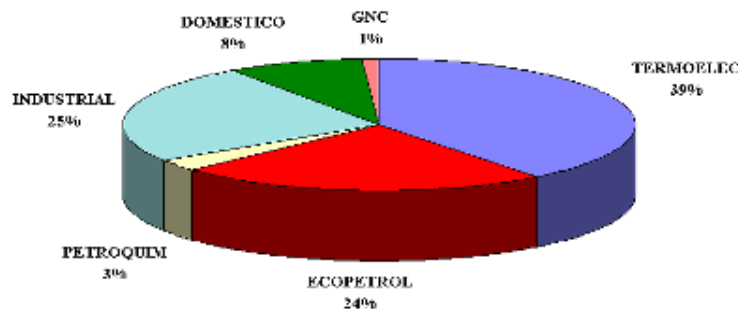
**4.1.1 Gas Natural.** El país cuenta con un total de 11468 Gpc de reservas, de gas natural. De esta cifra, 7673 Gpc corresponden a reservas probadas y 3745 Gpc son reservas probables. (Figura 7). La producción y consumo promedio de gas natural era 459 Mpcd en 1996, que en un 70.4% correspondía a la región de la Guajira, en donde se encuentran los campos productores más importantes (Ballena, Chuchupa y Riohacha). Estos campos, junto con los de Castor, Sucre, Guepajé y Ayombe, ubicados en el departamento de Sucre, abastecen el consumo de la Costa Atlántica, el cual representa el 70% del consumo total del país. En el departamento de Santander se cuenta con el 7% de las reservas y el 25% del consumo. Las reservas actuales de gas natural están cercanas a los veinte años, a los niveles actuales de producción.

**Figura 7. Reservas de Gas Natural.**



En 1996 el consumo de gas natural fue de 458.6 Mpcd, con aumento de 6.4% con respecto a 1995. Mirando la figura 8 podemos observar que el principal consumidor de gas natural es el sector termoeléctrico (39%), seguido por el sector industrial (24.4%) y ECOPEPETROL (23.8%).

**Figura 8. Consumo de gas natural 1996**

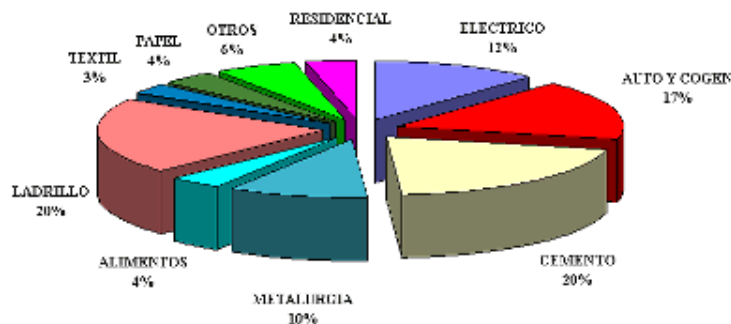


**4.1.2 Carbón.** Colombia cuenta con las mayores reservas geológicas de carbón en Latinoamérica, 6749 Mt de reservas medidas y 2323 Mt en la categoría de indicadas, con el 75% de estos totales en la Costa Atlántica.

La producción nacional de carbón fue de 29.7 millones de toneladas en 1996, con un incremento de 15.5% respecto a 1995. El 73% de esta producción provino de la gran minería a cielo abierto para exportación, en los yacimientos de la Guajira y Cesar. El resto de producción corresponde a yacimientos de mediana y pequeña minería ubicados principalmente en Cesar, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Norte de Santander. El carbón es el recurso más abundante en Colombia, la relación reservas producción es cercana a los 100 años.

El consumo de carbón en el país está concentrado en algunos subsectores industriales y en la generación de electricidad (figura 9). Durante 1996, se consumieron 4.8 millones de toneladas de carbón, con una disminución de 13.5% respecto al 1995, debido principalmente a la drástica reducción del consumo en el sector eléctrico y al estancamiento en el sector de la construcción.

**Figura 9. Consumo de carbón por sectores 1996**



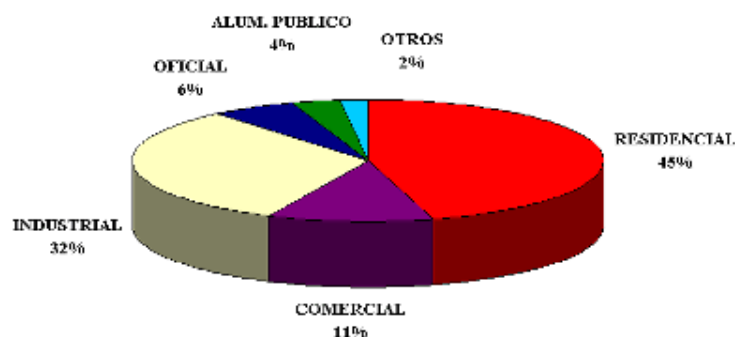
**4.1.3 Energía Eléctrica.** La generación de energía eléctrica fue de 43462 GW para el año 2001, de los cuales el 75.2% correspondieron a aportes hídricos y el 24.1% a térmicos.

