



Programa de la asignatura:

Energía del hidrógeno

U1

Principios generales del hidrógeno





Índice

Presentación de la unidad	3
Competencia específica.....	4
Propósitos.....	4
1.1. Propiedades del hidrógeno	5
1.1.1. Propiedades fisicoquímicas	6
1.1.2. Propiedades termodinámicas	8
1.2. Características del hidrógeno como fuente de energía	10
1.2.1. Ventajas	10
1.2.2. Desventajas.....	11
1.2.3. Condiciones de seguridad en el manejo del hidrógeno.....	12
1.3. Estado actual de la tecnología del hidrógeno.....	21
1.3.1. Escenario mundial del uso del hidrógeno como fuente de energía.....	21
1.3.2. Tecnología del hidrógeno en México	24
Cierre de la unidad	27
Fuentes de consulta	28



Presentación de la unidad



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

Bienvenido(a) a la *Unidad 1. Principios generales del hidrógeno*. Esta unidad será una introducción a las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas del hidrógeno; asimismo, se mostrarán sus ventajas y desventajas. Además de entender la importancia de las medidas de seguridad que implica el manejo del hidrógeno, conocerás el potencial que tiene la tecnología del hidrógeno como fuente de energía.

A lo largo de la unidad se abordan, de manera general, las propiedades del hidrógeno y sus características, así como sus principios fundamentales como vector energético para obtener los conocimientos necesarios requeridos en el estudio de las unidades subsiguientes de la asignatura.

Con los conocimientos que obtendrás en esta unidad serás capaz de analizar e identificar las propiedades más importantes del hidrógeno, tendrás la capacidad de entender las medidas de seguridad para el manejo del hidrógeno y conocerás el potencial energético que representa esta tecnología en el desarrollo de fuentes de energía alternativa con respecto a las fuentes fósiles.



Competencia específica



Unidad 1

Analizar el hidrógeno como fuente de energía mediante el análisis de sus propiedades fisicoquímicas, termodinámicas y sus ventajas para determinar las condiciones de seguridad en su uso y manejo.

Propósitos

- 1 **Identificar** las propiedades del hidrógeno.
- 2 **Identificar** las medidas de seguridad en el manejo del hidrógeno.
- 3 **Identificar** la importancia del hidrógeno como fuente de energía.



1.1. Propiedades del hidrógeno

Actualmente, nuestro suministro de energía está basado en los combustibles fósiles perecederos. A causa del aumento de la población mundial, la creciente demanda de energía *per cápita* y el calentamiento global, se necesita un suministro de energía alternativa a largo plazo. Esto es evidente para el sector del transporte, que depende demasiado del petróleo. Aunque actualmente el transporte es el tercer mayor contribuyente en cuanto al uso de energía y en la formación de las emisiones de gases de efecto invernadero, también es el sector que presenta un crecimiento más rápido en la sociedad.

Ahora bien, el hidrógeno es considerado el combustible más prometedor e importante para el futuro, porque tiene una gran capacidad para reducir la contaminación ambiental; por lo tanto, ha adquirido mayor interés en todo el mundo para minimizar el efecto invernadero y otros gases contaminantes del medio ambiente. Se considera que los vehículos que funcionan con hidrógeno pueden reducir drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y reducir significativamente las emisiones contaminantes de escape. El uso del hidrógeno como portador de energía contribuirá a la lucha contra el cambio climático, que ha sido reconocido como una de las mayores amenazas que enfrenta el planeta.

El desafío para la utilización generalizada de hidrógeno como vector energético requiere de la adopción de estrategias adecuadas para manejar los asuntos relacionados con la seguridad, el medio ambiente y la eficiencia de los métodos de obtención, mediante una perspectiva holística, referidos como la sostenibilidad. El hidrógeno es un elemento clave entre la naturaleza y la sociedad, y es considerado como la llave del desarrollo económico.

Las fuentes de energía se utilizan principalmente para satisfacer las necesidades humanas y mejorar la calidad de vida; sin embargo, esto conlleva impactos ambientales. Por esto se requieren fuentes de energía sostenibles y vectores energéticos que no dependan de las reservas de combustibles fósiles y que no produzcan impactos ambientales adversos, por lo que el hidrógeno es una alternativa para la sustitución de combustibles dependientes del petróleo. El hidrógeno puede ser utilizado como combustible para la generación de energía en dispositivos como las celdas de combustible, y su producción puede ser ambientalmente amigable y sostenible, por ello representa una solución contra el calentamiento global. Es indiscutible que el uso actual de combustibles fósiles sigue amenazando la estabilidad global y la sostenibilidad, en diversos sectores.



El hidrógeno es muy utilizado en la industria química para generar diversos productos, como amoníaco y metanol. El desarrollo de las tecnologías puede convertir al hidrógeno en el combustible que satisfaga la demanda energética en los diversos sectores porque puede obtenerse de fuentes renovables y no renovables, incluyendo diversos métodos, como la electrólisis de agua, medios biológicos y procesos químicos a partir del gas natural.

1.1.1. Propiedades fisicoquímicas

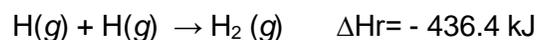
El hidrógeno es el primer elemento químico de la tabla periódica ubicado en el grupo I, su símbolo químico es la letra H, con el número atómico 1, peso atómico de 1.00797, peso molecular de H₂ de 2.0158 gramo·mol⁻¹ y una valencia de 1. El átomo del hidrógeno contiene un electrón y un protón, y la energía de disociación de los átomos de H₂ es de 436 kJmol⁻¹. El radio atómico de hidrógeno es de 0.046 nm, con un electrón, el cual ocupa el orbital 1s.

El ion de hidrógeno tiene una carga de 1.602*10⁻¹⁹ C.; los iones de hidrógeno solvatados pueden obtenerse electroquímicamente sobre disoluciones de compuestos que contengan hidrógeno, como el agua, ácidos y otros solventes. La disociación parcial del agua produce hidrógeno en su forma de hidronio (H₃O⁺), así como iones hidroxilo (OH⁻).

Generalmente el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso, formando parte del aire que respiramos; además de ser el elemento más abundante en el universo, es inodoro, incoloro e insípido. Por otra parte, el hidrógeno es un elemento no metálico que juega un papel muy importante en química y bioquímica, ya que forma una gran cantidad de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, que van desde hidruros metálicos, ácidos, bases, y es un constituyente principal de los hidrocarburos.

El hidrógeno tiene dos isótopos estables: el protio (H), el deuterio (D), y un isótopo radioactivo llamado tritio (T) con un tiempo de media vida de 12.26 años. Asimismo, en el hidrógeno natural se encuentra el protio con un 99.985% y 0.015% contenido de deuterio. Los isótopos del hidrógeno tienden a formar moléculas biatómicas H₂, HD, D₂, HT y T₂. En comparación con isótopos de otros elementos, las propiedades de los isótopos del hidrógeno presentan diferencias más marcadas entre sí.

