



Programa de la asignatura:

# Energía del hidrógeno

## U3

Economía y tendencias futuras  
de la tecnología del hidrógeno





## Índice

Presentación de la unidad .....	3
Competencia específica.....	4
Propósitos.....	4
3.1. Costos .....	5
3.1.1. Producción .....	5
3.1.2. Transporte .....	8
3.2. El hidrógeno y el ambiente .....	13
3.2.1. Sustentabilidad del hidrógeno .....	13
3.2.2. Generación de emisiones del hidrógeno como combustible .....	14
3.3. Tendencias tecnológicas .....	15
3.3.1. Economía del hidrógeno.....	15
3.3.2. Escenarios futuros.....	17
Cierre de la unidad .....	20
Fuentes de consulta .....	21



### Presentación de la unidad



Área geotérmica. Retomado de <http://www.inessman.com/>

Bienvenido(a) a la *Unidad 3. Economía y tendencias futuras de la tecnología de hidrógeno*. Al término de ella, contarás con las bases para estudiar la economía y tendencias del uso de la tecnología de hidrógeno.

Además, podrás analizar los costos asociados con la producción y el transporte del recurso. Asimismo, con el estudio de la sustentabilidad y la generación de emisiones del hidrógeno, podrás visualizar la economía y los escenarios futuros del hidrógeno como fuente de energía alternativa.

Para ello, tendrás que asociar los conocimientos adquiridos en las unidades anteriores, ya que así podrás realizar un diagnóstico en la producción, almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno, con lo cual tendrás los elementos para visualizar las tendencias futuras del recurso.



## Competencia específica



### Unidad 3

**Analizar** la tecnología en la generación del hidrógeno para determinar costos en la transformación de la energía del hidrógeno en energía eléctrica mediante dispositivos de conversión de energía, procesos biológicos y fisicoquímicos.

## Propósitos

**1** **Identificar** los costos asociados con la producción y el transporte del hidrógeno.

**2** **Identificar** la relación entre el hidrógeno y el ambiente.

**3** **Identificar** las tendencias tecnológicas del hidrógeno.



### 3.1. Costos

Como se trató en la unidad 2, los diversos aspectos a considerar en el desarrollo de las tecnologías de hidrógeno tienen relación con las diversas formas de producción, almacenamiento, utilización e infraestructura (Pineda, 2009). Respecto a la producción de hidrógeno, grandes centrales de reformado de metano (SMR, por sus siglas en inglés) son la primera fuente de suministro de hidrógeno y continuarán siendo la opción más atractiva económicamente para la producción a corto plazo. La incorporación de tecnologías de secuestro de CO<sub>2</sub> puede contribuir considerablemente a reducir las emisiones provenientes de combustibles fósiles. Por otra parte, el desarrollo tecnológico en producción, mediante SMR, ha seguido progresando, disminuyendo costos de producción y mejorando en aspectos como pureza y eficiencia.

#### 3.1.1. Producción

J. A. Botas, J. A. Calles, J. Dufour y G. San Miguel (2005) destacan que, desde el punto de vista de la producción del hidrógeno, hay que considerar que los métodos actuales resultan costosos y se basan principalmente en la gasificación de combustibles fósiles a altas presiones y temperaturas. Los procesos basados en energías renovables o energía nuclear no se encuentran suficientemente desarrollados y, a nivel industrial, su costo es aún mayor. Por otro lado, para dar respuesta a una demanda global de este tipo de energía, se necesitaría el desarrollo de un sistema de distribución de hidrógeno similar al que existe hoy en día para la gasolina.

Para establecer los costos de producción, se tomará un extracto de la tesis de S. Juárez (2009), el cual señala que establecer los costos de producción de hidrógeno no es un asunto sencillo, debido a la multiplicidad de factores que intervienen en su determinación. Consideraciones de carácter internacional, local, económico, político, geográfico, legislativo; la mayoría de éstas (en continuo cambio) y de aquellas inherentes al proceso o método de producción están presentes en el monto total de desembolso económico necesario para generar hidrógeno (Ortega y François, 2007); no cabe duda de que son una de las razones con mayor peso al momento de tomar decisiones.

Algunos escenarios que describen elocuentemente la volatilidad o variabilidad propia de los costos de producción de hidrógeno están ligados a los precios de la materia prima y a las tarifas de los servicios demandados. Por ejemplo, los procesos de reformación con



frecuencia emplean hidrocarburos como materia prima, los cuales son compuestos derivados del petróleo, manufacturados por la industria petroquímica.

