



Programa Europeo de Formación de Formadores para Equipos de Respuesta

## Tema 2

# Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

## NIVEL I

### Bombero

La información aportada en este tema está dirigida a los niveles **Bombero** y superiores.

Este tema también está disponible en los niveles II, III y IV

Este tema forma parte del conjunto de materiales formativos para los niveles I – IV: Bombero, Jefe de equipo (Oficial), Subjefe de intervención / Jefe de intervención y Técnico Asesor / Bombero Especialista. Es importante consultar el tema de introducción en el que se detalla la información relativa a las competencias y expectativas de aprendizaje

Nota: estos materiales son propiedad del Consorcio HyResponder y deben ser reconocidos como tal; se han utilizado como base los resultados de HyResponse



### Descargo de responsabilidad

A pesar del cuidado que se ha puesto en elaborar este documento, se aplica el siguiente descargo de responsabilidad: la información en este documento se proporciona tal como es y no se garantiza que la información sea adecuada para un fin concreto. El usuario de la misma empleará la información por su propia cuenta y riesgo.

Este documento refleja únicamente las opiniones de los autores. La FCH JU y la Unión Europea no se responsabilizan del uso que pueda hacerse de la información aquí incluida.

### Agradecimientos

El proyecto ha recibido financiación de la FCH JU (now Clean Hydrogen Partnership) en virtud del acuerdo de subvención nº 875089. La JU recibe apoyo del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 y de Reino Unido, Francia y Austria, Bélgica, España, Alemania, Italia, Chequia, Suiza y Noruega.



## Resumen

En este tema se abordan las propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad. Las ventajas del hidrógeno sobre los combustibles tradicionales basados en hidrocarburos son evidentes:

- no genera emisiones de CO<sub>2</sub> durante su combustión;
- el hidrógeno puede producir más energía por unidad de masa;
- puede generarse a partir de una serie de fuentes renovables como el viento, el sol, las mareas y la energía hidráulica.

Desde el punto de vista de la seguridad, el hidrógeno no es más o menos peligroso que otros combustibles, pero es diferente. Esta diferencia radica en sus propiedades físicas específicas y sus características de combustión. No solo los primeros intervinientes, sino también el público en general, deben conocer estas propiedades, ya que están directamente relacionadas con el comportamiento peligroso del hidrógeno. Por ejemplo, las fugas de hidrógeno son difíciles de detectar por los sentidos humanos porque es incoloro, inodoro e insípido. El hidrógeno tiene una llama invisible cuando arde en una atmósfera limpia. Es propenso a las fugas, y los incendios de hidrógeno pueden devenir en explosiones. Con todo, la principal baza de seguridad del hidrógeno es su mayor flotabilidad frente a los demás gases, que le permite fluir fuera del lugar de un incidente/accidente y mezclarse con el aire hasta alcanzar niveles de concentración seguros.

En esta clase se relacionan las características estructurales, físicas, químicas, de ignición, de combustión y otras del hidrógeno con una serie de consideraciones de seguridad. También se comparan los principales parámetros del hidrógeno con los de los combustibles tradicionales que se utilizan actualmente.

Reconocemos la aportación del proyecto HyResponse, ya que los materiales aquí presentados se basan en las clases originales de HyResponse (<http://www.hyresponse.eu>).

## Palabras clave

Flotabilidad, ignición, combustión, límite de inflamabilidad, detonación

## Índice

|  |    |
|--|----|
| Resumen  | 3  |
| Palabras clave   | 3  |
| 1. Público destinatario                                  | 5  |
| 1.1 Descripción de funciones: Bombero                    | 5  |
| 1.2 Nivel de competencia: Bombero                        | 5  |
| 1.3 Conocimientos previos: Bombero                       | 5  |
| 2. Introducción y objetivos                              | 5  |
| 3. Diferentes formas de hidrógeno                        | 7  |
| 3.1 Hidrógeno atómico y molecular                        | 7  |
| 3.2 Formas gaseosas, licuadas y aguanieve del hidrógeno  | 7  |
| 4. Propiedades físicas del hidrógeno                     | 10 |
| 4.1 Flotabilidad del hidrógeno como recurso de seguridad | 10 |
| 4.2 Propiedades de ignición                              | 11 |
| 4.3 Radiación de la llama                                | 13 |
| 4.4 Límites de detonabilidad                             | 14 |
| 5. Comparación del hidrógeno con otros combustibles      | 14 |
| Referencias  | 18 |

## 1. Público destinatario

La información aportada en esta clase está dirigida al NIVEL 1: Bombero. También hay clases disponibles en los niveles II, III y IV: jefe de equipo (Oficial), subjefe de intervención / jefe de intervención y técnico asesor / Bombero especialista.

A continuación se describen las funciones, el nivel de competencia y las expectativas de aprendizaje asumidas por el Bombero.

### 1.1 Descripción de funciones: Bombero

El bombero es responsable y se espera que sea capaz de realizar operaciones de forma segura con Equipo de Protección Individual (EPI), incluido el Equipo de Respiración Autónoma (ERA), y utilizando el equipamiento necesario, como por ejemplo vehículos, escaleras, mangueras, extintores, equipos de comunicación y rescate, en todo tipo de condiciones climáticas y situaciones de emergencia en las que se pueda prever de un modo razonable que requerirán una respuesta.

### 1.2 Nivel de competencia: Bombero

Entrenado en el uso seguro y correcto de EPI, ERA y demás equipos que pueda utilizar; los primeros intervinientes deben poseer los conocimientos y práctica necesaria. Es necesario que los comportamientos que los mantendrán seguros a ellos y a otros compañeros se describan en los Procedimientos Operativos Estándar (SOP). Se requiere la capacidad práctica para evaluar de forma dinámica el riesgo para la propia seguridad y la de los demás.

### 1.3 Conocimientos previos: Bombero

MEC 2 Conocimientos básicos de un campo de trabajo o estudio. Habilidades cognitivas y prácticas básicas necesarias para utilizar información relevante a fin de realizar tareas y resolver problemas rutinarios utilizando reglas y herramientas sencillas. Trabajar o estudiar bajo supervisión con cierta autonomía.

## 2. Introducción y objetivos

El hidrógeno como nuevo vector energético ofrece muchas ventajas sobre los combustibles tradicionales basados en hidrocarburos. Es eficiente energéticamente, respetuoso con el medio ambiente y puede obtenerse de fuentes renovables. Es posible que en el futuro resuelva muchos problemas ecológicos y de seguridad energética. Desde hace más de un siglo, el hidrógeno se produce y se utiliza con un alto nivel de seguridad para fines comerciales e industriales [1]. Sin embargo, el uso más amplio de las tecnologías de pilas de combustible e hidrógeno (FCH) por el público general (no solo por profesionales capacitados) requerirá una nueva cultura de seguridad, estrategias de seguridad y soluciones de ingeniería innovadoras. Para ello, los primeros intervinientes, los ingenieros, los diseñadores, el personal operativo, etc. deben ser conscientes de todos los peligros específicos relacionados con la manipulación y el uso de sistemas FCH. Cabe señalar que la mayoría de los peligros del hidrógeno están directamente relacionados con sus propiedades. Por tanto, los intervinientes han de conocer las propiedades físicas y químicas generales, así como de las características de inflamabilidad e ignición del hidrógeno.

