

## **2.4 Propiedades del hidrógeno**

### **2.4.1 Introducción**

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido y no venenoso bajo condiciones normales. Es el elemento más simple conocido por el hombre. Un átomo de hidrógeno tiene únicamente un protón y un electrón. Normalmente existe como una molécula diatómica, es decir formada por átomos de hidrógeno, de ahí que el hidrógeno normalmente se exprese como  $H_2$ . Es el elemento más abundante en el universo, con un 90% del universo en peso, y el tercero más abundante en la Tierra<sup>28</sup>. Sin embargo, en la Tierra, no es frecuente encontrarlo en su forma pura, ya que reacciona rápidamente con otros elementos para formar compuestos más estables. Combinado con el oxígeno forma agua ( $H_2O$ ). Combinado con el carbono puede formar distintos componentes como el metano ( $CH_4$ ), el carbón o el petróleo.

### **2.4.2 Propiedades del hidrógeno**

El hidrógeno es una mezcla en equilibrio de orto-hidrógeno y para-hidrógeno cuya diferencia radica en la distinta rotación relativa del spin atómico. Las moléculas con los spins en la misma dirección (paralelos) se denominan orto-hidrógeno; y aquellas con los spins en direcciones opuestas (antiparalelas) se denominan, para-hidrógeno. A medida que la temperatura disminuye las moléculas de orto-hidrógeno se convierten en para-hidrógeno. En la licuación del hidrógeno será muy importante tener en cuenta esta propiedad. Estas moléculas tienen pequeñas diferencias en las propiedades físicas pero son químicamente equivalentes; por lo tanto, los riesgos asociados con el uso del hidrógeno son los mismos para las dos formas moleculares.

Las principales propiedades del hidrógeno son:

#### ***Densidad***

Es el elemento más ligero de la tabla periódica con una **densidad** de **0.0899kg/Nm<sup>3</sup>**.

---

<sup>28</sup> *Hydrogen*. United Nations Environment Programme (UNEP) National Committee for the Republic of Korea: ([www.unep.or.kr/energy/hydrogen/hyg\\_intro.htm](http://www.unep.or.kr/energy/hydrogen/hyg_intro.htm)).

### ***Poderes caloríficos superior e inferior***

Tiene un alto contenido de energía por unidad de masa con unos **Poder Calorífico Superior** de **141MJ/kg** e **Inferior** de **119MJ/kg**. Estos valores son muy superiores a los de otros combustibles convencionales, siendo el poder calorífico inferior del hidrógeno del orden de tres veces superior al de la gasolina. Debido a su baja densidad en condiciones normales, tiene una baja densidad energética por unidad de volumen con un poder calorífico inferior por unidad de volumen de  $10.79\text{MJ/m}^3$ . La densidad energética por unidad de volumen puede aumentarse al aumentar la presión o disminuir la temperatura.

### ***Inflamabilidad***

El hidrógeno no es explosivo, es una molécula estable, y a diferencia de los explosivos, el hidrógeno necesita una fuente de ignición externa para que se produzca la ignición. Para que el hidrógeno arda son necesarias tres condiciones: que el hidrógeno se mezcle con un oxidante, que la mezcla esté dentro de los límites de inflamabilidad y que esté presente una fuente apropiada de ignición.