Según el inventario sistemático de recursos hidroeléctricos en Colombia de 1975 se estimó un potencial técnico de 96 GW con proyectos que poseen una

capacidad superior a 100 MW. Sin embargo, la introducción de aspectos ambientales a partir de 1993 reducen este potencial a aproximadamente 50 GW y los aspectos económicos relacionados con la estructura del mercado mayorista de electricidad hacen que el potencial con factibilidad técnica, económica y ambiental se reduzca a cerca de 20 GW.

Durante 1996 la demanda de electricidad fue de 42815 gigavatios-hora, con aumento de apenas 1.5% respecto a 1995, que es la tasa mas baja de los últimos cinco años. Entre los factores explicativos de este moderado crecimiento se destacan: la desaceleración del crecimiento económico (49%), la sustitución de electricidad por penetración de gas (17%), el ahorro generado por los ajustes tarifarios, la alta hidrología (12%) y otros factores derivados (22%). La composición del consumo de energía eléctrica por sector económico se muestra en el figura 10. El sector residencial continúa siendo el de mayor participación (45.6%), seguido por los sectores industrial (32%) y comercial (11.4%).

**Figura 10 Consumo de energía eléctrica por sectores 1996**



**4.1.4 Petróleo y derivados.** El petróleo y sus derivados continúan siendo la principal fuente de abastecimiento de las necesidades energéticas. El consumo promedio de estos combustibles ascendió a 245266 barriles por día (Bd) en 1996, destacándose el consumo de gasolinas, de propano y del diesel. Para



atender las necesidades de gasolina, fue necesario importar en promedio 23527 bpd en 1996, e equivalentes al 18% del consumo

La producción de crudo en el año 2001 fue de 604.4 KBDC, de los cuales se tienen como producción directa 117.7 KBDC, como asociación 450.5 KBDC, como concesión 22 KBDC, y 14.15 KBDC de producción a sólo riesgo y pruebas, siendo esta última desarrollada por la compañía asociada.

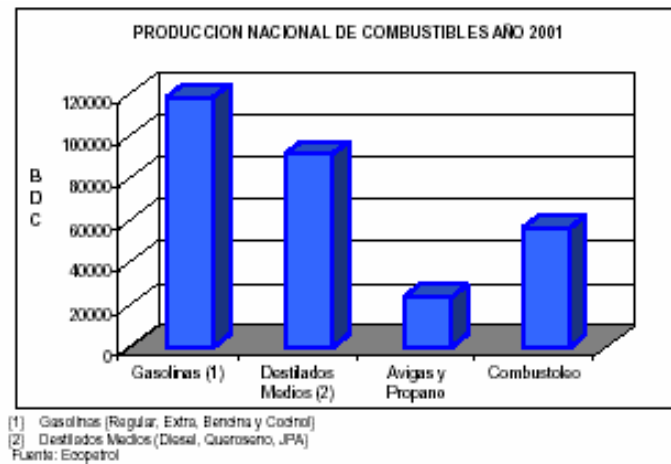
En el año 2001 la producción de petróleo promedio fue 604.4 KBDC, un 12% menor a la reportada para el año 2000. Las causas que generaron esa caída en la producción fueron:

Los 170 atentados al Oleoducto Caño Limón –Coveñas que no permitieron la producción de 24 MB de crudo, a la declinación natural de los campos de producción y la falta de incentivos del gobierno para invertir en búsqueda petrolera.

Las reservas probadas de petróleo eran a finales de 1996 del orden de los 2800 millones de barriles con una relación reservas/producción equivalente a 12 años. Estos volúmenes son todavía pequeños, manteniéndose arriba de los 10 años, si se comparan con otros países exportadores de petróleo.

En el año 2001 se cargaron a las refinerías de Ecopetrol 302.8 KBDC de crudo, siendo las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena las que más participaron sobre la carga.

En el año 2001 la producción de combustibles fue de 290.4 KBDC, siendo las Gasolinas (Regular, Extra, Bencina y Cocinol) los combustibles que más se produjeron con una participación del 41%, seguido por los Destilados Medios (Diesel, Queroseno, JPA) con el 31.5%. La participación del Combustóleo sobre la producción nacional de combustibles fue del 19.5%; mientras que la de Avigas y Propano fue de 8%.

**Figura 11. Producción nacional de combustible 2001**

**4.1.5 GLP:** Para el año 2001, la producción de GLP proveniente de las refinerías de Cartagena, Apiay y Barrancabermeja estuvo alrededor de los 23.3 KBDC, 4% superior al nivel del año 2000. De otro lado, igual que en el año 2000 no se realizaron importaciones de este combustible.