Los precios del petróleo han experimentado cambios sustanciales en breves lapsos de tiempo y, con ello, han impactado directamente en cada eslabón de su larga y dominante cadena de influencia. Hasta hace algunos meses se ubicaban en o por encima de la barrera de los cien dólares americanos por barril, cifra que se incrementaba día con día, imponiendo máximos históricos, haciendo pensar que incluso podría doblar su valor, es decir, llegar a los doscientos dólares americanos por barril. Sin embargo, las circunstancias condujeron a una situación totalmente opuesta, el acelerado desplome de los precios del petróleo significó, en algunos casos, la pérdida de casi la mitad de su valor máximo de fechas anteriores.

Dentro del rubro de los servicios demandados se encuentra, junto con otros tantos, el servicio de suministro de energía eléctrica. Técnicas de generación de hidrógeno como la electrólisis con energía eléctrica convencional, tomada de la red eléctrica, deben un porcentaje significativo de su costo de producción al consumo de energía eléctrica (Moriarty y Honnery, 2007).

Las tarifas del servicio de energía eléctrica difieren dependiendo de los distintos países e incluso dentro de una misma nación. A menudo están subordinadas a las fluctuaciones de los precios de los activos, como el petróleo por nombrar alguno; otra posibilidad es que el costo real por el suministro de la energía sea parcialmente subsidiado por el gobierno de un país, como ocurre actualmente en México, aminorando el importe a pagar por este concepto.

Existen condiciones que podrían contribuir a disminuir los costos de producción de hidrógeno. Una de ellas tiene su origen en el comportamiento económico de las innovaciones tecnológicas. Cuando una novedad tecnológica, que cuente con un potencial de comercialización promisorio, consigue transcurrido el tiempo necesario, popularizarse en la mayoría de los sectores de una sociedad **que es consecuencia de una notoria reducción en su precio de adquisición**, es decir, conforme transcurre el tiempo las tecnologías novedosas experimentan un fenómeno de depreciación gradual, conectado a factores como los métodos de producción, materiales utilizados, tamaño, ritmo de producción, oferta, demanda, etcétera. Se puede pronosticar que, en el supuesto de que la demanda de hidrógeno se equipare a la demanda actual de hidrocarburos, la tecnología de producción y el aprovechamiento de ésta tendrán una evolución como la arriba descrita.

Por otra parte, la labor de investigación y desarrollo podría rendir frutos que se traduzcan en nuevas metodologías de producción de hidrógeno económicamente más atractivas



(Marbán y Valdés-Solís, 2007) o en un perfeccionamiento de los esquemas actuales de producción de hidrógeno, que ataque áreas específicas, como la disminución de las pérdidas de energía –aumentar la eficiencia–, y en la búsqueda de materiales equivalentes de menor precio; opciones que individualmente o en conjunto representan un beneficio económico directo.

En síntesis, los costos de producción de hidrógeno plantean el desembolso económico necesario para generar cierta cantidad de este recurso y cambian de acuerdo con el proceso o método de producción (Tabla 1), en el cual convergen aspectos como el costo anual de mantenimiento, el consumo de energía, los costos de la materia prima, los procesos de pretratamiento, la purificación, la recuperación, la captación de dióxido de carbono, entre otros.

Proceso de producción	Costo de producción (calculado al 2009)	Unidades
Reformación de gas natural	€ 0.34	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
Electrólisis con electricidad convencional	€ 0.25	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
Electrólisis con electricidad de bajas emisiones de CO <sub>2</sub>	€ 0.29 – 0.39	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
Bio-proceso de dos etapas (fermentación oscura – foto-fermentación) utilizando biomasa	€ 0.27	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
Reformación de bio-metano	€ 0.34	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
Electrólisis con electricidad generada a partir de energía eólica	€ 0.27	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
Electrólisis con electricidad generada a partir de celdas fotovoltaicas	€ 3.17	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
Fermentación oscura de biomasa	€ 0.36	Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
	€ 3.96	kg de H <sub>2</sub>
Gasificación de carbón	US\$ 1.10	kg de H <sub>2</sub>
Celda de combustible en funcionamiento inverso	Costo de la celda de combustible Costo del suministro de energía eléctrica	
Gasificación de biomasa y reacción de intercambio	US\$ 10.50 – 16.34	GJ de H <sub>2</sub>
Pirolisis de biomasa	US\$ 4.35	kg de H <sub>2</sub>
Rompimiento térmico de la molécula del agua utilizando energía nuclear	US\$ 1.87	kg de H <sub>2</sub>
Algas fotosintéticas –mutación de <i>Rhodobacter Sphaeroides</i>	¥ 274.30 – 669.97	m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub>
	US\$ 219.43 – 536.92	GJ de H <sub>2</sub>

Nm<sup>3</sup>, metro cúbico normal (temperatura de 0 °C, presión de 1 atm)

Tabla 1. Costos estimados de producción de hidrógeno de algunos de los métodos más representativos. Adaptada de Vrije y Claassen (2005)., Sørensen (2005) y Pant y Gupta (2009a).