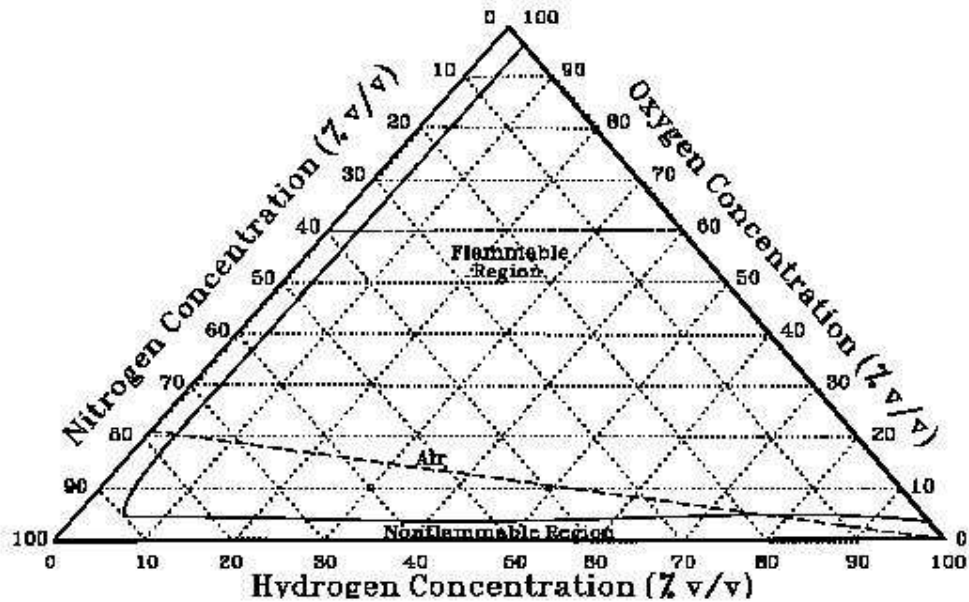
Las mezclas de hidrógeno con aire, oxígeno, u otros oxidantes son altamente inflamables en un amplio rango de composiciones. Los límites de inflamabilidad, en porcentaje en volumen, definen el rango en el cual los combustibles gaseosos se incendian cuando están expuestos a una fuente de ignición con suficiente energía. Los límites de inflamabilidad son dependientes de la energía de ignición, de la temperatura, de la presión, de la presencia de diluyentes y del tamaño y configuración del equipo, instalaciones o aparatos. El rango de inflamabilidad de las mezclas hidrógeno-aire e hidrógeno-oxígeno se amplían si la propagación de la llama es hacia arriba y se estrechan si la propagación de la llama es hacia abajo.

**Los límites de inflamabilidad** del hidrógeno en aire seco a una presión de 101.3 kPa y a una temperatura de 298K son de **4.1% y 74.8%**, para los límites inferior y superior respectivamente. Para el caso de la mezcla hidrógeno-oxígeno son de **4.1% y 94%**. Una reducción en la presión por debajo de 101.3 kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior.<sup>29</sup>

---

<sup>29</sup> Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems. National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Una mezcla inflamable puede ser diluida con sus propios componentes hasta que la concentración de la mezcla caiga fuera de los límites de inflamabilidad (límites inferior y superior). En la siguiente figura se muestra los límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno.



Flammability Limits at a Pressure of 101.3 kPa (14.7 psia)  
and a Temperature of 298 K (77 °F)

Source: Coward, H. F. and G. W. Jones. *Limits of Flammability of Gases and Vapors*. Bureau of Mines Bulletin 503, N70-74476; AD-701575 (1952).

**Figura 21 – Límites de Inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno.**

### *Temperatura de Autoignición*

Las temperaturas de ignición son dependientes de la concentración y presión del hidrógeno gaseoso y del tratamiento superficial de los contenedores. Las temperaturas obtenidas son muy dependientes del sistema y de los valores seleccionados y sólo se deben aplicar a sistemas similares. A una presión de 101.3 kPa el rango de temperaturas de autoignición para hidrógeno estequiométrico en aire está entre 773 a 850 K; en oxígeno estequiométrico está entre 773 a 833 K.<sup>30</sup>

### *Energía mínima de la chispa para la ignición*

La mínima energía de la chispa para la ignición se define como la mínima energía de la chispa requerida para incendiar la concentración más fácilmente

<sup>30</sup> Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems. National Aeronautics and Space Administration (NASA).

incendiable del combustible en aire u oxígeno. En la siguiente tabla se muestra la mínima energía de la chispa del hidrógeno en aire para diferentes presiones:

**Tabla 6 – Energía mínima de la chispa para la ignición de una mezcla de hidrógeno-aire.<sup>31</sup>**

<i>Energía mínima de la chispa (mJ)</i>	<i>Presión (kPa)</i>
0.017	101.3
0.09	5.1
0.56	2.03

La mínima energía de chispa requerida para incendiar el hidrógeno es considerablemente inferior que la del metano (0.29mJ) o la de la gasolina (0.24mJ); sin embargo, la energía de ignición de estos tres combustibles es lo suficientemente baja que es relativamente cierto en presencia de cualquier fuente de ignición débil; como chispas, cerillas, superficies calientes, electricidad estática de un cuerpo humano puede ser suficiente para incendiar cualquiera de estos combustibles en aire.