**4.1.6 Energías renovables.** Con relación a las energías renovables, el potencial para pequeños y medianos desarrollos hidroeléctricos es 'suficiente' Los recursos de biomasa son tal vez la segunda fuente renovable con mayor posibilidad de utilización. Nuestra condición de país ecuatorial hace del recurso solar una fuente promisoría cuando la tecnología para su aprovechamiento sea más competitiva. Finalmente, el país cuenta con recursos localizados para la utilización de la energía eólica y la geotermia.

**Biomasa.** El país cuenta con una diversa gama de recursos de biomasa que se pueden utilizar para la generación de energía eléctrica, entre los cuales el bagazo de la caña de azúcar ha tenido la mayor utilización en cogeneración. Este recurso que se halla disponible especialmente en el Valle del Cauca en donde existen 11 ingenios azucareros, los cuales proveen el 95% de la

producción nacional de azúcar, se obtiene a partir del corte y la molienda de la caña de azúcar, alcanzando cuatro millones de toneladas de bagazo anuales y 11.5 millones de toneladas al año en residuos.

El sector azucarero actualmente tiene instalados 80 MW en procesos de cogeneración, de los cuales el 81% son utilizados en el consumo propio. Por otra parte se ha estimado que este sector con los actuales niveles de producción de bagazo tendría un potencial entre 250 a 300 MW.

Un factor preponderante para el impulso de la generación de energía eléctrica a partir de este recurso es la prohibición a la quema abierta de los cañaduzales antes y después del corte (actividad que se hacía con el fin de facilitar la cosecha), a partir del 2005.

En cuanto se refiere a la leña, se estima que para el consumo energético en el país se destinan del orden de los 10 millones de toneladas al año. A nivel de energía primaria este volumen equivale a 43300 teracalorías y es similar al consumo de gas natural. El uso de biomasa como energía se concentra en el sector residencial rural y de pequeñas poblaciones, en la autogeneración de energía en el Valle del Cauca y en industrias rurales como los trapiches.

La oferta de biomasa leñosa, particularmente en lo que a la leña comercial se refiere, tiene incidencia en la deforestación, aunque las principales causas de esta última están más ligadas a la expansión de la frontera agrícola.

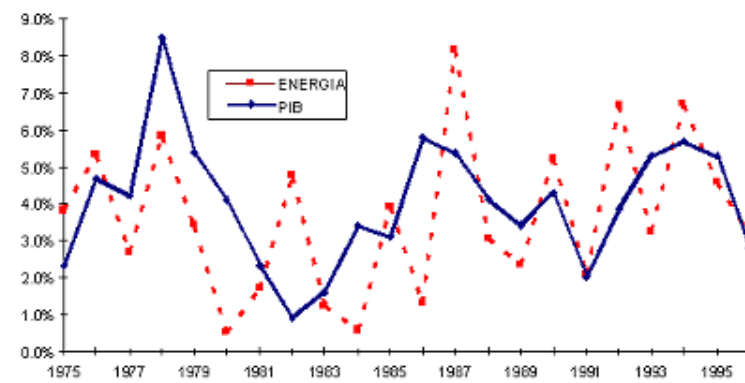
#### **4.2 ESCENARIO PARA EL 2020 [15]**

Desde finales de los años setenta, la recuperación en las inversiones en exploración y desarrollo de carbón y petróleo, produjeron un incremento de las actividades minero-energéticas, de forma que se elevó su participación en la economía nacional, se recuperó la autosuficiencia energética y se generaron

excedentes exportables. La producción de petróleo se ha convertido entonces en la principal fuente de crecimiento del PIB. Junto con el gas natural y el carbón provee considerables recursos fiscales y de divisas para la economía nacional.

Hay que tener en cuenta que según los análisis económicos realizados existe un factor proporcional entre el aumento del PIB (Producto Interno Bruto) y el sector energético y en especial el eléctrico (ver Figura 12), y aun así los índices económicos reflejan que la evolución económica del país no ha tenido un buen desempeño a partir del año 1995. La tendencia Antes de este periodo (los 10 años anteriores), teníamos una tasa de crecimiento del PIB mayor al 4% en promedio. Luego se desacelero este promedio hasta que en 1998 se presento un año de desaceleración económica con una tasa de crecimiento negativa es decir que la producción interna del país disminuyo, dejando el año 1999 como un periodo de recesión en el que las ventas de todos los productos y servicios disminuyo considerablemente. Ocasionando un encarecimiento en la compra de energéticos.