### 3.1.2. Transporte

León (s. f.) señala que el hidrógeno está destinado principalmente a su utilización en pilas de combustible. Las pilas se pueden utilizar tanto en aplicaciones estacionarias como móviles. En el uso estacionario, las pilas PEM (*Proton Exchange Membrane*, por sus siglas en inglés; en español: combustible de membrana polimétrica) son la solución más económica, con un precio entre 0.25 y 0.3 \$/KWh a 20 \$/GJ de hidrógeno. Se espera que el costo se reduzca en el futuro a 0.09-0.095 \$/KWh por la producción en masa y el abaratamiento del combustible. También se espera un gran desarrollo para las pilas MC (protocolo a base de hidrógeno), con unos precios entre 0.06 y 0.12 \$/KWh.

Por sus características, las pilas PEM son las más adecuadas para los vehículos de pilas de combustible. Estos vehículos presentan un rendimiento mejor que los vehículos convencionales (40% frente 14%), con una economía de combustible de 60 mpg de gasolina equivalente. Pese a tener un costo inicial muy alto, tienen una mayor vida útil y costos de mantenimiento menores.

El uso del hidrógeno como vector energético hace necesario que pueda ser almacenado y transportado. Como se indicó en la unidad 2, los principales métodos de almacenamiento son gas comprimido, hidrógeno líquido e hidruros metálicos.

El gas comprimido es la alternativa más económica para almacenar hidrógeno a corto plazo (uno a tres días), mientras que para periodos más largos (30 días) la mejor solución es el almacenamiento de hidrógeno en forma de líquido. El almacenamiento en hidruros metálicos resulta mucho más costoso, sin embargo, se considera el método más seguro de almacenamiento e, incluso, puede resultar económico para cantidades pequeñas de hidrógeno y cortos periodos, como se visualiza en la Tabla 2. Actualmente, se están desarrollando otros métodos de almacenamiento como las estructuras de carbono (León, s. f.).



Sistema de Almacenamiento/ Tamaño (GJ)	TCI Especifico (\$/GJ capacidad)	Costo de almacenamiento (\$/GJ)
<b>Gas Comprimido</b> Corto plazo (1-3 días)		
131	9,008	4.21
13,100	2,992	1.99
20,300	2,285	1.84
130,600	1,726	1.53
Largo plazo (30 días)		
3,900	3,235	36.93
391,900	1,028	12.34
3,919,000	580	7.35
<b>H<sub>2</sub> Líquido</b> Corto plazo (1-3 días)		
131	35,649	17.12
13,100	7,200	6.68
20,300	1,827	5.13
130,600	3,235	5.26
Largo plazo (30 días)		
3,900	1,687	22.81
391,900	363	8.09
3.9 millones	169	5.93
<b>Hidruro Metálico</b> Corto plazo (1-3 días)		
131-130,600	4,191-18,372	2.89-7.46
Largo plazo (30 días)		
3,900-3.9 million	18,372	205.31

Tabla 2. Costos relacionados con el almacenamiento del hidrógeno. Tomada de León (s. f.).

Como ya se indicó, el hidrógeno puede ser transportado por tubería, camión, tren o barco. El método que se elija en cada caso depende principalmente de la distancia y la cantidad que se transportará.

El transporte por tubería es el más adecuado para largas distancias, entre 160 y 1,600 km. El costo de transporte por tubería aumenta con la distancia, mientras que disminuye con el aumento de la tasa de transmisión empleada; siendo de 1.5 GW la óptima, sus valores se encuentran en los márgenes de 0.5 y 3.5 \$/GJ para distancias entre 161 y 1,600 km, respectivamente.

En el caso del transporte en tren y en camión, el hidrógeno puede ser transportado de varias maneras: gas comprimido, hidrógeno líquido o hidruros metálicos. En ambos casos, el método más económico es el transporte de hidrógeno líquido, mientras que el de hidruros metálicos es el más caro. De estas dos tecnologías, el transporte en tren es más adecuado para largas distancias (>900 km) y el transporte en camión para distancias menores.

El transporte en barco es el método más caro de todos y sólo es factible para el hidrógeno líquido debido a los largos tiempos de viaje. El costo de transporte en barco depende principalmente de la distancia recorrida y no tanto de la cantidad transportada; será más caro cuanto mayor sea la distancia de viaje.

Una de las ventajas del hidrógeno es que su producción puede ser centralizada o *in situ* y, aunque tenga costos de producción mayores, no tiene costos de transporte. En primer



lugar, se analiza la producción *in situ* para una estación de repostaje con varios métodos de producción: SMR, electrólisis alcalina, electrólisis PEM y electrólisis de vapor; asimismo, para uso residencial con producción por SMR o electrólisis. Para ambos escenarios, la SMR ofrece mejores resultados que la electrólisis; por su parte, la electrólisis de vapor es la más económica.