### ***Franja de extinción***

La franja de extinción del hidrógeno a temperatura y presiones normales (NTP) del aire es de 0.6mm. Este valor depende de la temperatura, presión y composición de la mezcla del combustible gaseoso.

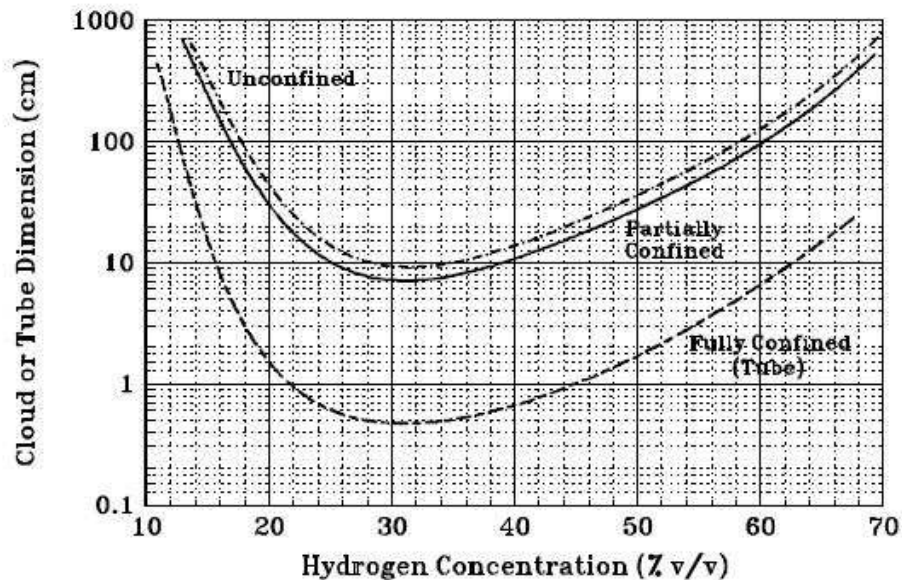
### ***Detonación***

El peor suceso resultante de la liberación de hidrógeno, es que se mezcle con un oxidante (normalmente aire), que la mezcla se sitúe dentro de las concentraciones de detonación, y que por lo tanto produzca una mezcla detonante. La flotabilidad positiva y la rápida difusión molecular del hidrógeno gaseoso hacen que cualquier escape se mezcle rápidamente con el gas de los alrededores. Si se produce la detonación, el resultado en la zona de reacción es una onda de choque y la onda expansiva que le acompaña que tiene un gran potencial para causar daños personales o de los equipos.

**Los límites de detonación** varían considerablemente con la naturaleza y dimensiones del confinamiento y no pueden ser especificadas para ninguna mezcla combustible-oxidante a menos que la naturaleza y dimensiones del confinamiento estén

<sup>31</sup> Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems. National Aeronautics and Space Administration (NASA).

también especificadas.<sup>32</sup> En la siguiente figura se muestran las mínimas dimensiones de la mezcla hidrógeno-aire para la detonación en tres tipos de confinamiento a una presión de 101.3 kPa. En la figura se observa la gran influencia que el tipo de confinamiento tiene en los límites de detonación.



Minimum Dimensions of H<sub>2</sub>-Air Mixtures for Detonation at 101.3 kPa (14.7 psia) and 298 K (77 °F)

Source: Lee, J. H., R., Kynstantus, C. M., Guirao, W. A., Benedick, and J. E. Shepherd. "Hydrogen-Air Detonations." Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on the Impact of Hydrogen on Water Reactor Safety. M. Berman, Ed., SAND82-2456, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, October (1982).

**Figura 22 – Límites de detonación de una mezcla de hidrógeno y aire dependiendo del tipo de confinamiento.**

La energía de detonación aumenta para mezclas pobres y ricas; sin embargo es posible producir detonaciones sobre conducidas si se introducen gran energía de ignición. Por lo tanto los límites de detonación que se encuentran en la literatura deben ser utilizados con cautela.