El hidrógeno atómico tiende a combinarse para formar hidrógeno molecular a través de una reacción exotérmica, es decir, libera calor:





Entre los gases más ligeros, el hidrógeno posee una viscosidad más baja y una alta conductividad térmica. En condiciones de presión y temperatura ambiente, la viscosidad dinámica del hidrógeno gaseoso es 2.11 veces menor que la del helio; por esta razón, el manejo del hidrógeno requiere de condiciones de seguridad más estrictas, porque aumenta la posibilidad de fugas en un sistema. Su conductividad térmica es mayor con respecto a la del helio, el metano, el nitrógeno, el oxígeno y el argón, esto se debe a la alta difusividad de las moléculas de H_2 en algunos materiales, especialmente en altas temperaturas.

Las variables de presión y temperatura juegan un papel crítico en el manejo y uso del hidrógeno, ya que suele ser poco reactivo en condiciones atmosféricas normales, pero al incrementar la temperatura, la naturaleza inflamable y explosiva del gas de hidrógeno requiere de mayores precauciones y medidas de seguridad. Generalmente, el hidrógeno molecular se disocia en sus protones correspondientes (H^+) por efecto de altas temperaturas.

El catión de hidrógeno (H^+) presenta poca estabilidad química en los compuestos que lo contienen debido a su potencial de ionización y a su estado de oxidación más común: +1. Cuando un electrón es adicionado a un átomo de hidrógeno en estado gaseoso, se libera una cantidad de energía ($74\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), formándose un ión con carga negativa, que es favorable desde el punto de vista energético (H^-). De esta manera, la formación de numerosos compuestos que contienen el ión hidruro (H^-), que generalmente reacciona con metales, es posible. En compuestos de hidruros, el hidrógeno tiene un estado de oxidación negativo y se forma con elementos menos electronegativos que el hidrógeno. Sin embargo, la mayoría de los compuestos de hidrógeno son compuestos covalentes.

Generalmente el hidrógeno se encuentra en su estado más estable, que es en forma molecular, cuya estructura química es $H - H$. Asimismo, puede sufrir cambios de fases de estado dependiendo de variables macroscópicas, como la temperatura y presión. El hidrógeno en estado gaseoso puede cambiar a una fase sólida mediante un proceso de congelamiento cuando se somete a una temperatura de 14 grados Kelvin; otro cambio de fase ocurre alrededor de los 20 grados Kelvin, donde el hidrógeno pasa del estado gaseoso al líquido, siendo estos valores los más bajos que cualquier elemento puede tener, excepto el helio. Incluso en estado líquido es muy ligero, incoloro y transparente.

Debido a que el hidrógeno presenta dos principales estados físicos, las propiedades para cada estado son distintas; por ejemplo, la masa del hidrógeno de 1Kg tiene un volumen de 14.08 L en estado líquido y 11.74 m^3 , que es igual a 11,740 litros, en estado gaseoso.



1.1.2. Propiedades termodinámicas

Al ser uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, el hidrógeno presenta una opción para emplearlo como fuente de energía, además de sus aplicaciones químicas. De manera natural, el hidrógeno se encuentra en los gases volcánicos, en la descomposición de residuos orgánicos y en algunas plantas en pequeñas cantidades.

Las propiedades del hidrógeno dependen de las variables de presión, temperatura, masa, volumen y del estado físico en el que se encuentre. A presión atmosférica y a 273.15K, la densidad del hidrógeno en estado gaseoso es de 0.089 kgm^{-3} ; mientras que la del hidrógeno en estado líquido es de 70.8 kgm^{-3} , con el punto de ebullición más bajo entre los compuestos líquidos. Por su parte, el hidrógeno cristalino tiene una red hexagonal con una densidad de 86.678 kgm^{-3} , la más ligera entre las sustancias cristalinas. La temperatura crítica del hidrógeno es 32.9K, y su presión es de 12.84 bar. En condiciones de equilibrio de punto triple a 13.8 K, el hidrógeno gaseoso coexiste con una mezcla de hidrógeno líquido y sólido (congelado). Sin embargo, este elemento químico es una sustancia que presenta dificultades para ser licuado, debido a la propiedad de su temperatura crítica.

El hidrógeno contiene mayor energía por unidad de masa con 141.9 MJkg^{-1} , comparado con la gasolina, que es tres veces mayor. Sin embargo, su densidad de energía por unidad de volumen es baja. Para el estado gaseoso es de 2.34 MJdm^{-3} y para el líquido de 10.07 MJdm^{-3} , valores bajos en comparación con el de la gasolina, que es de 35.5 MJdm^{-3} . Bajo condiciones normales, el comportamiento del hidrógeno es muy similar al de gas ideal; sin embargo, en presiones altas o bajas temperaturas, se aleja de la Ley de gas ideal.

Generalmente el hidrógeno tiene dos formas alotrópicas: el orto-hidrógeno y el para-hidrógeno. El primero posee mayor concentración en el gas de hidrógeno, mientras que el segundo tiene mayor concentración en el hidrógeno líquido; esto se debe a que ocurre una transición de fases (de orto a para) cuando el hidrógeno se somete a bajas temperaturas, con la liberación de 1407 Jmol^{-1} . El calor de evaporación del hidrógeno líquido es de 921 Jmol^{-1} .

El hidrógeno es poco soluble en el agua ($1.73 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) y su solubilidad puede incrementar en ciertos solventes orgánicos como en el metanol, que aumenta a un valor de $11 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. De la misma forma, la solubilidad puede incrementarse con el aumento de la presión y disminuir cuando aumenta la temperatura.

Una de las características más importantes del hidrógeno es la formación de puentes de hidrógeno. Esto consiste en el enlace de un átomo de hidrógeno, por enlace covalente,



con átomos electronegativos, como un fluoruro, oxígeno, nitrógeno o sulfuro. Los puentes de hidrógeno se forman en varios compuestos y afectan sus propiedades; por ejemplo, promueven la asociación del agua donde las moléculas forman *clusters* (grupos o cúmulos de moléculas). Los enlaces de hidrógeno tienen gran importancia porque determinan la conductividad de las soluciones y de electrolitos poliméricos sólidos en las celdas de combustibles; además, juegan un papel imprescindible en los mecanismos de reconocimiento molecular en las estructuras biológicas y en la formación del ADN.

La combustión del hidrógeno requiere de precauciones especiales porque la flama es casi invisible, con una coloración azul pálido y con la formación de agua y calor como subproductos. La mezcla del hidrógeno con el oxígeno reacciona de forma vigorosa con una reacción exotérmica. Es un excelente conductor de calor en comparación con el aire, y tiene un calor específico C_p (a presión constante) de $3.4 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ a 273.15 K. En estado líquido, la combustión presenta mayor dificultad debido a la baja temperatura del hidrógeno.

A causa de sus propiedades, el hidrógeno contiene mayor energía por unidad de masa; por ejemplo, la densidad de 1 kg de H_2 es igual a la de 2.1 kg de gas natural; es por esto que existe el interés de usarlo como vector energético y para su aplicación en programas espaciales. En la siguiente tabla se presenta el comparativo del hidrógeno con otros combustibles.