El objetivo de esta clase es aportar a los intervinientes conocimientos esenciales sobre las propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad. Los intervinientes deben ser conscientes de que el hidrógeno tiene un conjunto específico de propiedades y características que lo diferencian de los vectores energéticos de los combustibles fósiles, como el gas licuado de petróleo (GLP), el gas natural comprimido (GNC) y los combustibles de hidrocarburos. Esta clase considera el efecto de la estructura atómica y molecular del hidrógeno en los aspectos de seguridad de su almacenamiento (por ejemplo, los efectos térmicos de la conversión orto-hidrógeno y para-hidrógeno). También se analizan las consideraciones de seguridad asociadas a los tres estados agregados del hidrógeno: gas, líquido y aguanieve. Es importante que los intervinientes reconozcan que el gas hidrógeno es inodoro, incoloro e insípido, por lo que las posibles fugas no pueden ser detectadas por los sentidos humanos. El uso de agentes odorizantes especiales (como los utilizados con el gas natural) no es aceptable para los sistemas de hidrógeno, porque pueden contaminar las pilas de combustible [1]. Los peligros asociados al proceso de licuefacción y al almacenamiento/distribución/manipulación del hidrógeno líquido se abordan en esta clase y se detallan en la Clase 5 - Hidrógeno licuado.

La principal ventaja en cuanto a seguridad del hidrógeno es su flotabilidad, que es la más alta de la Tierra. Además, en esta clase se comparan la densidad del vapor de hidrógeno, la difusividad, la viscosidad, la conductividad térmica, el calor específico y la relación de calor específico, así como otros parámetros, con los de los combustibles tradicionales. Durante esta

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

clase, los miembros de equipos de respuesta aprenderán las principales características de inflamabilidad, los parámetros de ignición y los límites de detonabilidad de las mezclas de hidrógeno-aire e hidrógeno-oxígeno. Las propiedades mencionadas se presentan en comparación con otros combustibles conocidos. El conocimiento de algunas características como la visibilidad de la llama, la temperatura de autoignición, los efectos de los diluyentes e inhibidores en el rango de inflamabilidad, la temperatura adiabática de la llama, la radiación térmica de las llamas, el enfriamiento y los límites de detonación serán muy útiles para quienes participen directamente en la extinción de incendios de hidrógeno. Los peligros fisiológicos (para la salud) del hidrógeno, aunque se mencionan en esta clase, se tratarán detalladamente en posteriores clases. Se concluye que los problemas de seguridad de los sistemas de hidrógeno no son más graves sino diferentes a los de los combustibles utilizados actualmente [2].

Al final de esta clase, los intervinientes podrán:

- Comprender el efecto de la estructura atómica y molecular en las consideraciones de seguridad para el almacenamiento y la manipulación del hidrógeno;
- Interpretar el diagrama de fases del hidrógeno e identificar sus tres estados agregados;
- Reconocer los peligros fisiológicos asociados al  $HG_2$  (asfixia) y al  $HL_2$  (quemaduras criogénicas, congelación, hipotermia, daños pulmonares por inhalación de vapores fríos);
- Relacionar la baja densidad de vapor de  $GH_2$  con la flotabilidad como principal ventaja de seguridad;
- Explicar el proceso de combustión del hidrógeno y sus principales atributos;
- Indicar las concentraciones estequiométricas y el rango de inflamabilidad de las mezclas de hidrógeno-aire e hidrógeno-oxígeno;
- Explicar el efecto de diferentes factores (temperatura, presión, dirección de propagación de la llama, diluyentes e inhibidores, etc.) sobre la inflamabilidad del hidrógeno;
- Definir las principales propiedades de ignición: energía mínima de ignición, temperatura de autoignición, temperatura adiabática de la llama, punto de inflamación, distancia mínima de seguridad experimental, velocidad de combustión laminar;
- Comparar los límites de detonabilidad del hidrógeno con los de los combustibles comunes y con el rango de inflamabilidad del hidrógeno;
- Describir los parámetros de extinción de las microllamas de hidrógeno y de las llamas de hidrógeno (distancia de enfriamiento, abertura de enfriamiento, límites de extinción, límites de soplado)

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

- Relacionar las propiedades físicas, químicas, de ignición y de combustión con los riesgos/fenómenos peligrosos del hidrógeno (fugas, incendios, explosiones);
- Explicar las diferencias (y semejanzas) en las propiedades físicas/características de combustión/parámetros de encendido entre el hidrógeno y los combustibles comunes.

### 3. Diferentes formas de hidrógeno

#### 3.1 Hidrógeno atómico y molecular

El número atómico del hidrógeno (H) en la tabla periódica es 1, y su masa atómica es 1,008 (aproximada por cuatro dígitos) [3].

#### 3.2 Formas gaseosas, licuadas y aguanieve del hidrógeno

A temperatura y presión estándar (TPE<sup>1</sup>), el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido. Por este motivo, los sentidos humanos no detectan bien sus fugas. Por desgracia, compuestos como los mercaptanos (normalmente utilizados como odorantes para detectar fugas de gas natural) no pueden añadirse a los sistemas de hidrógeno, porque contaminan ("envenenan") las pilas de combustible. Además, debido al menor tamaño de las moléculas de hidrógeno en comparación con las de los odorantes conocidos, el hidrógeno puede migrar/fugarse por aberturas cuyo tamaño no es suficiente para el paso de odorantes. El hidrógeno tiende a alejarse de la fuente de la fuga más rápidamente que los odorantes debido a su coeficiente de flotación y dispersión. El hidrógeno es un compuesto no tóxico, no corrosivo e inflamable. Sin embargo, el hidrógeno puede causar asfixia al diluir el oxígeno en el aire por debajo de los niveles de concentración necesarios para mantener la vida. Es el más ligero de todos los gases conocidos. *El hidrógeno gaseoso* (HG<sub>2</sub>) es 14 veces más ligero que el aire (la densidad de vapor del hidrógeno es 1; la densidad de vapor del aire es 14), por eso se elevará y difundirá rápidamente al liberarse en el aire. El hidrógeno se utiliza mucho como agente reductor en una serie de procesos químicos. Aunque el hidrógeno no es corrosivo ni reactivo en condiciones normales, puede reducir la resistencia mecánica de algunos materiales mediante una serie de procesos de interacción denominados comúnmente fragilización de hidrógeno.

*El hidrógeno líquido* (HL<sub>2</sub>) es un líquido incoloro, inodoro, no corrosivo y no muy reactivo. Es un fluido criogénico (nota: los fluidos con temperaturas inferiores a -73 °C se conocen como criogénicos) [3]. Las salpicaduras de hidrógeno líquido en la piel o en los ojos pueden provocar graves quemaduras por congelación o por hipotermia. El HL<sub>2</sub> hierve rápidamente o se convierte en gas si se expone o se derrama en un entorno con temperatura normal. Calentar el HL<sub>2</sub> hasta la temperatura ambiente puede dar lugar a presiones muy elevadas en espacios

---

<sup>1</sup> Temperatura y presión estándar (TPE): 273,15 K (0°C) y 101,325 Pa.



## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

cerrados. Tenga en cuenta que la inhalación de vapores fríos puede provocar molestias respiratorias y, al final, asfixia.