En el caso de la producción centralizada, se estudia una estación de repostaje con un suministro de hidrógeno desde la producción de hidrógeno líquido por camión o comprimido. En este caso, la opción de hidrógeno líquido resulta más económica que la de gas comprimido cuanto más aumenta el tamaño de la estación.

Al comparar la producción centralizada y la *in situ*, la primera tiene costos menores que la producción *in situ* por electrólisis; sin embargo, la producción *in situ* resulta más económica que la centralizada en estaciones de pequeño tamaño.

Sánchez, Elices, Salva, Sánchez, Kindelán y Cardona (1977) realizan un estudio estimativo del costo del transporte de energía, utilizando hidrógeno como medio de transporte y comparándolo con el costo correspondiente cuando se utiliza gas natural. El estudio se realiza con base en precios actuales en España, por lo que tiene interés comparativo con estudios similares realizados en el extranjero los últimos años.

La primera hipótesis de partida consistirá en considerar únicamente el transporte por tuberías de hidrógeno gaseoso, no se considera al hidrógeno licuado, por cuanto el hidrógeno licuado; aun cuando el costo de transporte es sensiblemente inferior, ya que el costo de licuación es tan elevado que sobrepasa con mucho la ventaja económica que se obtiene en el transporte. No obstante, puede ser que en el futuro se utilice con frecuencia el sistema de transporte de hidrógeno líquido, pero, en tal caso, ello será debido a exigencias de la utilización o quizás del almacenamiento, nunca motivado por el costo del transporte.

La segunda hipótesis es que el análisis se centra exclusivamente en el estudio del problema del transporte de caudales grandes o medios, y a grandes distancias, en relación con las dimensiones del país, dejando a un lado la distribución de pequeños caudales a distancias reducidas, que está más ligada al problema de la utilización del hidrógeno.

El método de cálculo es el siguiente:

En el cálculo de las pérdidas de presión, se utilizan las fórmulas generales de los gases, donde se emplea, como coeficiente de rozamiento, el propuesto por Weymouth, por su



extremada sencillez y por haber sido comprobado experimentalmente con gas natural, a falta de fórmulas comprobadas para el caso del hidrógeno.

La fórmula que da el caudal es:

$$Q = 4.199 \times 10^4 P_1 \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{1}{c^2}\right) D^5}{\rho l \lambda T Z}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$Q$  Es el caudal de gas en  $\text{m}^3/\text{s}$  (0 °C, 760 mm Hg).

$P_1$  Es la presión en el comienzo de la tubería en pascal ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).

$c$  Es la razón de compresión entre la presión  $P_1$  en el comienzo de la tubería y  $P_2$  en el final.

$D$  Es el diámetro de la tubería en metros.

$\rho$  Es la densidad del gas en  $\text{Kg}/\text{m}^3$  (0 °C, 760 mm Hg).

$l$  Es la longitud de la tubería en metros.

$T$  Es la temperatura absoluta del gas en °K.

$Z$  Es el factor de compresibilidad del gas.

$\lambda$  Es el coeficiente de rozamiento de Weymouth, su valor es:

$$\lambda = 0.00941 D^{-1/3} \quad (D \text{ en metros}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Al sustituir el valor de  $\lambda$  en (1) se obtiene:

$$D = 7.698 \times 10^{-3} \left[ \frac{Q^2 \rho T Z l}{P_1^2 \left(1 - \frac{1}{c^2}\right)} \right]^{3/16} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Por otro lado, la potencia necesaria para la impulsión en HP está dada por la expresión:

$$P = \frac{\rho Q Z R T (c^\psi - 1)}{735 \eta \psi} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$R$  es la constante universal de los gases perfectos en  $\text{J}/\text{Kg}$ ,  $\eta$  es la eficiencia de la instalación y  $\psi$  es una constante del gas considerado igual a:



$$\psi = \frac{k - 1}{k} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde k es la relación de calores específicos del gas o del coeficiente adiabático:

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Finalmente, la última expresión que se necesita es la que proporciona el espesor necesario de la tubería, en función del diámetro, de la presión máxima de trabajo y de la tensión máxima admisible en el material:

$$t = \frac{P_1 \cdot D}{2 \sigma} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

### Datos para el cálculo

Para el cálculo se consideran los datos recogidos en la Tabla 3:

Dato	Hidrógeno	Metano
Densidad $\rho$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	0.08987	0.7168
Coeficiente $\psi$	0.289	0.237
Poder calorífico ( $\frac{Kcal}{m^3}$ )	2600	8600
Factor de compresibilidad Z	1.03	0.88
Constante de los gases perfectos $R$ ( $\frac{J}{Kg}$ )	4122	518.34

Tabla 3. Datos de cálculo para determinar los costos.

Asimismo, en todos los cálculos se supondrá:

- Una temperatura media de 10 °C, es decir, 283 °K.
- Una eficiencia de compresores  $\eta = 0.8$ .
- Una utilización del sistema de 8,000 horas anuales.
- El material de la tubería será acero de límite elástico  $42 \frac{Kg}{mm^2}$ , con lo que la tensión admisible será 274.4 MPa.