Combustible	Volumen	Peso
Hidrógeno	3,00 kWh/Nm	33,33 kWh/kg
Butano	34,39 kWh/Nm	12,7 kWh/kg
Metano	9,97 kWh/Nm	13,9 kWh/kg
Propano	25,89 kWh/Nm	12,88 kWh/kg
Gas natural	8,8 - 10,4 kWh/Nm	10,6 - 13,1 kWh/kg
Diésel	10 kWh/litro	11,9 kWh/kg
Nafta	8,8 kWh/litro	12,0 kWh/kg



1.2. Características del hidrógeno como fuente de energía

La crisis energética y los daños ambientales por el uso de combustibles fósiles han impulsado la necesidad de estudiar y desarrollar fuentes de energía limpias y alternativas. Las energías limpias comprenden a la energía eólica, solar, biocombustibles, geotermia e hidrógeno porque tienen un gran potencial para solucionar los problemas de la demanda energética, sin emisiones contaminantes. Particularmente, la tecnología del hidrógeno representa una opción viable para impulsar una economía estable y un desarrollo sostenible.

1.2.1. Ventajas

Las ventajas del uso del hidrógeno, como fuente de energía sustentable, se presentan a continuación:

- Por las propiedades intrínsecas del hidrógeno, es posible almacenar una gran cantidad del gas en recipientes pequeños.
- Se puede emplear como fuente primaria aprovechando su capacidad calorífica o para la generación de electricidad mediante celdas de combustible.
- Debido a que la combustión del hidrógeno es más eficiente que los combustibles convencionales, puede contribuir a la diversificación de combustibles y suministros para automóviles con motor de combustión de hidrógeno.
- El hidrógeno puede ser utilizado como fuente de almacenamiento de energía para los sistemas de operación intermitente.
- Puede proporcionar un ambiente sostenible porque el hidrógeno es amigable con el medio ambiente, es un portador de energía limpia, no es tóxico y no produce emisiones de efecto invernadero.
- Es apropiado para una fuente de energía sostenible de largo plazo, ya que puede producirse a partir de fuentes renovables por diferentes métodos de producción, y puede almacenarse por largos periodos de tiempo, en comparación con la electricidad.
- El desarrollo de tecnologías que utilizan o emplean el hidrógeno puede impulsar el sector económico, garantizando la sostenibilidad industrial por sus aplicaciones en alimentos, microelectrónica, metalurgia y por ser portador de energía en sistemas energéticos.
- Las emisiones de gases contaminantes por combustión, como NO_x , SO_x , CO_2 o hidrocarburos no quemados y material particulado, se pueden reducir en un 70 con un sistema con hidrógeno.



- El alto coeficiente de difusión permite que el hidrógeno se diluya rápidamente en el aire; al ser menos denso, tiende a elevarse, reduciendo el riesgo de posibles explosiones en comparación con el manejo del metano.

1.2.2. Desventajas

A continuación, se exponen las principales desventajas que tiene el uso del hidrógeno como combustible.

- ❖ El principal competidor en contra del desarrollo de la tecnología del hidrógeno es la gasolina, que tiene mayor disposición y distribución en el transporte.
- ❖ Debido a las características propias del gas de hidrógeno, es difícil detectar fugas; por lo cual es necesario un sistema de detección mediante sensores para identificar y cuantificar la concentración del gas en una instalación con el fin de evitar riesgos de auto ignición o explosión.
- ❖ Al ser muy ligero, los riesgos de inflamabilidad del hidrógeno son mayores, porque es hasta siete veces más inflamable que el gas natural o la gasolina. Esto implica más medidas de seguridad, aunque el peligro de que se produzca una detonación, depende de la relación que se establezca entre el hidrógeno/aire, entre 13 y 18%.
- ❖ Como se mostró en las propiedades del hidrógeno, éste contiene menor densidad de energía por unidad de volumen en comparación con otros combustibles fósiles.
- ❖ La obtención de hidrógeno líquido y su almacenamiento requieren condiciones especiales en temperatura, presión y contenedores de doble coraza, con una pared aislante que evite el cambio de fase a estado gaseoso.
- ❖ La disposición y la distribución del hidrógeno líquido implican altos costos por los materiales y las dimensiones de los tanques de almacenamiento (30-60 m³) y los accesorios de manipulación, que han sido muy utilizados en aplicaciones espaciales por la NASA, donde se emplean tanques de 5000 m³ de capacidad.
- ❖ En instalaciones subterráneas, la distribución del gas de hidrógeno presenta pérdidas desde el punto de vista energético, entre 1 y 3%.
- ❖ El almacenamiento de hidrógeno en estado líquido o gaseoso requiere de materiales de baja densidad, alta resistencia, alta rigidez, tenacidad a la fractura y baja permeabilidad, como hidruros metálicos, que son costosos.
- ❖ La aplicación del hidrógeno en automóviles se ve obstaculizada por cuestiones de seguridad en el manejo del hidrógeno; por este hecho ha sido visto como un material muy peligroso.
- ❖ Debido a que la flama del hidrógeno es invisible, representa un riesgo para el medio que lo rodea; incluso, se puede desconocer si existe un incidente en un área determinada.



1.2.3. Condiciones de seguridad en el manejo del hidrógeno

El hidrógeno tiene muchas características por las cuales ha producido gran interés en cuanto a su aprovechamiento para aplicaciones en la industria farmacéutica, de procesos químicos, espaciales, etc. Sin embargo, se debe entender que desde su producción, transporte y uso se requieren medidas de seguridad para evitar riesgos, incidentes y eliminar mitos sobre el manejo del hidrógeno. Asimismo, se debe tener en cuenta algunas consideraciones y criterios para su manipulación segura como:

- Un combustible requiere de oxígeno o aire para que se lleve a cabo la combustión; sin embargo, esto no significa que el hidrógeno se detone al aire libre por sí solo, como se piensa equivocadamente, por supuesto no hace combustión espontánea.
- Es un gas que no se descompone, es decir, en condiciones normales y estables no sufre cambios químicos o de fase de estado.
- Es un compuesto que no oxida, debido a que se caracteriza por ser un agente reductor a temperaturas mayores de 500°C.
- El hidrógeno no es tóxico, a menos de que contenga impurezas como monóxido de carbono (CO), arsénico (As), o que se desplace en el aire y exista una sobreexposición que ponga en riesgo la integridad física.
- El manejo del hidrógeno en instalaciones como reactores, tuberías o tanques no afecta la estructura, porque no es una sustancia corrosiva.
- Como se indicó en las propiedades, el hidrógeno no es un elemento radiactivo, no emite olor, no perjudica las fuentes de agua superficial o subterránea.
- No pone en riesgo la salud, ya que, al no ser biocompatible, no es vehículo de transmisión de enfermedades. Asimismo, no existen evidencias de que la exposición o manejo del hidrógeno puedan producir cáncer.