La proporción volumétrica entre  $HL_2$  y  $HG_2$  es 1:848. El  $HL_2$  se expande aproximadamente 850 veces al convertirse en gas a temperatura y presión normales (TPN<sup>2</sup>), por lo que se almacena a presiones relativamente bajas en contenedores de doble pared, aislados al vacío y equipados con discos de ruptura, respiraderos y dispositivos de alivio de presión (PRD). Tiene la densidad más baja de todos los gases licuados. A diferencia del propano, la compresión del hidrógeno gaseoso no lo licua. Así pues, la fase  $HL_2$  está ausente en los depósitos de almacenamiento de hidrógeno gaseoso y, en caso de incendio, no existe el riesgo de explosión de vapores en ebullición (BLEVE) [7]. Los depósitos de almacenamiento de  $HG_2$  también incorporan PRD para permitir una ventilación controlada del gas hidrógeno. Esto se tratará con más detalle en la clase sobre la seguridad del almacenamiento de hidrógeno.

El diagrama de fases del hidrógeno se presenta en la [Figura 1](#). Hay tres curvas en el diagrama de fases del hidrógeno. Una curva muestra el cambio de la temperatura de ebullición (o condensación para la transición de fase opuesta) con la presión; otra curva indica el cambio de la temperatura de fusión (o congelación) con la presión, y la tercera indica las presiones y temperaturas para el proceso de sublimación. El proceso de condensación también se conoce como *liquefacción* [3].

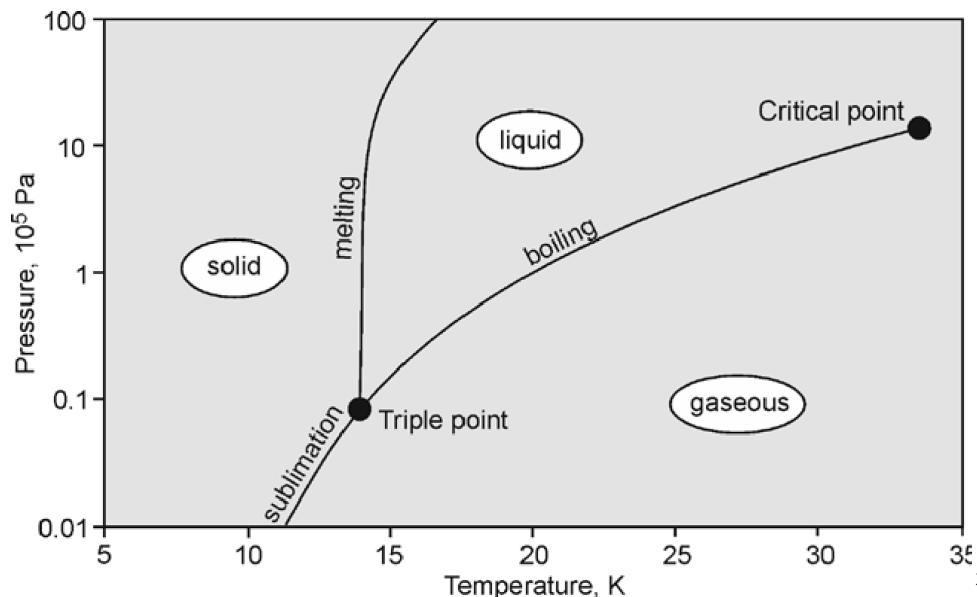


Figura 1. Diagrama de fases del hidrógeno [3]

<sup>2</sup> Temperatura y presión normales (TPN): 293,15 K (20°C) y 101,325 Pa.

<sup>3</sup> Pressure: presión. Temperature: temperatura. Solid: sólido. Liquid: líquido. Gaseous: gaseoso. Sublimation: sublimación. Melting: fusión. Boiling: ebullición. Triple point: punto triple. Critical point: punto crítico.

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

El hidrógeno puede existir en forma gaseosa, líquida o de aguanieve. El  $HL_2$  es un líquido claro con un tinte azul claro. El hidrógeno en aguanieve es una mezcla de hidrógeno sólido y líquido a la temperatura del punto triple. La transición entre las fases gaseosa, líquida y sólida del hidrógeno está dominada por las bajas temperaturas.

El  $HL_2$  tiene una densidad de  $70,78 \text{ kg/m}^3$ , que es aproximadamente 14 veces menos densa que el agua: la *gravedad específica* del  $HL_2$  es de 0,071 frente a 1 del agua. La mayor densidad del vapor de hidrógeno saturado a bajas temperaturas puede hacer que la nube de hidrógeno fluya horizontalmente o incluso hacia abajo inmediatamente después del escape si se produce un derrame o una fuga de  $HL_2$ , o se libera gas a una temperatura inferior a 193 K [8]. Los primeros intervinientes deben tener en cuenta estos datos cuando trabajen en el lugar del accidente [3].

Un importante problema de seguridad en el uso del  $HL_2$  es que todos los gases, a excepción del helio, se condensarán y solidificarán a tan baja temperatura (si se exponen a ella). Las fugas de aire u otros gases expuestos directamente al hidrógeno líquido pueden provocar varios peligros [6]. Los gases solidificados pueden taponar tuberías, orificios y atascar válvulas debido a la formación de hielo. En un proceso conocido como criobombeo; la reducción del volumen de los gases condensados puede crear un vacío que atrae aún más gas, por ejemplo un oxidante como el aire. Se pueden acumular grandes cantidades de materiales condensados o solidificados y desplazar al  $HL_2$  si la fuga persiste durante largos periodos de tiempo. En algún momento, si se calienta el sistema para su mantenimiento, estos materiales solidificados se vaporizarán, lo que puede dar lugar a altas presiones o formar mezclas explosivas. Estos otros gases también podrían transferir calor al hidrógeno líquido y provocar mayores pérdidas por evaporación o un aumento "inesperado" de la presión [3].

El hidrógeno líquido suele transferirse en las líneas aisladas al vacío. Sin embargo, cuando el hidrógeno frío fluye en tubos con un aislamiento térmico insuficiente, esto puede enfriar fácilmente el sistema por debajo de los 90 K, de modo que puede haber aire condensado con un contenido de oxígeno de hasta el 52% (el NBP del nitrógeno es de 77,36 K, el NBP del oxígeno es de 90,15 K, el NBP del dióxido de carbono es de 216,6 K). El condensado líquido tiene el aspecto y el comportamiento del agua. Este condensado enriquecido con oxígeno aumenta la inflamabilidad de los materiales y hace que los materiales, que normalmente no son inflamables, ardan. Aquí se incluyen, por ejemplo, las cubiertas bituminosas de las carreteras. Esto es especialmente preocupante cuando se transfieren grandes cantidades de hidrógeno. Si un equipo no se puede aislar de forma adecuada, la zona de debajo debe estar libre de cualquier material orgánico [3]. El enriquecimiento con oxígeno puede aumentar la inflamabilidad e incluso inducir la formación de compuestos sensibles a los golpes. Si una partícula enriquecida con oxígeno contamina el gas hidrógeno criogénico, esta mezcla puede incluso detonar. Los recipientes con  $HL_2$  deben calentarse y purgarse periódicamente para