**Figura 12. Crecimiento del consumo de energía y del PIB 1975-1996**

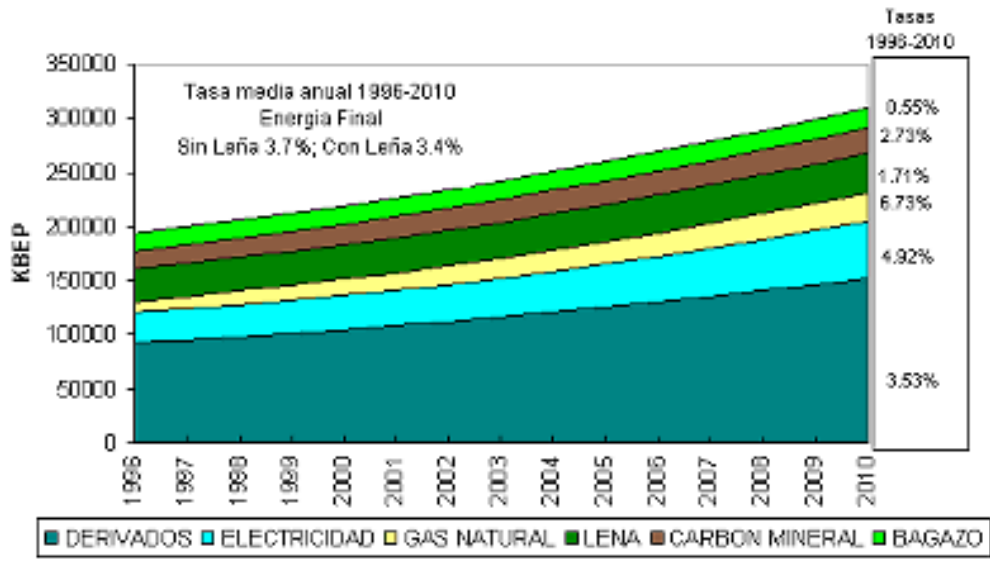


Además que se comienza a tener en cuenta el riesgo potencial que se le asocia al país debido a los ataques contra la infraestructura, originado nuevas necesidades de inversión en infraestructura y atención social. Además de los problemas de tipo estructural como lo es el déficit fiscal.

En los últimos años se ha registrado una disminución en la tasa de interés nominal llegando a niveles del 10% y fluctuara en los próximos años entre el (8% y 14%) y al parecer este tipo de tasa puede que sea no muy atractiva para los inversionistas extranjeros debido al factor de riesgo que implica invertir en Colombia demás la depreciación de la moneda que desde 1998 es alta repercute ya que continuamente esta perdiendo el sector energético debido a que las transacciones se hacen en dólares.

Actualmente la demanda de consumo de electricidad esta alrededor de un 62.5% del total de la capacidad instalada sobre esto tuvo también repercusión la disminución del PIB de Colombia ya que disminuyo la demanda interna. La UPME esperaba crecimientos de la demanda de energía eléctrica, a pesar del reciente historial colombiano de demanda.

**Figura 13. Consumo final de energía esperado para el 2010 en Colombia**



Cabe notar que estas proyecciones se toman con un crecimiento del PIB constante y lineal además sujeto a que el mercado de demanda de energía no va a variar.

Las reservas de petróleo han venido disminuyendo en los últimos años y aunque el país cuenta con algunas potencialidades no es claro el panorama a menos que se incremente la actividad exploratoria, lo cual va a depender de las mejoras de las condiciones económicas y de la solución del conflicto social y político. Esta situación ha impulsado el desarrollo de combustibles complementarios como los biocombustibles al menos a nivel de derivados.

Como ya se señaló las reservas de gas son importantes y han permitido adelantar con éxito el Plan de masificación diseñado y mantenido desde comienzos de la década de los noventa. En este momento se piensa en exportaciones de gas natural a Venezuela, Centroamérica y a Ecuador. Al igual que en otros países este será el energético de transición hacia las fuentes más limpias. El gas natural puede llegar a suplir la demanda rural como esta propuesto en las proyecciones a futuro y desplazar la demanda de leña y cocinol.

Gas Natural residencial: el gas natural para cocción y calefacción va a ir desplazando hasta la desaparición a la cocción y calefacción con leña, pues actualmente vemos que ha tenido mucha acogida y su expansión hasta ahora comienza, pero a pasos agigantados.

El carbón, seguirá muy probablemente siendo un producto netamente de exportación, aunque dadas las reservas con que cuenta nuestro país y su calidad, se deberían impulsar el desarrollo y adopción de nuevas tecnologías, como por ejemplo ciclos integrados de gasificación para la generación eléctrica, lo cual puede ser definitivo después de la liberación del precio del gas.

La innovación de métodos para producir energía eléctrica de forma eficiente y económica llegaría a desplazar la utilización de recursos no renovables en las plantas eléctricas.

El Gas licuado del petróleo puede ayudar a desplazar el consumo de leña a nivel rural.

Combustibles y GNV: El sector de combustibles es un sector que va a cambiar mucho en el transcurso de estos 18-20 años pues no es nueva la tendencia de que el sector petrolero en una mirada a futuro, está en serios problemas para proveer la demanda interna del país, por lo que tendremos que recurrir desde ya a crear un sistema con nuevos energéticos para cubrir la demanda vehicular e industrial del país, dentro de este esquema a futuro vislumbramos ciertos energéticos que son: Gasolina (su consumo va a ir decreciendo paulatinamente), GNV (su adopción especulamos que va a ser masiva), Diesel (va a ser adoptada por el transporte público e industrial), energéticos a base de alcohol (alternativa novedosa y competitiva).