La manipulación y el uso del hidrógeno implican condiciones y acciones de seguridad para evitar riesgos durante la operación de los sistemas o instalaciones que trabajen con él. La inflamabilidad del hidrógeno es fundamental para identificarlo como una sustancia peligrosa, aunque esta característica resulta atractiva para emplearlo como vector energético. Sin embargo, su combustión depende de la cinética química, según las condiciones de la mezcla de hidrógeno-aire y las variables de presión, temperatura y volumen de los reactantes. Finalmente, el hidrógeno no presenta más peligrosidad que otros combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural o la nafta.

Cabe destacar que la química de la combustión del hidrógeno es muy simple, en comparación con otros combustibles, porque sólo participan dos elementos: el hidrógeno y oxígeno, y se lleva a cabo en un menor número de etapas.



De su combustión se obtienen calor y agua como subproductos; además, no emite gases de efecto invernadero porque no contiene compuestos de carbono y/o azufre; esta característica lo hace muy adecuado para considerarlo un combustible limpio y sostenible.

En altas temperaturas, la mezcla de hidrógeno y aire puede presentar ignición espontánea. En contraparte, en condiciones normales, con espacios ventilados o al aire libre, el hidrógeno reduce el riesgo de explosión por su baja densidad y su alta difusividad. Sin embargo, es importante destacar que en el manejo del hidrógeno el riesgo es prácticamente el mismo que en el uso de gasolinas y gas natural.

Los ambientes cerrados deben mantenerse con buena ventilación y precauciones adicionales de seguridad. La industria química ha usado hidrógeno durante cien años y las experiencias concernientes a la seguridad son positivas.

Los parámetros a considerar en materiales inflamables y explosivos relacionados con los peligros en el manejo de combustible dependen del estado físico del combustible; esto no implica que todos representen una fuente de peligro, algunos sólo se toman como una probabilidad y, otros, como consecuencia. Por ejemplo, la inflamabilidad del hidrógeno es una probabilidad, y el calor de combustión es una consecuencia, ya que puede causar daño.

Por lo tanto, el hidrógeno y el metano son combustibles que se pueden comparar fácilmente por el estado físico que tienen; en cambio, con las propiedades de la gasolina, que se emplea en estado líquido, no se pueden relacionar, porque están en diferentes estados. A continuación, se enlistan algunas propiedades.

Propiedad	Hidrógeno	Metano	Gasolina
Estado físico	Gas	Gas	Líquido
Presión de vapor (Bar) sólo en líquidos	-	-	0.34
Límites de inflamabilidad (% de combustible/aire)	4.0 - 75	5.3-15	1.3-7.1
Temperatura de auto-ignición (°C)	572	632	440
Energía de ignición mJ	0.018	0.28	0.25
Calor de combustión (kJ·mol ⁻¹)	285.8	890	5512



Presión máxima durante la combustión (Bar)	6.8	7.1	8
Índice de deflagración (Bar·m·s ⁻¹)	550	55	100-150

Estas propiedades son importantes para evaluar el riesgo de incendio, en caso de accidente o fuga, y en caso de incendio para ayudar a analizar la gravedad de la situación. Se deben considerar dos puntos:

- El combustible sólo con la presencia de vapor se enciende.
- Las situaciones en las que las propiedades físicas difieren sutilmente son: en espacios ventilados, de forma natural o mecánica y en espacios completamente cerrados, sin ventilación.

Los riesgos en el manejo del hidrógeno se mencionan a continuación en tres categorías:

a) Fisiológicos

- ✓ Por asfixia. Ocurre cuando el oxígeno es reemplazado por el hidrógeno en concentraciones menores al 19% en volumen.
- ✓ Por quemaduras térmicas, causadas por el calor radiante emitido por el fuego de H₂.
- ✓ 30 segundos de exposición a la radiación, por el calor de la combustión de hidrógeno, puede causar quemaduras, lo que es equivalente a 0.95W·cm⁻².
- ✓ La exposición al hidrógeno líquido, producto de derrames, causa quemaduras en la piel.

b) Físicos

- ✓ La fragilidad afecta las propiedades mecánicas de los metales, produciendo fisuras en las paredes de los sistemas de almacenamiento y provocando fugas.
- ✓ La resistencia de los materiales depende de la temperatura del ambiente, la presión, la pureza del metal, las condiciones de la superficie de los contenedores y el tiempo de exposición al H₂.
- ✓ El almacenamiento del hidrógeno en temperaturas que oscilen entre 200 K a 300 K favorece la fragilidad de superficies metálicas.
- ✓ Para disminuir la fragilidad de los materiales de almacenamiento del hidrógeno se utilizan recubrimientos de óxidos; se debe evitar esfuerzos, agregar aditivos al hidrógeno y mejorar la sección de aleaciones metálicas.



- ✓ Se debe considerar los coeficientes de contracción térmica para evitar fugas producidas por los cambios de dimensiones del volumen causadas por la transición de fase del hidrógeno al disminuir la temperatura.
- ✓ En estado gaseoso las posibilidades de fuga por el alto coeficiente de difusión del hidrógeno, a través de fisuras o uniones de líneas de transporte, son más altas que en la gasolina o el gas natural, porque tiende a elevarse y dispersarse en el ambiente, no a permanecer cerca de la tierra.
- ✓ Por otra parte, el hidrógeno líquido brinda mayor seguridad que el gas por sus condiciones de almacenamiento, que no favorecen las fugas.

c) Químicos

- ✓ Los límites de inflamabilidad dependen de la energía de ignición, temperatura y presión de los diluyentes (por ejemplo, del aire), el tamaño y configuración de los equipos.
- ✓ En edificaciones que cuentan con sistemas de hidrógeno, deben ser aislados de fuentes de fuego, equipos electrónicos y de calefacción.

Una explosión se manifiesta por las ondas de presión que se liberan rápidamente, mientras que la deflagración se mueve a través de la mezcla inflamable en forma de onda subsónica. La detonación se acopla a una onda de choque y se propaga a través de una mezcla detonable en forma de ondas supersónicas, mil veces más rápido que las reacciones iniciales. Por lo tanto, la detonación tiene mayor potencial para causar lesiones y daños. Los límites de detonación dependen de la naturaleza y el grado de confinamiento en un espacio dado, entre otros factores que se mencionaron con anterioridad.

Las propiedades de la combustión del hidrógeno indican que no es fácil de manejar; sin embargo, la inflamabilidad es una función del nivel de concentración y es mucho mayor que la de otros combustibles. A pesar de esto, como portador energético, ha adquirido gran interés a nivel mundial.

La seguridad en su almacenamiento es un factor primordial en los procesos de producción y uso del hidrógeno; por lo cual, se debe considerar las siguientes precauciones:

- ❖ Por el tamaño molecular del hidrógeno existe la posibilidad de penetración del gas en metales y en aleaciones. Esto provoca fugas por las grietas de las paredes o por la pérdida de fuerza en los materiales (fracturas), las tuberías o contenedores.
- ❖ Debido a la inflamabilidad del hidrógeno, se debe evitar que las líneas de distribución y los equipos de almacenamiento contengan oxígeno o aire para que no haya probabilidad de una explosión por su exposición a altas temperaturas o la radiación térmica.