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

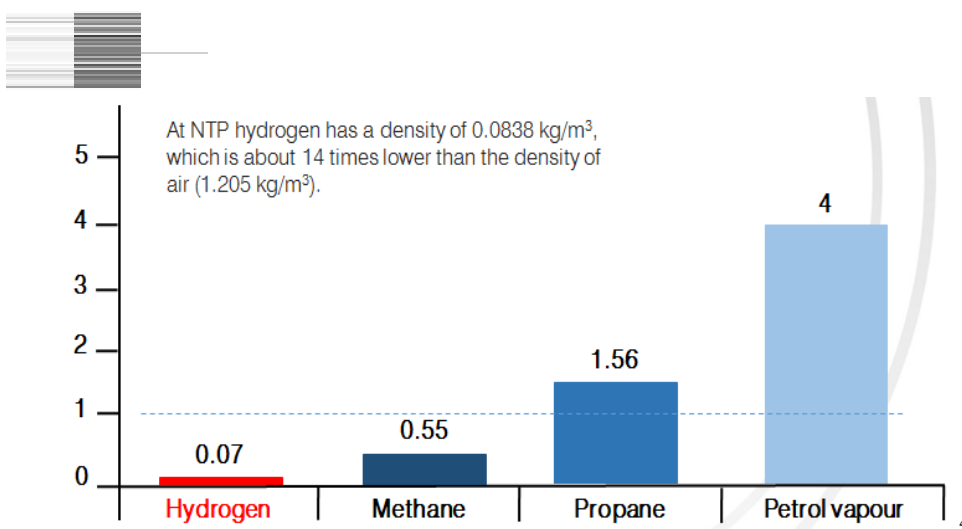
mantener el contenido de oxígeno acumulado en el recipiente por debajo del 2% [6]. Hay que tener cuidado si se utiliza dióxido de carbono como gas de purga. Puede ser difícil eliminar todo el dióxido de carbono de los puntos bajos del sistema donde el gas se acumula [3].

Aunque puede pasar una corriente eléctrica a través del  $HL_2$ , esta puede explicarse en términos de portadores de carga formados por la radiación de fondo. Así, la capacidad de transporte de corriente es pequeña y más o menos independiente de la tensión impuesta. La investigación ha demostrado que la acumulación de carga eléctrica en el  $HL_2$  de alta pureza que fluye no es una gran preocupación [8].

## 4. Propiedades físicas del hidrógeno

### 4.1 Flotabilidad del hidrógeno como recurso de seguridad

El hidrógeno gaseoso tiene una densidad de  $0,0838 \text{ kg/m}^3$  (a TPN), que es más de 14 veces menor que la del aire ( $1,205 \text{ kg/m}^3$ ) en las mismas condiciones. Los pesos específicos del hidrógeno y del aire en a TPN son de 0,07 y 1,0, respectivamente (Figura 2). Por lo tanto, el gas hidrógeno es más ligero que el aire y, en condiciones ambientales, se elevará y se dispersará en un entorno abierto [7]. En cuanto a otros combustibles, el propano y el vapor de gasolina son más pesados que el aire, mientras que el metano, es decir, el gas natural, es 2 veces más ligero que el aire pero casi 8 veces más pesado que el gas hidrógeno.



<sup>4</sup> At NTP hydrogen has a density of  $0.0838 \text{ kg/m}^3$ , which is about 14 times lower than the density of air ( $1.205 \text{ kg/m}^3$ ): En TNP el hidrógeno tienen una densidad de  $0,0383 \text{ kg/m}^3$ , que es aproximadamente 14 veces menor que l densidad del aire ( $1,205 \text{ kg/m}^3$ ). Hydrogen: hidrógeno. Methane: metano. Propane: propano. Petrol vapour: vapor de gasolina.

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

### Figura 2 Densidades relativas al aire del hidrógeno y otros combustibles comunes

Así, la baja densidad de vapor del hidrógeno hace que el gas sea muy *flotante* comparado con otros compuestos. De hecho, el hidrógeno tiene la mayor flotabilidad de la Tierra. Esta es la principal ventaja en cuanto a seguridad del hidrógeno, es decir, cuando se produzcan fugas de hidrógeno, este se elevará y se dispersará con rapidez. Las consecuencias indeseadas de las emisiones de hidrógeno en la atmósfera abierta y en espacios parcialmente cerrados (sin acumulación de hidrógeno) se reducen notablemente gracias a la flotabilidad [3]. Los combustibles más pesados a base de hidrocarburos pueden formar nubes combustibles bastante grandes, como en las desastrosas explosiones de Flixborough, 1974 [9] y Buncefield, 2005 [10]. En muchas situaciones de la vida real, los hidrocarburos pueden suponer riesgos de incendio y explosión más graves que el hidrógeno.

El hidrógeno puro es positivamente flotante por encima de la temperatura de 22 K, es decir, en casi todo el rango de temperaturas de su estado gaseoso [4].

#### 4.2 Propiedades de ignición

El hidrógeno se enciende muy fácilmente [5]. Entre las posibles fuentes de ignición destacan las chispas mecánicas de las válvulas que se cierran rápidamente, las descargas electrostáticas de los filtros de partículas sin conexión a tierra, las chispas de los equipos eléctricos, las partículas de los catalizadores, los equipos de calefacción, los rayos que caen cerca de la chimenea de ventilación, etc. Por ello, cabe eliminar o aislar las fuentes de ignición de forma adecuada y cualquier operación se debe realizar como si pudieran generarse fuentes de ignición imprevistas [3].

*Temperatura de autoignición* es la temperatura mínima necesaria para iniciar una reacción de combustión de una mezcla de combustible y comburente en ausencia de cualquier fuente externa de ignición. La temperatura estándar de autoignición del hidrógeno en el aire es superior a 510 °C [14]. Es relativamente alta en comparación con los hidrocarburos de moléculas largas. No obstante, superficies catalíticas la pueden rebajar. Los objetos a temperaturas que van de 500 a 580 °C pueden encender mezclas de hidrógeno-aire o hidrógeno-oxígeno a presión atmosférica. Los objetos sustancialmente más fríos, a unos 320 °C, pueden provocar ignición bajo contacto prolongado a una presión inferior a la atmosférica [5]. La temperatura de ignición del chorro de aire caliente es de 670 °C [4]. La temperatura indicada depende en gran medida del sistema, y los valores seleccionados para la comparación han de aplicarse únicamente a sistemas similares. Como se indica en la [Figura 3](#) el hidrógeno, el propano y el gas natural (metano) tienen valores muy similares de temperaturas de autoignición. Los tres combustibles tienen temperaturas de autoignición que son al menos el doble de la temperatura de autoignición del vapor de gasolina [7].

Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

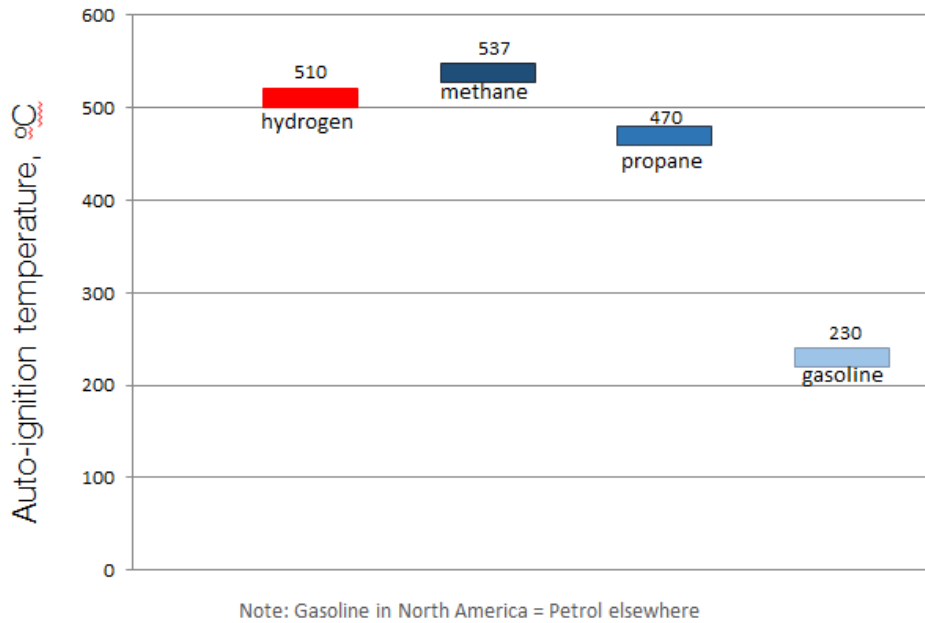


Figura 3 Temperaturas de autoignición, basadas en datos publicados en [3], para hidrógeno y otros combustibles.

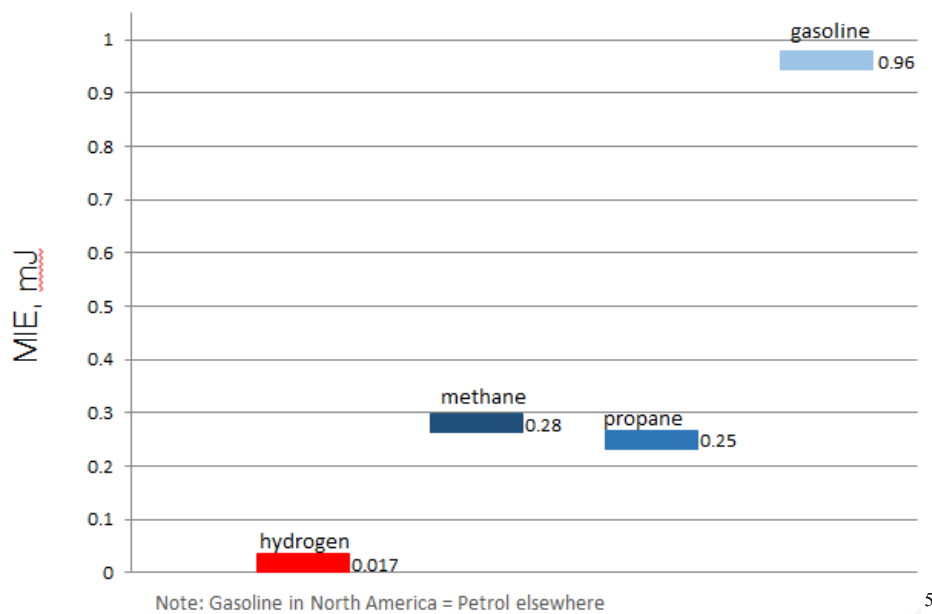


Figura 4 Valores EMI basados en datos publicados en [3], para hidrógeno y otros combustibles.

*Energía Mínima de Ignición* (EMI) de gases y vapores inflamables es el valor mínimo de la energía eléctrica, almacenada en el circuito de descarga con la menor pérdida posible en los conductores, que (al descargarse a través de un hueco de chispa) acaba de encender la mezcla

<sup>5</sup> MIE: EMI. Hydrogen: hidrógeno. Methane: metano. Propane: propano. Gasoline: gasolina.

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

en reposo en la composición más inflamable [3]. Una chispa débil causada por la descarga de electricidad estática de un cuerpo humano puede ser suficiente para encender cualquiera de los combustibles indicados en la Figura 4.

El *punto de inflamación* es la temperatura más baja a la que el combustible produce suficientes vapores en su superficie para formar una mezcla inflamable con el aire [3]. Las temperaturas del punto de inflamación del hidrógeno y otros combustibles comunes, extraídas de [3, 14] se resumen en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Puntos de inflamación para hidrógeno y otros combustibles comunes

|                                 | Hidrógeno | Metano | Propano | Gasolina | Diésel |
|---------------------------------|-----------|--------|---------|----------|--------|
| <b>Punto de inflamación, °C</b> | -253      | -188   | -96     | -(11-45) | 37.110 |

La *Brecha de seguridad máxima experimental* de los gases y vapores inflamables es el valor más bajo de la brecha de seguridad medida, según la norma IEC 60079-1-1 (2002), al variar la composición de la mezcla. La separación segura es la anchura (determinada con una longitud de separación de 25 mm) a la que no se produce un retroceso de la llama, en el caso de una composición de mezcla determinada [3].

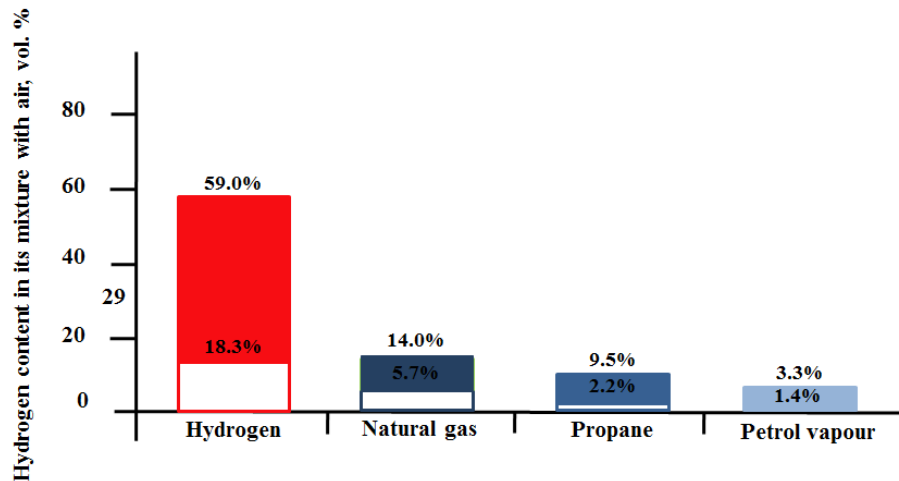
La *temperatura de llama* para un 19,6 % vol. de hidrógeno en aire se ha medido en 2,318 K [20]. Un peligro evidente derivado de esta propiedad son las graves quemaduras de las personas expuestas directamente a las llamas de hidrógeno. La temperatura de llama máxima del hidrógeno es 2.400 K [8].

### 4.3 Radiación de la llama

El hidrógeno arde con llamas de color azul muy pálido y no emite luz visible durante el día (porque la radiación solar puede tapar la visibilidad de la llama) ni humo (solo produce agua cuando arde en el aire), a menos que se arrastren y quemem partículas de sodio o de polvo junto con la mezcla combustible. Comparado con los hidrocarburos, las llamas de hidrógeno irradian mucho menos calor. Por ello es posible que una persona no sienta este calor a menos que entre en contacto directo con la llama. Un incendio de hidrógeno puede pasar desapercibido y se propagará a pesar de cualquier vigilancia directa por las personas que se encuentren en las zonas en las que el hidrógeno se puede filtrar, derramar o acumular y formar mezclas potencialmente combustibles. Por eso, los flujos de calor por convección y radiación son parámetros importantes y deben evaluarse para proteger la vida humana, la propiedad y el medio ambiente.