En 18-20 años, nosotros visualizamos la globalización del GNV a nivel urbano, mientras que la gasolina corriente quedará rezagada en las regiones rurales, para el Diesel prevemos un próspero futuro pues cada vez va a ser mas adoptado en el sector transporte público e industrial dominando así este mercado ampliamente.

La entrada de otros combustibles a base de alcohol como en el caso de Brasil es evidente debido a que requerimos nuevas y manejables medidas de expansión y desarrollo energético a causa de los problemas de demanda que se avecinan para el sector del crudo, el comportamiento de este tipo de energético va a ser muy parecido al nivel que se maneja hoy en día para el GNV o quizás sea de una acogida superior.

Otros energéticos: Dentro de las especulaciones podemos ver la poca prosperidad de energéticos secundarios, posiblemente la biomasa salga bien

librada a lo largo de los años, pero la tendencia es que el consumo de leña, cocinol y gas propano (entre otros) a nivel urbano y rural se va a reducir por la expansión que va a tener el gas natural en estos sectores aunque sería de pronto más cuestionable el sector rural debido a posibles problemas de seguridad en la distribución regional, adicionalmente la energía nuclear será un energético que no va prosperar en nuestro país debido a los altos costos de producción y a los niveles de seguridad que maneja este tipo de energético y que muy seguramente no vamos a tener a nuestra disposición. La energía eólica y solar todavía van a estar crudas como para ocupar un lugar importante del mercado, pero sus precios bajarán considerablemente y será una opción viable para gente que quiera invertir en nuevas energías y que busque el cuidado del medio ambiente.

Energías alternativas: Para los siguientes 20 años se estima un crecimiento en la demanda de energías, alternativas, claro que este crecimiento será muy pequeño aproximadamente del 5%, debido a la notoria, pero no eficaz preocupación por el medio ambiente.

Se implementaran leyes que regulen y favorezcan a estas energías alternativas, logrando así su pequeño incremento. Mas sin embargo la perspectiva de la incursión del hidrogeno como energía alternativa, para este periodo, en Colombia es nula debido a su alto coste tecnológico.

Los consumos más dinámicos se seguirán concentrando en los sectores transporte e industrial. Se puede prever que la participación de los combustibles fósiles, principalmente del petróleo y sus derivados, siga siendo preponderante. Sin embargo, las reducciones en los ritmos de hallazgos de crudo y las preocupaciones por reducir tanto los niveles de contaminación como los subsidios otorgados a los combustibles utilizados por el sector automotor han desencadenado una actividad hacia la producción de biocombustibles.



### **4.3. COLOMBIA DEL 2020 EN ADELANTE**

Serán fundamentales las tendencias políticas a nivel ambiental, energético y social que se tomen durante las primeras décadas de este siglo, ya que estas determinarán la trayectoria de los panoramas energéticos a través del siglo 21.

Se prevee un constante aumento de la demanda, como es de esperarse para un país en vía de desarrollo. Así como también una creciente preocupación por el medio ambiente,

Debido a las grandes fluctuaciones que han regido al país durante las últimas décadas. Causadas por la inestabilidad social, política y económica de Colombia. El estudio de escenarios para periodos de tiempo más largo, se convertiría en un análisis muy incierto e imposible de analizar debido a la amplia e incierta gama de variables intrínsecas en el estudio para un país como Colombia. Debido a esto la UPME no ha desarrollado estudios de escenarios energéticos para periodos de tiempo más largos, ósea aquellos escenarios que superan el año 2020.

### **4.4 PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA**

La incorporación del etanol como oxigentente de la gasolina mas las posibilidades de producción de biodiesel a partir de oleaginosas como la palma africana y otras plantas nativas que permite la condición agrícola del país, hace que los procesos de biorefinación puedan ser etapas importantes para avanzar hacia la obtención del hidrógeno a partir de la gasificación de la biomasa. Adicionalmente, las reservas gas natural y de carbón y la disponibilidad de fuentes hídricas con buenas condiciones de renovación bajo un adecuado manejo refuerzan las posibilidades de producción de este combustible. Se requiere entonces comenzar una actividad de investigación y seguimiento de los desarrollos y avances a nivel mundial.

Debido a que Colombia es un país en vía de desarrollo y con problemas sociales y políticos profundos, no posee los recursos necesarios para invertir en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías.

Como ya hemos observado la economía del hidrogeno es altamente tecnificada en cada una de sus etapas (producción, almacenamiento, distribución) y su eficiencia depende mucho de la tecnología invertida. Por lo tanto Colombia va a tener que esperar a que se desarrollen e implementen estas tecnologías en el exterior, para luego tener que importarlas e implementarlas.