- ❖ Las chispas electrostáticas, durante los procesos de carga y descarga del hidrógeno, representan una fuente de ignición, por lo que se deben utilizar materiales adecuados para el manejo de gases especiales.
- ❖ Si se calienta el contenedor a temperaturas elevadas las paredes pueden debilitarse y sufrir ruptura, derramando el hidrógeno. Generalmente el hidrógeno se comprime a una presión de 400 bares, o es licuado a -73°C .
- ❖ Para almacenamiento criogénico, en la práctica, el hidrógeno líquido se mantiene por debajo de los 240°C y entre 20-30 bares; sin embargo, las aleaciones de hierro empleadas en los contenedores de hidrógeno líquido pierden su ductilidad y existe el riesgo de una falla mecánica.
- ❖ La obtención del hidrógeno líquido depende de la temperatura crítica (T_{cr}) y no de la presión de compresión.
- ❖ Las bajas temperaturas del hidrógeno líquido conllevan a la fragilidad de los materiales y a probables derrames (un litro de líquido equivale a 851 L. de gas por evaporado).
- ❖ Cuando ocurren derrames de hidrógeno líquido se forman nubes de hidrógeno que aumentan el riesgo de incendios y explosiones.

Medidas de prevención en el manejo y uso del hidrógeno:

- La infraestructura encargada de la distribución del hidrógeno requiere sensores y alarmas para la detección de fugas. Los sensores de hidrógeno son de bajo costo y confiables.
- El sistema de detección debe ser sensible y confiable para proporcionar una detección temprana de posibles fugas y evitar que se alcance el límite de explosión en el aire.
- Debido a sus propiedades, el hidrógeno es indetectable por los sentidos humanos; por tanto, es necesario añadir sustancias que le den aroma para la detección de fugas. No obstante, esto no es recomendable para algunas aplicaciones del hidrógeno, por ejemplo, en las celdas de combustible.

El manejo y uso de hidrógeno, como cualquier combustible, requiere de técnicas de manejo adecuadas a sus propiedades. Existen normas, principalmente americanas, como *Hydrogen/Fuel Cell Codes & Standards (IEC Technical Committee 31)*, para áreas explosivas, que se encarga del cumplimiento y los requisitos de funcionamiento de los detectores de gases inflamables, así como la selección, instalación, uso y mantenimiento de los detectores para gases inflamables y el oxígeno. Por otra parte, la ISO TC 197 se refiere a la normalización en el campo de los sistemas y dispositivos para la producción, el almacenamiento, el transporte, la medición y el uso de hidrógeno. En México, la normalización de manejo y uso del hidrógeno se encuentra en desarrollo.



Materiales para hidrogeno:

- Los materiales más empleados para la fabricación de tanques de almacenamiento del hidrógeno, en condiciones normales en presión y temperatura, son el acero, el cobre, el latón y las aleaciones de aluminio; asimismo, en los accesorios se utiliza el caucho y los plásticos.
- Las válvulas, manómetros, reguladores y otros accesorios deberán ser adecuados para el servicio de hidrógeno.
- Las tuberías, tubos y accesorios deben ser adecuados para el servicio de hidrógeno, para las presiones y las temperaturas involucradas. La tubería debe ser de hierro fundido, sin accesorios, y debe cumplir con las especificaciones para el uso del hidrógeno.
- Las juntas de las tuberías y los tubos deben ser soldados con un material de soldadura fuerte o mediante el uso de bridas, roscados o accesorios de compresión. Las juntas y selladores de rosca deben ser adecuados para el servicio de hidrógeno.

Requisitos en las instalaciones:

- La instalación de sistemas de hidrógeno deberá ser supervisada por personal capacitado y certificado, con prácticas apropiadas para la construcción de la instalación y su uso.
- Los contenedores de almacenamiento (tanques o cilindros), las tuberías, las válvulas, los equipos de regulación y otros accesorios deberán ser de fácil acceso, y se deben proteger contra el daño físico; sin embargo, su manipulación sólo se realizará con personal autorizado.
- En caso de tener o requerir de unidades de suministro de hidrógeno móvil, se debe realizar las conexiones eléctricas del sistema antes de la descarga del hidrógeno.
- La ubicación del almacenamiento de hidrógeno debe estar señalizado por un rotulado que indique: "Precaución, manejo de Hidrógeno - GAS INFLAMABLE - NO FUMAR - NO LLAMAS ABIERTAS", o uno equivalente.
- Las instalaciones de producción o manejo de hidrógeno, así como todas las tuberías, tubos y accesorios, deben ser probados para asegurar que el sistema sea hermético bajo una presión de trabajo máximo.
- Los gabinetes y cajas que contengan el control del hidrógeno o equipos operativos deberán estar adecuadamente ventilados.



- Cada unidad de suministro de hidrógeno móvil, utilizado como parte de un sistema de hidrógeno (como en laboratorios o áreas de trabajo), debe ser asegurada para evitar el movimiento y el riesgo de rupturas en tanques o válvulas.
- Los sistemas de hidrógeno en edificios separados deberán construirse con materiales resistentes al fuego y con aislantes. Las ventanas y las puertas deben estar ubicadas de manera que el acceso, en caso de emergencia, sea fácil; asimismo, sus marcos deberán ser de vidrio o plástico para evitar chispas (fuente de ignición).
- Se debe contar con una ventilación adecuada para disminuir el riesgo de generar una atmósfera explosiva.
- Si es necesario, el servicio de calefacción se obtendrá a partir de vapor, agua caliente u otros medios indirectos.
- Se debe identificar las rutas de emergencia para que, en caso de incidentes, el personal pueda evacuar las zonas que tengan fugas o situaciones de incendio.

Acciones para evitar atmósferas explosivas:

- ❖ Los sistemas de hidrógeno deberán localizarse por encima del suelo, de esta manera serán de fácil acceso para los equipos de suministro y para el personal autorizado.
- ❖ Las áreas destinadas al almacenamiento del hidrógeno no deben ser subterráneas para evitar que la acumulación de gas pueda provocar una explosión.
- ❖ Los sistemas no estarán situados debajo de las líneas de energía eléctrica ni cerca de las tuberías de líquidos o gases inflamables.
- ❖ Se debe contar con un sistema de venteo para disminuir la afectación en caso de explosión.
- ❖ No se debe tener fuentes de fuego, equipos eléctricos o de calefacción.

El equipamiento y funcionamiento de un sistema de hidrógeno (gaseoso) debe mantenerse en condiciones seguras de operación; los depósitos del gas deberán estar libres de vegetación seca y materiales combustibles.



Los contenedores de hidrógeno líquido deben estar diseñados y contruidos de tal forma que cuenten con las especificaciones para recipientes a baja presión y soldados. No deben exponerse al fuego.