#### 4.4 Límites de detonabilidad

La detonación es la peor consecuencia posible de un accidente con hidrógeno. El hidrógeno posee un rango de detonabilidad más amplio en comparación con otros combustibles (Figura 5). El diagrama muestra los límites de detonación superior e inferior para cuatro combustibles [6].



6

Figura 5 Rango de detonabilidad según datos publicados en [6] para hidrógeno y otros combustibles comunes

El rango de detonabilidad mencionado en el informe técnico [6] se sitúa entre 18 y 59 vol. % de hidrógeno en aire. Este rango es más estrecho que el rango de inflamabilidad de 4-75 vol. % y se encuentra dentro de él. Se informa de un rango de detonación de 13-70 vol. % para mezclas hidrógeno-aire en un tubo con diámetro de 43 cm [23]. En la instalación rusa de pruebas de detonación a gran escala RUT se observó un límite de detonabilidad inferior del 12,5% en volumen [3]. Alcock et al. recomiendan el rango de detonabilidad más amplio del hidrógeno en aire 11-59 vol. %. [13].

## 5. Comparación del hidrógeno con otros combustibles

El hidrógeno no es ni más ni menos peligroso que otros combustibles convencionales. El hidrógeno es un combustible inusual. Posee un conjunto único de características que difieren de otros combustibles conocidos. De los materiales antes mencionados en esta clase se deduce que las fugas de hidrógeno soportan la combustión a caudales mucho más bajos que

<sup>6</sup> Hydrogen content in its mixture with air: Contenido de hidrogeno en mezcla con aire. Hydrogen: hidrógeno. Natural gas: gas natural. Propane: propano. Petrol vapour: vapor de gasolina.

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

las fugas de otros combustibles [27]. Las llamas de hidrógeno son las más tenues de todos los combustibles, y sus límites de soplado de caudal másico son superiores a los del metano y el propano. Las llamas de hidrógeno provocan una corrosión mucho más rápida que las de metano cuando inciden en muestras de aluminio, acero inoxidable y fibras de carburo de silicio [31]. Se ha comprobado que el caudal volumétrico del hidrógeno por la misma vía de fuga, a idéntica presión de suministro, es significativamente mayor que el del metano y el propano [36]. El hidrógeno tiene los valores más bajos de masa molecular, densidad y viscosidad. La conductividad térmica del hidrógeno es significativamente mayor que la de otros gases. El coeficiente de difusión en el aire es el más alto de todos los gases. Las consecuencias indeseadas de las emisiones de hidrógeno en la atmósfera abierta y en espacios parcialmente cerrados (sin acumulación de hidrógeno) se reducen notablemente gracias a la flotabilidad, su ventaja en cuanto a la seguridad. El hidrógeno saldrá del lugar del incidente y se mezclará con el aire ambiente hasta un nivel de concentración seguro, es decir, inferior al LII (4 vol. % en el aire).

El hidrógeno tiene el mayor valor calorífico por unidad de masa y el menor por unidad de volumen. Para proporcionar una autonomía competitiva, el hidrógeno debe almacenarse como gas a presión o licuarse. Esto tiene implicaciones evidentes para la seguridad. El resumen de los principales parámetros físicos se incluye en la [Tabla 8](#).

El LII del hidrógeno es alto en comparación con la mayoría de los hidrocarburos. La concentración casi estequiométrica del hidrógeno en el aire (29,5 vol. %) es mucho mayor que la de los hidrocarburos (por lo general sólo un porcentaje). En el LII, el requisito de energía de ignición del hidrógeno es similar al del metano, y las fuentes de ignición débiles, como las chispas de los equipos eléctricos, las chispas electrostáticas o las chispas de los objetos que golpean, suelen implicar más energía de la que se requiere para encender estas mezclas inflamables [37].



Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

Tabla 2. Propiedades del hidrógeno en comparación con otros combustibles [7]

|                          | Hydrogen                   | Natural gas                 | Petrol             |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Colour                   | No                         | No                          | Yes                |
| Toxicity                 | None                       | Some                        | High               |
| Odour                    | Odourless                  | <u>Mercaptan</u>            | Yes                |
| Buoyancy relative to air | 14 times lighter           | 2 times lighter             | 3.75 times heavier |
| Energy by weight         | 2.8 times more than petrol | ~1.2 times more than petrol | 43 MJ/kg           |
| Energy by volume         | 4 times less than petrol   | 1.5 times less than petrol  | 120 MJ/Gallon      |

7

En la [Tabla 3](#) se presenta una comparación de los principales índices de inflamabilidad y explosión del hidrógeno y otros combustibles.

Tabla 3. Comparación de los índices de inflamabilidad y explosividad del hidrógeno y otros combustibles [6, 7]

|  | Hydrogen  | Natural gas | <u>Petrol vapour</u> |
|--|-----------|-------------|----------------------|
| Flammability in air (LFL – UFL), vol. %        | 4.1 - 75  | 5.3 - 15    | 0.8 - 8.1            |
| <u>Detonability</u> in air (LDL – UDL), vol. % | 18.3 - 59 | 5.7 - 14    | 1.4 - 3.3            |
| Stoichiometric mixture in air, vol. %          | 29.59     | 9           | 2                    |
| Flame temperature (°C)                         | 2130      | 1961        | 1977                 |

8

Esta velocidad de combustión laminar de la mezcla estequiométrica de hidrógeno-aire, de unos 2 m/seg, es mucho mayor que la de la mayoría de los hidrocarburos, cuyas velocidades se sitúan en el rango de 0,30-0,45 m/seg. El hidrógeno es más propenso a la transición deflagración-detonación (TDD) que la mayoría de los otros gases inflamables [3].

<sup>7</sup> Colour: color. Toxicity: toxicidad. Odour: olor. Buoyancy relative to air: Flotabilidad con respecto al aire. Energy by weight: energía en peso. Energy by volume: energía en volumen. Hydrogen: hidrógeno. Natural gas: gas natural. Petrol: petróleo. Yes: sí. None: ninguno. Some: un poco. High: elevado. Odourless: inoloro. Mercaptan: mercaptano. Times: veces. Lighter: más ligero. Heavier: más pesado. More than petrol: más que la gasolina. Less than petrol: menos que la gasolina. Gallon: galón.

<sup>8</sup> Hydrogen: hidrógeno. Natural gas: gas natural. Petrol vapour: vapor de gasolina. Flammability in air: inflamabilidad en el aire. Detonability in air: detonabilidad en el aire. Stoichiometric mixture in air: mezcla estequiométrica en el aire. Flame temperature: temperatura de la llama.

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

Comparado con otros combustibles, el hidrógeno es el más propenso a la ignición espontánea en emisiones repentinas al aire por el llamado mecanismo de difusión, cuando el aire a alta temperatura, calentado por un choque, se mezcla con el hidrógeno frío en la superficie de contacto entre estos dos gases y pueden iniciarse reacciones químicas cuando se alcanzan condiciones críticas. A decir verdad, el escape repentino de hidrógeno en una tubería llena de aire, tras la rotura de un disco de seguridad, puede inflamarse de modo espontáneo a presiones tan bajas como los 2 MPa [37]. Por otro lado, la temperatura estándar de autoignición del hidrógeno en el aire supera los 520 °C, más alta que la de los hidrocarburos. Cabe destacar que la temperatura de ignición del chorro de aire caliente es menor para el hidrógeno en comparación con todos los hidrocarburos, y disminuye a medida que aumenta el diámetro del chorro [37].