### 3.2. El hidrógeno y el ambiente

La revista *Ambientum* (2003) redacta que el hidrógeno se vislumbra como fuente energética sustitutiva de los combustibles fósiles, especialmente en el sector de la automoción.

Si la vía de utilización del hidrógeno como sustituto de los combustibles fósiles avanza con éxito, esta misma fuente afectará enormemente a otros campos como al de la energía eólica, a los paneles solares, la industria química, la industria general y al transporte de todo tipo.

Daimler Chrysler, General Motors, BMW, Ford y Fiat ya están inmersos en la carrera del combustible del futuro. La mayoría de los fabricantes se decanta por vehículos movidos mediante motores eléctricos y alimentados con pila de combustible de hidrógeno, como alternativa al petróleo.

#### 3.2.1. Sustentabilidad del hidrógeno

La tecnología del hidrógeno estudia el uso de este elemento químico como combustible limpio para generar energía eléctrica o térmica. Su gran ventaja medioambiental radica en la reducción de emisiones contaminantes de CO<sub>2</sub>, óxidos de nitrógeno y azufre; asimismo, no consume recursos naturales y es abundante en el universo (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2014).

La tendencia tecnológica en la producción de hidrógeno es, evidentemente, hacia la forma sustentable; es decir, empleando materia prima renovable y fuentes de energía también renovables.

Vale la pena mencionar que, si bien, el hidrógeno obtenido a partir de fuentes renovables de energía constituye el eje de un sistema verdaderamente limpio y sustentable, algunas de las tecnologías, que pueden hacer este escenario una realidad, están todavía bajo desarrollo e implementación. Sin embargo, estas tecnologías son cada vez más maduras y los cambios tendrán que llegar. Al conjunto de estas tecnologías de producción, almacenamiento y usos del hidrógeno como combustible se le conoce como las tecnologías del hidrógeno, las cuales ayudarán a realizar el tránsito de una actual economía basada en el petróleo, a otra nueva economía basada en el uso del hidrógeno. La transición a esta nueva economía es gradual y contundente.



En este proceso de transición, existen diversas oportunidades tecnológicas que como país debemos aprovechar, ya que, al no existir conceptos universales sobre la manera de integrar los sistemas energéticos basados en el uso de hidrógeno como combustible, México tiene la oportunidad de realizar sus propias propuestas. Además, nuestro país, considerándolo en vías de desarrollo, es más propicio para la transformación del sector energético tradicional. Al igual que otros países, México tiene una de las tasas más grandes de crecimiento de demanda eléctrica, lo cual abre la posibilidad de satisfacer dicha demanda con estas tecnologías basadas en fuentes renovables de energía.

Por ejemplo, la celda de combustible utiliza de una manera más limpia y más eficiente el hidrógeno, recombina el hidrógeno y el oxígeno para producir energía eléctrica, obteniendo como único subproducto agua pura. Además, actúa como un electrolizador funcionando al revés. La agrupación de la celda de combustible, el electrolizador, el almacenaje de hidrógeno y la fuente de energía renovable constituyen el "ciclo de hidrógeno renovable".

Por tal motivo, se deben realizar diversas acciones que promueva el desarrollo de estas tecnologías, las cuales deberán permitir la formación de recursos humanos y actividades de vinculación entre el sector productivo y la academia, para la implementación y elaboración de proyectos que permitan la difusión e integración de las tecnologías del hidrógeno. En este sentido, es necesario establecer políticas públicas que contribuyan al desarrollo, investigación e innovación en de esta fuente de energía (Fernández y Cano, 2014).

Actualmente, el costo inicial es el mayor obstáculo que presenta esta tecnología. Los sistemas de celda de combustible tienen un costo aproximado de U\$S 5000/kilovatio. El costo tendrá que rebajarse hasta \$1.500 USD o menos para competir con las otras tecnologías para la generación de energía eléctrica *Ambientum* (2003).

### 3.2.2. Generación de emisiones del hidrógeno como combustible

Fierro, Gómez y Peña (s. f.), en *El hidrógeno: un vector energético no contaminante para automoción* indica que "la disminución progresiva de las reservas de combustibles fósiles y los problemas de contaminación ambiental asociados a su combustión han atraído la atención de los investigadores hacia la búsqueda de vectores energéticos alternativos para automoción. El hidrógeno es uno de estos vectores que tiene grandes ventajas: emisiones no contaminantes, excepto para algunas relaciones H<sub>2</sub>/aire, donde la temperatura elevada de la llama produce concentraciones significativas de NO<sub>x</sub> en la combustión. Además de la combustión directa, muy recientemente se ha empezado a desarrollar una tecnología basada en pilas de combustibles en las que se transforma la



energía química, almacenada en el enlace H-H de la molécula  $H_2$ , en energía eléctrica y vapor de agua”.