Los depósitos de hidrógeno licuado, estacionarios y portátiles (ya sea cilindros o tanques cisterna), deberán estar equipados con dispositivos de alivio de seguridad dimensionados de acuerdo con la capacidad del contenedor.

Los dispositivos de alivio de seguridad deben colocarse hacia el exterior, de tal manera que eviten el escape de líquido o gas en los contenedores y no afecten a estructuras vecinas o al personal.

El sistema de alivio de seguridad o de ventilación en las tuberías debe estar localizado adecuadamente para que la humedad no se acumule y se congele, lo cual afectaría el funcionamiento correcto del dispositivo.

Cuando sean expuestos a las fluctuaciones de temperatura ambiente hasta temperaturas de hidrógeno licuado por el efecto de contracción y expansión del hidrógeno, las tuberías, tubos, accesorios, juntas y selladores de rosca deben ser adecuados para el servicio de hidrógeno.

Depósitos móviles de hidrógeno:

Para manipular el hidrógeno en cilindros para uso de laboratorio o equipos como vehículos, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- ❖ Las válvulas de los cilindros deben abrirse o cerrarse cuidadosamente, sin forzar los sellos para que las juntas se mantengan en buen estado.
- ❖ Los puntos de conexión o de uso deben ser evaluados para verificar que no haya fugas.
- ❖ Las válvulas de cilindro, como las válvulas reductoras de presión, deben cerrarse cuando no estén en uso para de evitar la fuga de gas en las conexiones.
- ❖ Si se presenta una fuga y no es posible detenerla o bloquear el cierre de la válvula, el cilindro debe ser transportado fuera de la instalación y dejar que se vacíe para que se disperse en el aire libre y se diluya la concentración de hidrógeno.
- ❖ Los cilindros de hidrógeno, los tanques y las válvulas que requieran de supervisión por cuestiones de algún problema de funcionamiento pueden ser evaluados por los proveedores de gases especiales.
- ❖ En las conexiones de los cilindros y válvulas no deben usarse materiales para sellado como teflón o cualquier otro, ya que podría existir un riesgo de ignición.



Las conexiones para gases especiales, como el hidrógeno, están diseñadas para que no requieran sellos adicionales. La comprobación de fugas debe hacerse con espuma detectora de fugas y se debe evitar métodos convencionales, como el uso de la espuma de jabón.

¿Qué hacer en caso de una fuga de hidrógeno o incendio?

- En una fuga debe cortarse el suministro de gas o retirarse del lugar hacia una zona abierta y ventilada.
- No se debe reparar la fuga porque existe el peligro de una ignición.
- Se debe evacuar el área donde ocurrió la fuga hacia una zona alejada y bien ventilada.
- En caso de incendio, se debe cerrar las líneas de suministro de hidrógeno para reducir las posibilidades de explosión o afectaciones mayores.
- No intentar sofocar el fuego con extintores u otras sustancias debido al riesgo de una explosión. El personal debe alejarse del lugar y llamar a los servicios de emergencia o dejar que el fuego se apague por sí mismo.
- Si existen contenedores ubicados cerca de una zona de fuego por hidrógeno, deben ser aislados o enfriados con agua fresca o cualquier otra sustancia para reducir el riesgo de incendio y explosión por el fuego cercano.
- Si un incendio por combustión de hidrógeno afecta una zona, ésta debe ser venteada con nitrógeno o un gas inerte, para garantizar el arrastre del hidrógeno en su totalidad y eliminar el riesgo de un nuevo incidente en el interior de la instalación.

En conclusión, el hidrógeno plantea riesgos de la misma magnitud que otros combustibles. No obstante, a pesar de la percepción del público, el hidrógeno es en realidad un combustible más seguro que la gasolina y gas natural en muchos aspectos. De acuerdo con la práctica, en diversos campos de aplicación el hidrógeno tiene un excelente historial de seguridad y tuvo un gran impacto en la economía de Europa y Estados Unidos a principios del siglo XIX y XX, donde se empleó como gas industrial de uso comercial y como combustible en programas espaciales. A pesar de los accidentes que han ocurrido a lo largo de la historia, esto no significa que el hidrógeno pueda caracterizarse como un combustible más peligroso que otros.



1.3. Estado actual de la tecnología del hidrógeno

La demanda energética se incrementa continuamente porque la fuente primaria de energía son los combustibles fósiles, como el petróleo y gas natural, cuya combustión contribuye al problema de la contaminación ambiental y al calentamiento global. Los esfuerzos por encontrar fuentes alternativas de energía que reemplacen a los combustibles fósiles han generado un rápido cambio tecnológico para aprovechar fuentes de energía solar, eólica, hidrotérmica y geotérmica.

El combustible del futuro debe ser inagotable, amigable con el ambiente e independiente del control extranjero. El hidrógeno tiene gran potencial para cumplir con los requerimientos anteriores, por lo cual, ha adquirido importancia en su producción y utilización como fuente de energía para reemplazar a la gasolina, el diésel y el gas natural en el sector del transporte y la aplicación industrial.

El desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno requiere de la identificación de mercados potenciales y las limitaciones asociadas a los mismos. El mercado juega un papel crítico en el crecimiento de una economía basada en hidrógeno, ya que define la tecnología de producción y las asociaciones para la comercialización del hidrógeno y los avances tecnológicos. Los principales mercados para el hidrógeno son el transporte, la industria, la generación de electricidad y el sector comercial para construcciones con co-generación de electricidad y calor.

1.3.1. Escenario mundial del uso del hidrógeno como fuente de energía

La producción de hidrógeno despertó gran interés en las compañías por su amplia aplicación industrial (como producto químico o combustible) y por sus aportaciones ecológicas. En los últimos años se han realizado intensos esfuerzos para encontrar y emplear las mejores tecnologías para la obtención del hidrógeno, que van desde la materia prima para la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables y materiales para el almacenamiento, hasta la creación de modelos de los procesos de obtención que logren maximizar la producción y alcanzar mayor eficiencia energética.

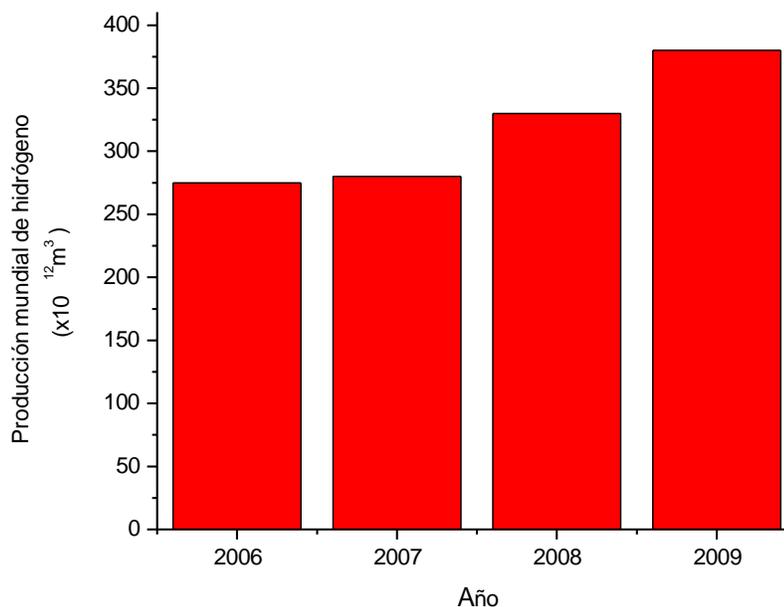
El hidrógeno puede obtenerse a partir de una gran variedad de materias primas, de fuentes fósiles (carbón, gas natural) y de recursos renovables (biomasa, agua). Asimismo, se pueden utilizar diversos procesos para la obtención de hidrógeno como químicos, biológicos, electrolíticos, termoquímicos y fotocatalíticos. Sin embargo, la mayor



producción de hidrógeno depende aún de combustibles fósiles; 96% aproximadamente a partir del gas natural.