Colombia tendrá que enfrentar las dificultades que acarrea el atraso tecnológico, como lo es la falta de experiencia técnica del manejo de este nuevo sistema energético (descentralizado), también enfrentará ausencia de personal capacitado en el área, así como también tendrá que someterse a los precios que pongan, los países que exporten la tecnología que sea requerida.

Es de resaltar igualmente, que el país no es ajeno a los patrones de suministro y utilización de la energía, por lo que es importante examinar la participación de las celdas de combustibles y su incidencia en la configuración de sistemas distribuidos de energía. Por lo anterior creo que la incursión del hidrógeno en Colombia se podría dar paulatinamente empezando por el sector de transporte para luego seguir con el industrial, con amplio margen de diferencia temporal entre estas dos incursiones.

Si Colombia no quiere quedarse rezagada en estos cambios en el sector energético, tendrá que tener claro las tendencias políticas que quiere manejar en el sector energético, y aplicarlas durante las dos primeras décadas del siglo, periodo de tiempo el cual será clave para las futuras tendencia energética del siglo.

## 5. CONCLUSIONES

La dirección que se tome, en el sector energético, en las dos primeras décadas de este siglo determinaran el rumbo energético del resto del siglo tanto a nivel global como regional. Esto quiere decir que las medidas que sean necesarias implementar para lograr un desarrollo sostenible habrá que tomarlas muy pronto.

Para que el hidrógeno entre al sistema energético se requiere de un gasto económico significativo y de mejoras en el funcionamiento de las tecnologías que lo compiten. Debido a estos altos costos los primeros en implementar las tecnologías del hidrógeno serán los países desarrollados. También se requiere de la combinación de investigación, desarrollo y esfuerzos demostrativos. Por esto la economía del hidrogeno es a largo plazo, debido a su alto coste y al requerimiento de tiempo para asimilar e implementar las nuevas tecnologías.

Por el gran gasto económico requerido en la implementación de la economía del hidrogeno, se requerirá del apoyo gubernamental, con políticas y leyes que incentiven el uso de energéticos limpios, para que así sea posible su comercialización.

La incursión de la economía del hidrógeno en el mundo hará que el sistema energético mundial tenga cambios trascendentes, como lo son la total descentralización del sistema energético y el posible fin de los monopolios de transmisión de energía eléctrica.

La producción de hidrógeno primero se hará a partir de combustibles fósiles, competitivos en la actualidad, para luego ir cambiando paulatinamente a fuentes renovables (biomasa) lo cual conduciría, el sistema de producción, hacia una trayectoria sostenible a largo plazo. No obstante, si las metas de

reducción de la contaminación se hacen mas estrictas, es posible que esta trayectoria se modifique, acelerándose un poco la utilización de fuentes renovables para la obtención del hidrógeno; biomasa para la gasificación y agua o incluso geotermia para la electrólisis.

El sector que mayor posibilidades tiene para la implementación del Hidrogeno es el sector de transporte seguido del industrial con el uso de las celdas de combustible. Ya que la infraestructura que se requiere no es muy compleja y por lo tanto su implementación no es muy difícil. Claro que esta incursión será en principio para los países desarrollados, debido al coste que tiene su implementación.

Se prevee que el uso final de energéticos sólidos (Carbón, leña..), por los consumidores desaparezca a finales del siglo 21. Las fuentes de energía sólidas se convierten cada vez más y más en líquidas y orientadas a la canasta de portadores energéticos como lo son los gases de energía y la electricidad.

El gas natural es el paso intermedio entre los combustibles fósiles y lo no fósiles. A menos que se implementen serias medidas ambientales para la reducción de las emisiones de GHG<sup>16</sup>, aplicadas mundialmente, para que sean efectivas, en este caso el insumo principal seria la biomasa.

Creo que el grado de incursión del hidrógeno en los sistemas energéticos, y el grado de penetración en cada país dependerá, de varios factores como lo son; el desarrollo económico, el aumento de la demanda energética, las preocupaciones ambientales en la región, las tendencias políticas a nivel ambiental y energético, entre otros factores.

Para que se pueda implementar el hidrogeno en el mundo es necesario la incursión de una conciencia ambiental y se debe realizar en una sociedad que desee alcanzar el desarrollo sostenido. El desarrollo sostenible es una meta que debe buscar la humanidad. Para lograr alcanzar un desarrollo sostenible

---

<sup>16</sup> Emisiones de gases con efecto invernadero.

se requiere un cambio tanto en las formas usuales de política como en el pensamiento colectivo. Esto requerirá acciones conjuntas de políticas internacionales, de una forma como no se había visto con anterioridad, las cuales penalicen las emisiones de gases.