### *Transición de la deflagración a la detonación*

Una combustión hidrógeno-aire puede comenzar como una detonación o como una deflagración y luego transformarse en una detonación después de que la llama haya viajado una cierta distancia. El rango de composición en el cual se puede desarrollar una detonación es más estrecho que el de una deflagración. El rango normalmente citado para la detonación de la mezcla hidrógeno-aire es desde 18.5 al 59% de hidrógeno. Sin

<sup>32</sup> Benz, Bishop y Pedley 1988

embargo con mayores energías de ignición estos límites se pueden ampliar. Se necesita una fuente energética de iniciación para que una combustión comience como una detonación. Para que una deflagración pase a ser una detonación es necesario un mecanismo de aceleración de la llama.

### **2.4.3 Propiedades características del hidrógeno gaseoso**

El hidrógeno gaseoso tiene unas características particulares que deben ser especialmente analizadas.

#### ***Detección***

El hidrógeno gaseoso es incoloro, inodoro y no es detectable en ninguna concentración por los sentidos humanos. El hidrógeno no es tóxico pero puede resultar asfixiante al diluir el oxígeno necesario en el aire respirable. Una atmósfera que contenga una concentración de oxígeno inferior a 19.5 porcentaje en volumen se considera como deficiente en oxígeno.

#### ***Densidad Variable***

El hidrógeno es más ligero que el aire en condiciones normales (NTP) y tiende a subir a temperaturas superiores a 23 K. El vapor saturado es más pesado que el aire y permanece cerca del suelo hasta que aumenta la temperatura. Las velocidades de flotabilidad están relacionadas con la diferencia de densidades entre el combustible y el aire; por lo tanto, el combustible gaseoso frío y denso producido por los escapes de hidrógeno líquido subirán más lentamente que aquellos a temperatura y presión estándar. La velocidad de elevación del hidrógeno en condiciones normales (NTP) en aire está entre 1.2 a 9 m/s.

#### ***Llama incolora***

La llama hidrógeno-aire-oxígeno es incolora. Cualquier visibilidad de la misma es causada por impurezas. A presiones reducidas puede presentarse en un azul o morado pálidos.

#### ***Temperatura de la llama en aire***

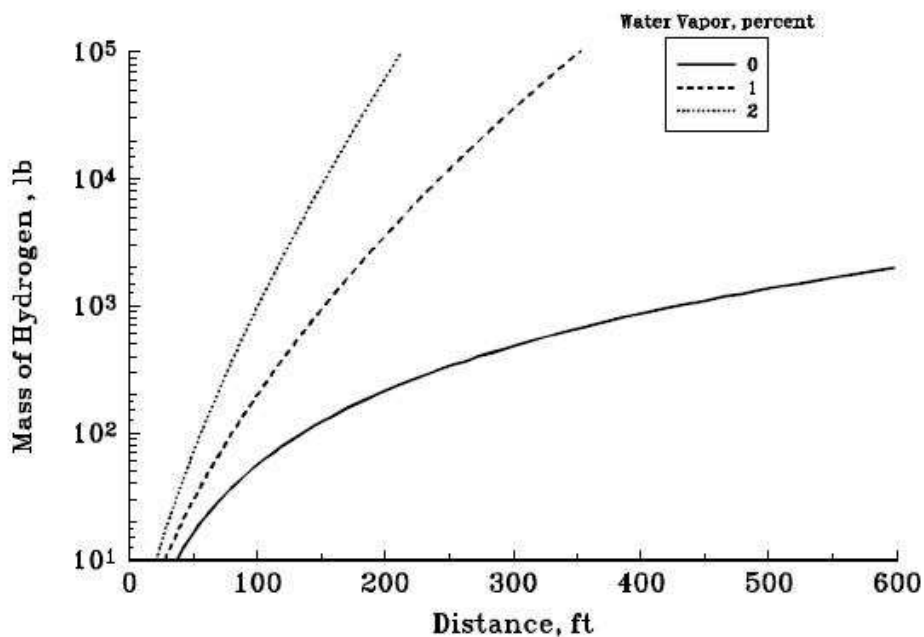
La temperatura de la llama para un porcentaje en volumen de hidrógeno de 19.6% es de 2321K.