El rendimiento del octano (es decir, del hidrocarburo) se utiliza como estándar para medir la resistencia al golpeteo en los motores de combustión interna, y se le asigna un octanaje relativo de 100. Los combustibles con un índice de octano superior a 100 tienen más resistencia al autoencendido que el propio octano. El hidrógeno tiene un octanaje de investigación muy alto, por ello es resistente al golpeteo (combustión en condiciones "lean"), es decir, 130+ (combustión "lean") en comparación con otros combustibles: metano (125), propano (105), gasolina (87), diésel (30). El número de octano no es relevante para el uso del hidrógeno en las pilas de combustible [1]. La distancia de enfriamiento (el diámetro mínimo de la tubería a través del cual puede propagarse una llama premezclada) para el hidrógeno, el metano y el propano es de 0,51 mm, 2,3 mm y 1,78 mm, respectivamente [26]. Por tanto, el hidrógeno posee la menor distancia de enfriamiento [3].

Por lo general, los incendios de hidrógeno no se extinguen hasta que se ha cortado el suministro de hidrógeno debido al peligro de reignición y "explosión". Creitz [38] publicó resultados sobre extinción de llamas de difusión en un quemador colocado en una camisa de Pyrex para seis combustibles diferentes. La diferencia en la eficacia de extinción de un inhibidor introducido en ambos lados de la zona de reacción de las llamas de difusión se ha medido como función de la concentración de oxígeno en la mezcla de oxígeno-nitrógeno suministrada a las llamas. La Tabla 4 incluye una comparación de las características de extinción del nitrógeno (N<sub>2</sub>), el bromuro de metilo (CH<sub>3</sub>Br) y el bromuro de trifluorometilo (CF<sub>3</sub>Br) para diversos combustibles que arden en el aire (en porcentaje por volumen).

Tabla 4. Comparación de características de extinción del nitrógeno, el bromuro de metilo y el bromuro de trifluorometilo [38]

| Combustible | Porcentaje de inhibidor en el aire o el combustible en el momento de la extinción | Eficiencia en relación con el nitrógeno |
|-------------|---|---|
|-------------|---|---|

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

|                     | Cuando se añade al aire |                    |                    | Cuando se añade al combustible |                    |                    | Añadido a aire     |                    | Añadido a combustible |                    |
|---------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
|                     | N <sub>2</sub>          | CH <sub>3</sub> Br | CF <sub>3</sub> Br | N <sub>2</sub>                 | CH <sub>3</sub> Br | CF <sub>3</sub> Br | CH <sub>3</sub> Br | CF <sub>3</sub> Br | CH <sub>3</sub> Br    | CF <sub>3</sub> Br |
| Hidrógeno           | 94,1                    | 11,7               | 17,7               | 52,4                           | 58,1               | 52,6               | 8,0                | 5,3                | 0,9                   | 1,0                |
| Metano              | 83,1                    | 2,5                | 1,5                | 51,0                           | 28,1               | 22,9               | 33,2               | 55,4               | 1,8                   | 2,2                |
| Etano               | 85,6                    | 4,0                | 3,0                | 57,3                           | 36,6               | 35,1               | 21,4               | 28,5               | 1,6                   | 1,6                |
| Propano             | 83,7                    | 3,1                | 2,7                | 58,3                           | 34,0               | 37,6               | 27,0               | 31,0               | 1,7                   | 1,6                |
| Butano              | 83,7                    | 2,8                | 2,4                | 56,8                           | 40,0               | 37,9               | 29,9               | 34,9               | 1,4                   | 1,5                |
| Monóxido de carbono | 90,0                    | 7,2                | 0,8                | 42,8                           | 19,9               | -                  | 12,5               | 112                | 2,2                   | -                  |

Se comprobó que cuando el inhibidor se añadía al combustible, el porcentaje de volumen necesario para la extinción era mucho mayor que cuando se añadía al lado del oxígeno de la zona de reacción, con la única excepción de las llamas de CO inhibidas por el bromuro de trifluorometilo. Este resultado de Creitz [38] se explica por la ley de arrastre, según la cual el caudal másico del gas arrastrado a un penacho circundante crece con la distancia de la fuente de combustible y con el flujo de momento del penacho. Es bien sabido por la ciencia de la seguridad contra incendios que la cantidad de aire arrastrado en el fuego a la altura de la llama es aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que la cantidad de combustible liberado [3]. Por encima de concentraciones de oxígeno del orden del 25% en volumen, el bromuro de metilo era totalmente ineficaz cuando se añadía al lado del oxígeno de la zona de reacción, y por encima del 32% de oxígeno aproximadamente era ineficaz cuando se añadía al combustible, pues esta concentración de oxígeno arde sin combustible adicional.

La extinción de una llama de difusión puede verse afectada por una serie de factores, entre los que destacan la velocidad de suministro del combustible al quemador y la velocidad del aire secundario que pasa por la llama [38]. Este último efecto resultó ser importante a caudales más bien bajos o muy altos. Cuando el índice de suministro de combustible era demasiado bajo para un tamaño de quemador determinado, la llama no ardía y, por el contrario, cuando el índice era demasiado alto, se producía una elevación y la llama tendía a flotar y a extinguirse. Esta última observación de Creitz [38] podría deberse al efecto de apantallamiento de la camisa de Pyrex, que limita el arrastre de oxidante a la llama. Esta condición particular de la prueba limita la importancia de las conclusiones de tales experimentos [3].

En el ensayo realizado por Creitz [38] las condiciones de extinción del hidrógeno son las más difíciles entre los combustibles probados y requieren más inhibidor. El bromuro de metilo es más eficaz para extinguir la llama de difusión de hidrógeno en el aire comparado con el bromuro de trifluorometilo. El trabajo de Creitz [38] se entiende como un estudio comparativo de la eficacia de extinción de los inhibidores seleccionados para distintos

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

combustibles, y no como una recomendación cuantitativa sobre concentraciones de inhibidores para extinción de llamas reales, en especial llamas turbulentas no premezcladas, que son características de las tecnologías de hidrógeno [3].