### 3.3. Tendencias tecnológicas

Tomando en cuenta las posturas de Kammel, (s. f.). Linares, (s. f) y Estrada, (2010), los recursos económicos han alimentado los avances tecnológicos producidos desde la *Revolución industrial* hasta la época actual. Para que este crecimiento continúe, se requerirá de un abastecimiento continuo de energía a bajo costo, que sea sustentable con los recursos actuales.

Por otro lado, las preocupaciones alrededor de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de fuentes de combustibles fósiles están concibiendo nuevas formas de generar esa energía. Así que se fórmula la posibilidad de tener fuentes de energía renovables en un futuro, libre de contaminación, desde las redes de energía eléctrica hasta los vehículos particulares.

Con escenario, es probable que el hidrógeno forme parte de estas fuentes de energía; ya que una molécula de hidrógeno ( $H_2$ ) en presencia de oxígeno puede convertirse en agua, con liberación de energía en forma de calor y trabajo.

Ante este contexto, México requiere un cambio de paradigma energético, que lo lleve a utilizar fuentes de energía alternativas (EA), las cuales son la solución a la problemática del agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles, promoviendo así un desarrollo sostenible.

Por ello, resulta importante abordar los temas sobre la economía del hidrógeno y las tendencias futuras.

#### 3.3.1. Economía del hidrógeno

La economía del hidrógeno es un sistema que utiliza al hidrógeno como un medio de transporte de energía en el ciclo de abastecimiento energético. El término evoca una visión de aprovechamiento energético en el futuro, que es sustentable y amigable con el medio ambiente. Esta visión lleva la tendencia de emplear fuentes energéticas que produzcan cada vez menos carbono.



Para el desarrollo de esta sección, se ha tomado en cuenta lo indicado por Linares, J. y Moratilla, B. (s. f.), que muestra que el término *economía del hidrógeno* fue empleado por primera vez por General Motors en 1970, y supone modificar totalmente el modelo energético actual basado en combustibles fósiles, reemplazando éstos por el hidrógeno.

Esta idea se basa en que el hidrógeno puede producirse a partir de recursos autóctonos, de forma económica y respetuosa con el medio ambiente, logrando además que las tecnologías de uso final del hidrógeno proporcionen una mayor seguridad en el suministro y una mayor calidad ambiental.

En el mismo orden de ideas, la demanda energética mundial, estimada en unos 10.000 millones de toneladas equivalentes de petróleo, se ve cubierta en más de 87% por combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural. Esta dependencia tiene importantes repercusiones, tanto económicas como ambientales. Por el lado económico, cabe destacar que su producción centralizada en determinadas zonas del mundo está gobernada por factores esencialmente políticos, lo que da como resultado precios volátiles y elevados. Asimismo, en ausencia de alternativas viables, el agotamiento de las reservas de petróleo, estimadas en no más de 40 años, finalizará en un encarecimiento progresivo hasta niveles que afecten el desarrollo económico global.

Desde el punto de vista ambiental, la combustión de combustibles fósiles constituye el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono), responsables del calentamiento global que sufre nuestro planeta.

Esta situación no resulta sostenible a mediano plazo. Desde las administraciones públicas se apunta, de forma insistente, la necesidad de preparar una transición controlada hacia una nueva forma de producción y consumo energético, que sea limpio, seguro y fiable). Una de las respuestas a esta crisis que se avecina es el uso de hidrógeno como fuente de energía y su transformación en electricidad por medio de las llamadas pilas de combustible.

Así, el término *economía del hidrógeno* responde a una visión de futuro, donde este gas, generado de forma limpia y económica, serviría para alimentar la mayor parte de las necesidades energéticas de la sociedad. Esta propuesta reduciría la dependencia actual a los combustibles fósiles, ya que el hidrógeno podría ser generado a partir de otras fuentes primarias, como las renovables o la nuclear. Igualmente, se disminuiría la contaminación atmosférica y la emisión de gases de efecto invernadero, puesto que el único residuo generado por una pila de combustible es agua.



Asimismo, la economía del hidrógeno posibilita una enorme redistribución del poder, con consecuencias trascendentales para la sociedad; teniendo una incidencia en la hegemonía que se ha manejado en el petróleo. Además, demuestra el potencial que tiene el hidrógeno en la reducción de emisiones de dióxido de carbono y para mitigar los efectos del calentamiento global (como se ha indicado en párrafos anteriores). La abundancia del hidrógeno en el planeta y su poder energético son inagotables.

La economía del hidrógeno, como red, está compuesta por tres etapas funcionales:

- Producción
- Almacenamiento
- Uso

Aunque se están realizando importantes avances tecnológicos, la implantación de la economía del hidrógeno no es inmediata y se requiere aún dar respuesta a los retos tecnológicos, económicos y sociales que se describen a continuación.