Debido a que Colombia posee una economía dinámica lo que origina grandes fluctuaciones, las cuales han regido al país durante las últimas décadas. También causadas por la inestabilidad social, política y económica de Colombia. El estudio de escenarios para periodos de tiempo más largo, se convertiría en un análisis muy incierto e imposible de analizar debido a la amplia e incierta gama de variables intrínsecas en el estudio para un país como Colombia.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] The hydrogen economy in the 21<sup>st</sup> century: a sustainable development scenario. *L. Barreto, A Makihira, K. Riahi*. 2001
- [2] Panorama de la inserción internacional de América latina y el caribe. CEPAL -1998
- [3] Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *Seth Dunn*, 2001
- [4] Energy Scenarios, *Nebojsa Nakicenovic* (Austria), 2000.
- [5] Hydrogen in the Energy Sector. Dr. Werner Zittel, Reinhold Wurster Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GMBH, 1996  
<http://www.hydrogen.org/Knowledge/w-i-energiew-eng.html>
- [6] Evaluación técnico-económica de la obtención biotecnológica de gas hidrógeno. *Claudio Andrés Álvarez Velden*, 2002.  
<http://www.cybertesis.cl/www-tesis/Tesis/CAvarez/CAvarez.PDF>
- [7] Infraestructura de uso de hidrogeno y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso, *Ulises Cano Castillo, Leonardo Rejón García, Mirna Ojeda Hernández*. 2001  
<http://www.iie.org.mx/bolEA00/tenden01.pdf>
- [8] Celdas de combustible hidrógeno / oxígeno. *Edgar Alberto Medina Bohorquez*, 2002.
- [9] <http://leo.worldonline.es/anroalmi/proyector0.htm>

[10] <http://ingenieria.udea.edu.co/investigacion/gea/VENTAJAS.html>

[11] <http://www.upm.es/informacion/revista/htdocs/n50/revista50-CRYOPLAN.html>

[12] An assessment of technological chance across selected energy scenarios. *Nebojsa Nakicenovic and K. Riahi*, 2002.

[13] Panorama energético internacional para el próximo siglo, *Leonardo Barreto, Angela Inés Cadena M, Erik Larsen, Rcardo A. Smith Q.*

[14] La economía de hidrógeno, *Jeremy Rifkin*

[15] [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)

[16] <http://cipres.cec.uchile.cl/~dreyes/>

[17] <http://www.emeres.cl/glosario.htm>

[18] <http://www.geoplastics.com/resins/es/techsolution/glossary/c1.html>

[19] [http://www.etseq.urv.es/DEQ/Doctorat/index/home/news/thesis\\_defense/abstract\\_cvalencia.htm](http://www.etseq.urv.es/DEQ/Doctorat/index/home/news/thesis_defense/abstract_cvalencia.htm)

## ANEXO HIDRÓGENO

Ya en el siglo XVI se había observado por parte de los alquimistas que cuando el aceite de vitriolo (nombre que éstos daban al ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ ) actuaba sobre las limaduras de hierro se desprendía un gas combustible cuya naturaleza era desconocida. Cavendish, en 1.766, observó que este gas era diferente de otros gases inflamables y le llamó *aire inflamable*, aunque se equivocó al suponer que procedía del metal y no del ácido. En 1.781 el propio Cavendish observó que cuando este gas ardía en el aire y en el oxígeno se formaba agua, descubrimiento que indujo a Lavoisier a llamarlo Hidrógeno, es decir *productor de agua*.

El hidrógeno fue licuado por primera vez en 1.898 por J. Dewar (1.842-1.923). Comúnmente se coloca en el grupo 1 de la tabla periódica aunque sus propiedades no tienen nada que ver con las de dicho grupo.

El hidrógeno es el elemento más ligero de la naturaleza, así como el más abundante en el universo. Se halla en las estrellas jóvenes, en polvo interestelar y en las nubes de gas suspendidas en el espacio, pero la mayor parte de él se encuentra formando diversos compuestos químicos. Presenta muy baja solubilidad en líquidos, pero una alta solubilidad en metales, especialmente en paladio. El Hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido, altamente flamable y no es tóxico. El Hidrógeno se quema en el aire formando una llama azul pálido casi invisible. El Hidrógeno es el más ligero de los gases conocidos en función a su bajo peso específico con relación al aire. Por esta razón, su manipulación requiere de cuidados especiales para evitar accidentes.

El Hidrógeno es particularmente propenso a fugas debido a su baja viscosidad y a su bajo peso molecular (peso molecular = 2.016). Es un combustible con un alto **CONTENIDO ENERGÉTICO**, que proporciona 28.6696 kcal por cada gramo, frente a 11.953 kcal/gr del gas natural, 10.780 kcal/gr de la gasolina,



10.932Kcal/gr del butano y 10.0792 Kcal/gr del propano. Es el tercer elemento más común (en la Tierra) después del oxígeno y el silicio. Como hidrógeno libre se le puede hallar en las emisiones volcánicas, como elemento químicamente combinado se halla presente en el agua (que es el elemento más abundante en la naturaleza). [17]