## Referencias

1. Rigas, F y Amyotte, P (2013). Seguridad del hidrógeno. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
2. Rigas, F y Amyotte, P (2013). Mitos y hechos sobre los peligros del hidrógeno. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
3. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Parte I y Parte II. Disponible en: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), libro electrónico de descarga gratuita.
4. BRHS, Informe bienal sobre la seguridad del hidrógeno (2009). Red europea de excelencia "Safety of hydrogen as an energy carrier" (NoE HySafe). Disponible en: [www.hysafe.org](http://www.hysafe.org) [consultado el 06/11/2020].
5. NASA (1997). Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Directrices para el diseño de sistemas de hidrógeno, selección de materiales, operaciones, almacenamiento y transporte. Informe técnico NSS 1740.16, Oficina de Seguridad y Garantía de la Misión, Washington. Disponible en: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> se canceló el 25 julio 2005 [consultado el 06/11/2020].
6. ISO/TR 15916 (2004). Basic considerations for the safety of hydrogen systems. Organización Internacional de Normalización. Comité Técnico ISO 197 Tecnologías de Hidrógeno. Organización Internacional de Normalización, Ginebra.
7. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Disponible en: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [consultado el 06/01/2020].
8. Norma AIAA G-095-2004 (2004). Guía sobre la seguridad del hidrógeno y los sistemas de hidrógeno. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, USA.
9. Ejecutivo de Salud y Seguridad (1975). La catástrofe de Flixborough: informe del tribunal de investigación, HMSO, ISBN 0113610750, 1975.
10. Buncefield Investigation (2010). The Buncefield major incident investigation board. Disponible en: <https://www.hse.gov.uk/comah/buncefield/policyproceduresreport.pdf> [consultado el 06/11/2020].
11. Lind, CD (1975). ¿Qué causa las explosiones de nubes de vapor no confinadas? *Loss Prevention*, 9. pp. 101–105.
12. McCarty, RD, Hord, J, y Roder, HM (1981). Selección de propiedades del hidrógeno. Monográfico NBS 168, National Bureau of Standards, Boulder, CO, febrero 1981.

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

13. Alcock, JL, Shirvill, LC y Cracknell, RF (2001). Comparación de los datos de seguridad existentes sobre hidrógeno y combustibles comparativos. Informe del proyecto europeo FP5 EIHP2, mayo de 2001. Disponible en: [http://www.eihp.org/public/documents/CompilationExistingSafetyData\\_on\\_H2\\_and\\_CComparativeFuels\\_S.pdf](http://www.eihp.org/public/documents/CompilationExistingSafetyData_on_H2_and_CComparativeFuels_S.pdf) [consultado el 06/11/2020].
14. Baratov, AN, Korolchenko, AY y Kravchuk, GN (Eds.) (1990). Fire and explosion hazards of substances and materials. Moscú: Khimia. 496 p., ISBN 5-7245-0603-3 parte 1, ISBN 5-7245-0408-1 parte 2 (en ruso).
15. Yang, JC, Pitts, WM, Fernandez, M y Kuldeep, P (2011). Measurements of effective diffusion coefficients of helium and hydrogen through gypsum. Actas del Cuarto Congreso Internacional sobre Seguridad del Hidrógeno, paper ID 144, 12-14 septiembre 2011, San Francisco, EE.UU.
16. Walker, G (1983). Cryocoolers, Part 1: Fundamentals. Nueva York: Plenum Press.
17. Coward, HF y Jones, GW (1952). Limits of flammability of gases and vapors, Bulletin 503, Bureau of Mines, p. 155.
18. Schroeder, V y Holtappels, K (2005). Características de explosión de las mezclas de hidrógeno-aire e hidrógeno-oxígeno a presiones elevadas. 1er Congreso Internacional sobre Seguridad del Hidrógeno, Pisa, Italia.
19. Ono, R, Nifuku, M, Fujiwara, S, Horiguchi, S, Oda, T (2007). Energía mínima de ignición de la mezcla de hidrógeno-aire: Efecto de la humedad y duración de la chispa. *Journal of Electrostatics*, 65. pp. 87-93.
20. Zuetzel, A, Borgschulte, A, Schlapbach, L, Eds. (2008). Hydrogen as a Future Energy Carrier, Wiley-VCH Verlag, Berlin, Alemania, Cap. 4, p. 90-93.
21. Zabetakis, MG y Burgess, DS (1961). Investigación sobre los peligros asociados a la producción y manipulación del hidrógeno líquido. Bureau of Mines Report of Investigation RI 5707, Departamento de Interior, EE.UU.
22. Hord, J (1978). ¿Es el hidrógeno un combustible seguro? *International Journal of Hydrogen Energy*, 3, p. 157.
23. Tieszen, SR, Sherman, MP, Benedick, WB, Shepherd, JE, Knystautas, R y Lee, JHS (1986). Mediciones del tamaño de la célula de detonación en mezclas de hidrógeno-aire-vapor. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 106, pp. 205-219.
24. Van Dolah, RW, et al. (1963). Revisión de los peligros de fuego y explosión de los combustibles en los vehículos aéreos. BM-IC-8137, Bureau of Mines, Pittsburgh, PA.
25. Wionsky, SG (1972). Predicción de las clasificaciones de materiales inflamables. *Chemical Engineering*, 79 (26). pp. 81-86.
26. Kanury, AM (1975). Introducción a los fenómenos de combustión: (para aplicaciones de fuego, incineración, contaminación y energía). Nueva York; Londres: Gordon y Breach.

## Tema 2: Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad

27. Butler, MS, Moran, CW, Sunderland, PB y Axelbaum, RL (2009). Límites de fugas de hidrógeno que pueden soportar llamas estables. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, pp. 5174-5182.
28. SAE J2579 (2009). Technical information report for fuel systems in fuel cell and other hydrogen vehicles, SAE International, Detroit, Michigan, EE.UU., enero de 2009.
29. Lecoustre, VR, Sunderland, PB, Chao, BH y Axelbaum, RL (2010). Llamas de hidrógeno extremadamente débiles, *Combustión y Llama*. Vol. 157, pp. 2209-2210.
30. Cheng, TS, Chao, Y-C, Wu, C-Y, Li, Y-H, Nakamura, Y, Lee, K-Y et al. (2005). Investigación experimental y numérica de llamas de difusión de hidrógeno a microescala. *Actas del Combustion Institute*, 30, pp. 2489-2497.
31. Sunderland, PB (2010). Peligros de las microllamas de hidrógeno, Actas del 8º curso corto internacional y taller de investigación avanzada en la serie "Progress in Hydrogen Safety", Primeras aplicaciones de mercado del hidrógeno y las pilas de combustible, 11 - 15 octubre 2010, Universidad de Ulster, Belfast.
32. Kalghatgi, GT (1981). Estabilidad de soplado de llamas de difusión de chorro gaseoso. Parte I: en aire quieto. *Combustion Science and Technology*, 26(5), pp. 233-239.
33. Matta, LM, Neumeier, Y, Lemon, B y Zinn, BT (2002). Características de las llamas de difusión a microescala. *Actas del Combustion Institute*, vol. 29, pp. 933-938.
34. Cheng, TS, Chen, CP, Chen, CS, Li, YH, Wu, CY y Chao, YC (2006). Características de las llamas de difusión de microchorro de metano. *Combustion Theory and Modelling*, 10, pp. 861-881.
35. Lee, ID, Smith, OI y Karagozian, AR (2003) Hydrogen and helium leak rates from micromachined orifices. *AIAA Journal*, vol. 41, pp. 457-463.
36. Swain, MR y Swain, MN (1992). Comparación de las fugas de combustible de H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> en entornos residenciales. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 17, pp. 807-815.
37. Dryer, FL, Chaos, M, Zhao, Z, Stein, JN, Alpert JY y Homer, CJ (2007). Ignición espontánea de fugas presurizadas de hidrógeno y gas natural en el aire. *Combustion Science and Technology*. Vol. 179, pp. 663-694.
38. Creitz, EC (1961). Inhibition of diffusion flames by methyl bromide and trifluoromethyl-bromide applied to the fuel and oxygen sides of the reaction zone. *Journal of Research for Applied Physics and Chemistry*. Vol. 65A, pp. 389-396.