La tendencia que se ha seguido es asociar la implantación del hidrógeno con el auge de la generación distribuida, que no es sino el conjunto de pequeñas plantas generadoras de electricidad situadas cerca del usuario final o en su mismo emplazamiento, que pueden estar integradas en una red, o bien, funcionar de manera autónoma.

Los avances necesarios para lograr una economía basada en el hidrógeno son enormes, particularmente en lo que respecta al reemplazo de los actuales motores de combustión interna, alimentados con gasolina o diesel para el transporte personal.

### 3.3.2. Escenarios futuros

Kamel, (s. f.) y Valero, (2010), indican que algunos países (Estados Unidos, la Unión Europea, Islandia, entre otros) están financiando proyectos destinados a que el mundo entero adopte un sistema de energía amigable con el medio ambiente.

Existen dos propuestas importantes para la industria del petróleo y el gas:

1. La captación y almacenamiento del carbono para mitigar el impacto de los combustibles fósiles sobre el medio ambiente.
2. Convertir el hidrógeno en un portador energético fundamental y así tener un cambio esencial en la industria energética.



Por otro lado, el hidrógeno se podría convertir en una alternativa para el almacenamiento del exceso de energía proveniente de fuentes que utilizan viento y la energía solar para su uso en climas cálidos o nublados.

Si bien, la progresión de las fuentes de combustible se traduce en menos CO<sub>2</sub> por unidad de energía liberada, el consumo mundial de energía se ha incrementado en forma aún más rápida. Como resultado, se prevé que aumente la producción indeseada de CO<sub>2</sub> gaseoso de efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global.

Es improbable que la cantidad de CO<sub>2</sub> que se genera anualmente se reduzca en las próximas décadas, porque los hidrocarburos seguirán siendo la fuente de combustible prevaleciente.

También, un hecho de vital importancia es que los recursos de combustibles fósiles son finitos y, con el tiempo, su recuperación se volverá costosa. Es seguro que, a medida que el precio de la gasolina aumente, se requerirán fuentes de energía portátiles, como el hidrógeno o las baterías.

El próximo paso es la eliminación del carbono de la fuente de energía; por tanto, las llamadas “fuentes de energía verdes” o amigables con el medio ambiente han tenido auge, donde se ha dado particular interés en que la molécula de hidrógeno sea una fuente de energía verde.

Los gobiernos y las instituciones privadas han designado varios corredores de autopistas para demostraciones que impliquen el uso de hidrógeno; por ejemplo, California, Florida, Columbia Británica, Canadá y Alemania.

A pesar de estas actividades, un mundo basado en la economía del hidrógeno no es una decisión sencilla. Las compañías involucradas en el desarrollo de estas tecnologías y en su colocación en el mercado reconocen los obstáculos con que deben enfrentarse. Se podría llegar a desarrollar una solución tecnológica alternativa para el control de las emisiones de gases de efecto invernadero y la declinación de las reservas de combustibles fósiles.

Es probable que el futuro abastecimiento energético esté representado por una combinación de diversas fuentes, incluyendo los combustibles fósiles, la energía nuclear y la energía verde, con el hidrógeno y la electricidad como medios de transporte de energía.

De acuerdo con Estrada, (2010), el escenario en México respecto a esta temática es que las actividades de investigación y desarrollo son realizadas por instituciones académicas y



de investigación, mediante recursos propios o a través del CONACYT. Existe cada vez más interés por realizar I&D (investigación y desarrollo) en temas asociados al hidrógeno, desde su producción hasta su uso final en dispositivos de celdas de combustible y, en ocasiones, para la combustión de este gas. Las instituciones dedicadas a ello son el IPN, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, el ININ e IMP, algunos Centros del CONACYT, la UNAM, entre otras. Sin embargo, a pesar del interés, la infraestructura para la I&D de tecnologías del hidrógeno en México es limitada, al igual que la disponibilidad del recurso humano disponible para ello.

Cabe destacar que las iniciativas de investigación han sido generalmente individuales, con una limitada colaboración y, por tanto, escasa coordinación, debido a la falta de un programa nacional del hidrógeno y de recursos. Sin embargo, existen comunidades con el interés común de impulsar el uso del hidrógeno, entre las que destaca la Sociedad Mexicana del Hidrógeno (SMH), con casi 10 años de actividades ininterrumpidas, que incluyen congresos técnicos, foros de discusión, visitas industriales y cursos de tecnologías del hidrógeno para la formación de recursos humanos.

Como se observa, hay mucho camino que recorrer en esta temática, cuyo objetivo es crear nuevas formas de obtener energía.



### Cierre de la unidad

En esta unidad se explicaron tres temas de gran relevancia: costos, el hidrógeno y el ambiente y tendencias tecnológicas.