En la actualidad, el costo comercial para la producción del hidrógeno es de 0.30 USD/kg, y la producción anual de hidrógeno es de 60 millones de toneladas, con un incremento en el consumo de 6% anual. La mayor parte del hidrógeno que se produce se emplea como producto químico en la producción de amoníaco, que es la base de fertilizantes para el sector agrícola en la producción de alcoholes primarios, como el metanol, y en la industria petroquímica.

Las previsiones de producción de hidrógeno indican un aumento constante a corto plazo, debido fundamentalmente a la industria del petróleo, ya que los requerimientos de las refinerías presentan una dependencia importante del hidrógeno, el cual es co-producido en el proceso de desulfuración (eliminación de azufre de las gasolinas) y que puede aumentar en varias décimas de miles de toneladas por año en 2030. Sin embargo, una limitante del mercado del hidrógeno es que la mayor parte de la cantidad del gas que se produce se consume en la misma industria o planta para los requerimientos propios como vector energético; de allí la necesidad de aumentar la producción del hidrógeno para que se incorpore al mercado y se promueva su comercialización a gran escala.



Evolución de la producción de hidrógeno a nivel mundial. Tomado de Cryogas, 2009.



Las tecnologías más desarrolladas que utilizan el hidrógeno se encuentran en las celdas de combustible (para la generación de energía eléctrica y calor), en turbinas de gas (que aprovechan la energía química y calorífica, como energía mecánica, mediante la combustión de hidrógeno que impulsa las alabes de la turbina para la generación de energía eléctrica), en turbinas de aviones y en motores. Otra aplicación que utiliza grandes cantidades de hidrógeno ocurre en las centrales nucleares, donde se emplea como combustible para generar energía de forma limpia y amigable con el medio ambiente. Países como Japón, Estados Unidos, Francia y Alemania utilizan el hidrógeno como fuente primaria de energía, en bajos porcentajes, lo cual reduce las emisiones de CO₂ en varias toneladas por año. Aunque se han logrado avances en la implementación del hidrógeno, en el sector económico continúan los esfuerzos por seguir investigando y desarrollando tecnologías (y materiales) para el uso adecuado y eficiente del vector energético (Brentner, Peccia y Zimmerman, 2010; Okazaki, 2008).

Una implementación de esta tecnología a gran escala, como fuente de energía, se desarrolló en Venecia, Italia, donde se instaló la primera central eléctrica alimentada con hidrógeno en 2010. La central entrega una potencia de 16 MW y se basa en un ciclo combinado mediante un sistema de turbinas de gas y de vapor que es alimentado con hidrógeno para producir energía eléctrica y calor. La planta puede producir 60 millones de KWh por año y puede satisfacer la demanda energética de 20 mil familias, evitando la emisión de 17 mil toneladas de anhídrido carbónico.

En ciudades como Los Ángeles, Madrid, Barcelona, Berlín, Londres, que presentan elevados índices de contaminación, existen proyectos demostrativos que utilizan autobuses alimentados con hidrógeno para mitigar las emisiones de contaminación atmosférica. A través de proyectos de cooperación internacional existen grupos que trabajan en el hidrógeno y sus aplicaciones, y son coordinados por la Agencia Internacional de Energía, IEA, la Asociación Internacional de la Economía del Hidrógeno, IPHE, Plataformas Tecnológicas o por acuerdos bilaterales.

La producción del hidrógeno se realiza, principalmente, en instalaciones centralizadas, porque la producción y distribución del hidrógeno a gran escala es más económica, con una eficiencia entre 5 y 10 puntos porcentuales superior a las instalaciones descentralizadas (*International Energy Agency*, 2012). La penetración de las energías renovables en este ámbito refuerza la producción en instalaciones descentralizadas, las cuales, aunque implican un mayor costo de producción, evitan los costos de transporte y almacenamiento planteados para instalaciones centralizadas.

En la actualidad, alrededor del 48% de la producción del hidrógeno está basada en el reformado de metano mediante vapor, el 30% procede del reformado del petróleo/nafta en



refinerías e industrias químicas, un 18% procede de procedimientos de gasificación de carbón, el 3.9% del electrólisis del agua y un 0.1% de otras fuentes.

Después de las crisis energéticas de los últimos años se han intensificado las investigaciones y los desarrollos tecnológicos sobre la energía del hidrógeno; esto se refleja en programas nacionales e internacionales, entre los que cabe destacar el *Hysolar*, desarrollado por Arabia Saudita y Alemania, y el *Hydro-Hydrogen Pilot Project* resultado de la colaboración entre Canadá y Europa.

En el mundo hay diferentes áreas geográficas y sociales que se definen por diferentes aspectos. El de consumo energético, o de disponibilidad de fuentes de energía, tendrá un peso importante y, a su vez, se irá superponiendo a otros matices políticos y económicos con el fin de garantizar la demanda energética cuando disminuyan sensiblemente las reservas de energía.

1.3.2. Tecnología del hidrógeno en México

La economía de México gira en torno a sus combustibles fósiles, el petróleo y el gas natural. Sin embargo, el agotamiento del recurso no renovable produce la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías energéticas que permitan generar energía limpia, segura y confiable. Actualmente existe una enorme dependencia, en nuestras actividades diarias, de tecnologías que emplean energía eléctrica. Cabe destacar que la industria petroquímica en México tiene una producción importante de hidrógeno, que es superior a los 12 millones de ft³ en los últimos años.

El hidrógeno se puede obtener de fuentes renovables, con diversos métodos de producción dependiendo de la materia prima que se emplea, lo cual constituye el fundamento de un sistema eficiente, limpio y sostenible. No obstante, algunas de las tecnologías todavía se encuentran bajo estudio para su posible desarrollo e implementación y para que propicien un impacto económico importante.