**Velocidad de combustión en aire en condiciones normales.**

La velocidad de combustión en aire a condiciones normales, definida como la velocidad subsónica a la que la llama se propaga a través de una mezcla de aire combustible, es de 2.7 a 3.5 m/s. Las velocidades de combustión dependen de la presión, temperatura y composición de la mezcla. La alta velocidad de combustión del hidrógeno indica su alto potencial explosivo y la dificultad de confinar las llamas y explosiones de hidrógeno.

**Energía Térmica Radiante de la Llama**

La exposición a fuegos de hidrógeno puede resultar significativamente dañina por radiación térmica. La radiación térmica depende de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. La humedad atmosférica absorbe la energía térmica radiada desde un fuego y puede reducir los valores. Este efecto es significativo en los fuegos de hidrógeno. La intensidad de la radiación desde una llama de hidrógeno a una distancia determinada depende fuertemente de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera.



Variation in Distance from a Hydrogen Fire for a Thermal Radiation Exposure of 2 cal/cm<sup>2</sup> for an Exposure Duration of 10 s

Source: Zebetakis, M. G. and D. S. Burgess. *Research on the Hazards Associated With the Production and Handling of Liquid Hydrogen*. BM-RI-5707, Bureau of Mines Report of Investigation, Washington, DC (1961).

**Figura 23 – Variación de la distancia a un fuego de hidrógeno par una exposición a una radiación térmica de 2cal/cm<sup>2</sup> para un tiempo de exposición de 10s.**

### ***Coefficiente de Difusión en Aire en condiciones normales (NTP)***

El coeficiente de difusión para el hidrógeno en condiciones normales es de  $0.61\text{cm}^2/\text{s}$ .<sup>33</sup>

### ***Índice Limite de Oxígeno***

El índice límite de oxígeno es la concentración mínima de oxígeno que puede mantener la propagación de una llama en una mezcla de combustible, aire y nitrógeno. Ninguna mezcla de hidrógeno, aire y nitrógeno en condiciones normales propagará una llama si la mezcla contiene menos de un cinco por ciento en volumen de oxígeno.

### ***Coefficiente de Joule-Thomson***

El hidrógeno tiene un coeficiente de Joule-Thomson negativo. Esto significa que el hidrógeno ante una expansión isentálpica se calienta. Aunque este calentamiento no aumenta el peligro de ignición de forma significativa.

## **2.4.4 Propiedades características del hidrógeno líquido**

Todos los peligros que existen con el hidrógeno gaseoso también existen con el hidrógeno líquido debido a la facilidad con la que este último se evapora. Las propiedades características del hidrógeno líquido de particular preocupación por los peligros que suponen se analizan a continuación.

### ***Bajo punto de evaporación***

El hidrógeno líquido tiene el punto de ebullición a 20.3 K a la presión del nivel del mar. Cualquier hidrógeno líquido salpicado en la piel o en los ojos puede producir serias quemaduras por congelación o hipotermia. Inhalar gas o vapor frío produce dificultades respiratorias que pueden tener como resultado la asfixia.

### ***Formación de hielo***

Las aperturas y las válvulas de los tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido pueden bloquearse por la acumulación de hielo formado de la humedad del aire.

---

<sup>33</sup> Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems. National Aeronautics and Space Administration (NASA).



### ***Evaporación continua***

La continua evaporación del hidrógeno líquido en las aperturas genera hidrógeno gaseoso que debe ser purgado hasta un lugar seguro o temporalmente confinado de forma segura. Los tanques de almacenamiento se deben mantener sobrepresión para prevenir que el aire entre en ellos. El hidrógeno líquido es objeto de contaminación con aire condensado y solidificado de la atmósfera. Esta mezcla es fácilmente incendiable y puede entonces detonar.

### ***Alta densidad***

La alta densidad del vapor saturado puede causar que la nube de hidrógeno fluya horizontalmente o de forma descendente inmediatamente después de liberarse en un escape de hidrógeno líquido.