En la primera sección, estudiaste aquello que concierne a los costos que se generan al producir y transportar el hidrógeno, lo cual es importante revisar y aplicar en alguna empresa dedicada a este giro. Además, será parte integradora de todo este curso y de utilidad en tu formación.

En la parte del hidrógeno y el ambiente, se presentó el impacto que tiene la utilización del hidrógeno como recurso alternativo en la generación de energía en el medio ambiente, abordando así el tema del desarrollo sustentable.

Finalmente, tener presente qué es la economía del hidrógeno y los escenarios futuros sobre el hidrógeno resulta vital para generar una perspectiva a futuro sobre el tema de **energía del hidrógeno**.

La competencia que se obtiene es analizar la tecnología en la generación del hidrógeno para determinar los costos en la transformación de la energía del hidrógeno en energía eléctrica mediante dispositivos de conversión de energía, procesos biológicos y fisicoquímicos. En conjunto, todo ello forma parte esencial en tu formación como ingeniero en Energías Renovables; la utilidad de esta asignatura es significativa en esta integración de tu conocimiento.



### Fuentes de consulta



1. Ambientum. (2003). El hidrógeno como combustible. Febrero 2003, consultada en: [http://www.ambientum.com/revista/2003\\_01/HDRGNO.html](http://www.ambientum.com/revista/2003_01/HDRGNO.html)
2. Botas, J. A.; Calles, J. A.; Dufour, J. y San Miguel, G. (2005). *La economía del hidrógeno. Una visión global sobre la revolución energética del siglo XXI*. Asociación Española de Científicos. Recuperado de <http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/documentos/LAECONOMIADELHIDROGENO.pdf>
3. De Vrije, T. y Claassen, P. (2005). Dark Hydrogen Fermentations. En J. Reith, R. Wijffels y H. Barten (eds.), *Bio-Methane & Bio-Hydrogen: Status and Perspectives of Biological Methane and Hydrogen Production*. Petten: Dutch Biological Hydrogen Foundation. Pp. 103-120.
4. Estrada, C. y Samperio, J. (2010). *Energías Alternas. Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México*. México: Academia Mexicana de Ciencias.
5. Fernández, A. y Cano, U. (2014). El hidrógeno: el cambio a una economía sustentable. *Revista de divulgación científico-tecnológica del Gobierno del Estado de Morelos*. Recuperado de: <http://revistahypatia.org/biologia-molecular/20-revista-36/213-el-hidrogeno-el-cambio-a-una-economia-sustentable.html>



6. Fierro, J. L.; Gómez, L. y Peña, M. A. (s. f.). *El hidrógeno: un vector energético no contaminante para automoción. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC.* España: Cantoblanco.
7. Juárez, S. (2009). *Producción de hidrógeno a partir de los residuos de C. U. como biocombustible de Ecovia.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.  
Recuperado de [http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ptolomeo.unam.mx%3A8080%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F132.248.52.100%2F1476%2FTesis.pdf%3Fsequence%3D1&ei=5qHdU4\\_eHKbQ8AHx9IH4AQ&usg=AFQjCNFSfq245iuNiC4KzGrXU5ZRwb-KNQ&bvm=bv.72197243,d.b2U](http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ptolomeo.unam.mx%3A8080%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F132.248.52.100%2F1476%2FTesis.pdf%3Fsequence%3D1&ei=5qHdU4_eHKbQ8AHx9IH4AQ&usg=AFQjCNFSfq245iuNiC4KzGrXU5ZRwb-KNQ&bvm=bv.72197243,d.b2U)
8. Kamel, B.; Brian, C. y Franklin, M. (s. f.). *El hidrógeno: ¿Un futuro portador energético?*
9. Linares, J. y Moratilla, B. (s. f.). *El hidrógeno y la energía.* España: Asociación Nacional de Ingeniería del ICAI.
10. Marbán, G. y Valdés-Solís, T. (2007). Towards the hydrogen economy? *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 1625-1637.
11. Moriarty, P. y Honnery, D. (2007). Intermittent renewable energy: The only future source of hydrogen? *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 1616-1624.
12. Ortega, E. y François, J. (2007). Producción de hidrógeno mediante energía nuclear, un escenario sostenible en México. México: *En Memorias del Congreso Internacional Conjunto Cancún, Quintana Roo.*
13. Sánchez, C.; Elices, M.; Salva, J.; Sánchez, V.; Kindelán, M. y Cardona, J. L. (1977). *Estudio técnico-económico de viabilidad de utilización del hidrógeno como combustible. Estado actual y perspectivas futuras del problema, con particular aplicación al caso español.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.  
Recuperado de: <http://aerobib.aero.upm.es/cst/bibliografia/E12.pdf>
14. Valero, J. (2010, mayo-agosto). El espejismo de una energía social. *Revista Internacional e Sociología (RIS)*, 68, 2: 429-452.