Uno de los estudios para la generación de hidrógeno se realiza mediante la electrólisis de aguas residuales y biodigestores, cuya aportación involucra la producción del combustible y el tratamiento de aguas de desecho para disminuir la contaminación de los efluentes naturales. Debido a que México cuenta con una vasta biodiversidad y recursos naturales, el aprovechamiento de la biomasa es otra fuente de gran importancia para el desarrollo de los procesos de obtención de hidrógeno. Por otra parte, la generación por procesos termoquímicos con energía solar, es una alternativa muy atractiva que se encuentra en estudio. Si se implementara el hidrógeno como combustible, el sector transporte sería el más beneficiado por el parque vehicular que se tiene en México; asimismo, serían beneficiadas las aplicaciones químicas.



En las últimas décadas, las tecnologías del hidrógeno juegan un papel importante a causa del crecimiento demográfico. Estas tecnologías ayudan a resolver los problemas relacionados con el consumo energético, a reducir la contaminación ambiental en áreas urbanas, y sirven para aprovechar adecuadamente los recursos (fósiles o renovables) y lograr una transición de una economía basada en el petróleo a una nueva economía basada en el uso de un combustible eficiente, seguro y sostenible como el hidrógeno. Para lograr la incorporación del hidrógeno en el mercado nacional se debe tener en cuenta las experiencias y estrategias de otros países; de esta manera, se definirán las perspectivas del uso de hidrógeno, los obstáculos que afectan su potencial y los desafíos, en términos de conocimientos técnicos, para la evolución de la tecnología del hidrógeno.

Actualmente existen diversas oportunidades para la aplicación de la tecnología de hidrógeno; una de ellas es en el sector de transporte público, debido a que el 95% de la población se traslada en unidades públicas, como autobuses, tren ligero, metro y transporte de carga o particular. Existen varias instituciones de educación superior y de investigación que tienen grupos de trabajo enfocados en el desarrollo científico y tecnológico que necesita el país en su diversificación energética; entre otras se puede mencionar tres: la UNAM, CINVESTAV, IPN; asimismo, existen programas especializados como la Red Nacional de Hidrógeno y la Sociedad Mexicana de Hidrógeno, que son los organismos más interesados en impulsar la aplicación del hidrógeno como fuente de energía. Del mismo modo, en la ciudad de México se han desarrollado autobuses demostrativos impulsados por hidrógeno por instituciones y compañías, como *Daimler Chrysler* y Autobuses de oriente (ADO) para dar a conocer al público el uso del hidrógeno en una de las ciudades más grandes del mundo.



Autobús alimentado con hidrógeno.
Tomada de <http://www.invdes.com.mx>.



A mediados del año 2013 se aprobó la construcción de una planta de hidrógeno y la culminación de un gasoducto en la refinería de Cadereyta Jiménez, en Nuevo León, México, para la petrolera mexicana Pemex. El proyecto comprende la construcción de una planta de hidrógeno de 25,000 Nm³/h de capacidad y la culminación de un gasoducto de 12 pulgadas que conecta a la refinería con la red mexicana de gas. La nueva planta de hidrógeno se inserta en el marco de los proyectos DUBA (diésel de ultra bajo azufre), elaborados y puestos en marcha por Pemex para modernizar y adaptar sus refinerías a la nueva normativa vigente en México (sobre el contenido de azufre en el diésel y la gasolina) para evitar las emisiones de SO₂ hacia la atmósfera.

La aplicación de programas estratégicos para evitar una crisis energética, por la reducción de reservas petroleras mundiales, el alto precio del crudo y su constante variación de costo hacen necesario tomar acciones para el desarrollo y aplicación de la tecnología del hidrógeno. En ese sentido, en México se ha conformado la Red Nacional de Hidrógeno (RNH₂), que tiene como fin contribuir en la creación y fortalecimiento de vínculos entre empresas, centros de investigación y universidades interesadas para promover la transición energética del país.

El hidrógeno tiene potencial importante como nuevo combustible, a diferencia de la dependencia que genera el petróleo importado, su refinamiento y sus trágicas consecuencias, tanto económicas como ambientales. Además, dado que es abundante y existe en cualquier parte del mundo, todos los seres humanos dispondrían de energía, lo cual lo convertiría en el primer sistema energético verdaderamente democrático de la historia.

En la actualidad, el uso del hidrógeno se perfila como una realidad para satisfacer parte de las demandas energéticas y ambientales de un futuro no muy lejano. El porvenir de las fuentes de energía alternativas, que no dependen del petróleo, debe ser parte importante en la planeación estratégica federal para crear mecanismos financieros que permitan el desarrollo económico del país con fuentes de energías renovables y que puedan competir contra las fuentes convencionales. El suministro de energía es un área prioritaria y de seguridad nacional.



Cierre de la unidad

En esta unidad, desde el punto de vista químico y termodinámico, se explicaron las propiedades del hidrógeno como combustible. Además del análisis comparativo entre éste y otros combustibles de origen fósil, se especificaron las ventajas y desventajas en su uso, dependiendo del estado de fase (líquido o gaseoso).

Se revisaron las medidas de seguridad que deben considerarse en el manejo del hidrógeno, tanto para instalaciones cerradas como para las áreas abiertas; asimismo, se analizaron los riesgos existentes en instalaciones con problemas de fugas o con fuentes de ignición sin el control adecuado.

Además, se describió el estado actual de la tecnología del hidrógeno en el escenario mundial, identificando las estrategias para la implementación del hidrógeno como vector energético, y el impacto del uso del hidrógeno en México como parte de la búsqueda de fuentes de energías alternativas que sean amigables con el ambiente.

El objetivo primordial de la unidad fue enseñarte los principios fundamentales del hidrógeno como combustible, que es un portador de energía limpia y renovable, y mostrarte el estado de dicha tecnología.



Fuentes de consulta



1. Brentner, L., Peccia, J. y Zimmerman, J. (2010). Challenges in developing biohydrogen as a sustainable energy source: implications for a research agenda. *Environmental Science Technology*, 44, 2243-2254.
2. Hoffman, P. (2012). *Tomorrow's Energy hydrogen, fuel cell and the prospects for cleaner planet*. USA: MIT.
3. Hortal, A. y Miranda, B. (2007). *El Hidrógeno: Fundamento de un futuro equilibrado*. 2ª Ed. Madrid: Díaz de Santos.
4. Kotay, S., y Das, D. (2008). Biohydrogen as a renewable energy resource- prospects and potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 258-263.
5. León, A. (2008). *Hydrogen Technology, mobile and portable applications*. Berlín: Springer-Verlag.
6. Okazaki, K. (2008). Clean and efficient coal technology integrated with CO2 sequestration and hydrogen energy systems. *Sustainable Energy Technologies: Options and Prospects*, 207-225.
7. IEA (2005). *Prospects for hydrogen and fuel cells, Energy Technology Analysis*. Publicaciones de la OCDE.
8. Solway, A. (2008). *Hydrogen Fuel*. Australia: Gareth Stevens.
9. Bose, T. y Malbrunot, P. (2007). *Hydrogen, facing the energy challenges of the 21st century*. Francia: John Libbey Eurotext.
9. Vian Ortuño, A. (2006). *Introducción a la química industrial*. España: Reverte