**Tabla 8. Propiedades del hidrógeno**

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Símbolo:                             | H   |
| Clasificación:                       | No metal grupo1                                       |
| Numero Atómico:                      | 1   |
| Masa Atómica:                        | 1,00794 uma <sup>17</sup>                             |
| Estructura electrónica               | 1s <sup>1</sup>                                       |
| Electrones en los niveles de energía | 1   |
| Punto de Fusión:                     | -259,14 °C  |
| Punto de Ebullición:                 | -252,87 °C  |
| Densidad:                            | 0,0001 g/cm <sup>3</sup>                              |
| Potencial Estándar de Electrodo:     | 0,00v 2H <sup>+</sup>   H <sub>2</sub> solución ácida |
| Conductividad Térmica:               | 0,18 J/m s °C   |
| Calor Específico:                    | 14421,00 J/kg°K                                       |
| Calor de Fusión:                     | 0,1 kJ/mol  |
| Calor de Vaporización:               | 0,9 kJ/mol  |
| Calor de Atomización:                | 218,0 kJ/mol de átomos                                |
| Estados de Oxidación:                | -1, +1  |
| 1ª Energía de Ionización:            | 1312 kJ/mol   |
| 1ª Afinidad Electrónica:             | 72,8 kJ/mol   |
| Radio Atómico:                       | 0,79 Å  |

<sup>17</sup> Para el hidrogeno ordinario de un protón en el núcleo

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| Radio Covalente:              | 0,32 Å                    |
| Radio Iónico:                 | H <sup>1</sup> = 2,08 Å   |
| Volumen Atómico:              | 14,4 cm <sup>3</sup> /mol |
| Polarizabilidad:              | 0,7 Å <sup>3</sup>        |
| Electronegatividad (Pauling): | 2,2                       |

Se conocen tres isótopos del hidrógeno: Hidrógeno, deuterio y tritio. El núcleo de cada átomo de hidrógeno ordinario se compone de un protón, siendo su masa atómica de 1. El Deuterio contiene un protón y un neutrón en el núcleo, siendo su masa atómica de dos. El Tritio un isótopo radioactivo inestable, contiene un protón y dos neutrones en el núcleo y tiene una masa atómica de tres.

**Tabla 9. Isótopos del Hidrógeno**

| <b>ISOTOPOS</b> |                           |                   |             |                       |                           |
|-----------------|---------------------------|-------------------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| <b>Z</b>        | <b>Nombre del Núclido</b> | <b>Vida Media</b> | <b>Spin</b> | <b>Abundancia (%)</b> | <b>Masa Atómica (uma)</b> |
| 1               | Hidrógeno                 | Estable           | 1/2         | 99,984                | 1,0078                    |
| 1               | Deuterio                  | Estable           | 1           | 0,0156                | 2,0141                    |
| 1               | Tritio                    | 12,3 años         | 1/2         | 0,00                  | 3,016                     |

## GLOSARIO

### **Biogás [17]**

El biogás es el gas producido durante el proceso de fermentación anaerobia (sin presencia de oxígeno) de la fracción orgánica de los residuos. Está compuesto principalmente por Metano (CH<sub>4</sub>) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), además de otros gases en cantidades trazas.

### **Catalizador[18]**

En sentido propiamente químico, el catalizador es un material que acelera una reacción sin formar realmente parte de la misma ni ser consumido por ella.

### **Endotérmico[18]**

Término que describe los agentes químicos de expansión que poseen características de absorción de calor. Estos agentes de expansión tienden a liberar cantidades menores de presión de gas, acortan los tiempos de enfriamiento, requieren menos tiempo de desgasificación y producen acabados superficiales más uniformes.

### **Estequiometría [18]**

Es una parte de la química que trata de los cambios matemáticos de fórmula molecular a fórmula-gramos, de fórmula-gramos a fórmula molecular, y de fórmula porcentual (análisis) a fórmula molecular.

### **Exotérmico [18]**

Término que describe los agentes químicos de expansión que poseen características de generación de calor. Estos agentes de expansión tienden a liberar cantidades mayores de presión de gas, extienden la duración del ciclo y aumentan las longitudes del flujo.

### **Fermentación [19]**

Un proceso de fermentación es un proceso químico en el cual se emplean microorganismos para obtener un producto en particular, aprovechando la selectividad de los microorganismos para producir un determinado compuesto. Los procesos de fermentación son llevados a cabo en un bioreactor. Un bioreactor es un recipiente en el cual microorganismos son cultivados de manera controlada y/o materia prima es convertida o transformada debido a reacciones biológicas.

**Metano (CH<sub>4</sub>): [17]**

Gas inodoro, incoloro, asfixiante, que puede explotar bajo ciertas condiciones de mezcla con aire y que puede producirse a partir de residuos sólidos cuando estos experimentan una descomposición anaerobia. Comúnmente conocido como gas natural.

**Metabolismo : [19]**

Conjunto de reacciones bioquímicas necesarias para la vida que se producen continuamente en las células vivas.