



Programa Europeo de Formación de Formadores para Equipos de Respuesta

Tema 9

Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

NIVEL I

Bombero

La información aportada en esta clase 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



Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

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.



Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

Resumen

Este tema está enfocado en los escapes de hidrógeno inflamados. Al principio se presentan ciertos términos útiles. Luego se proporciona una clasificación de distintos tipos de hidrógeno

Palabras clave

Incendio de hidrógeno, longitud de llama

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

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. Terminología básica	6
4. Tipos de incendios y llamas de hidrógeno	9
5. Flujos de calor por radiación de los fuegos de chorro y de las bolas de fuego	9
5.1 Flujos de calor por radiación de los fuegos de chorro	9
5.2 Incendios por chorro de hidrógeno frente a incendios por chorro de combustibles comunes	10
6. Incendio de vehículos FC	12
Agradecimientos	13
Referencias	13

1. Público destinatario

La información aportada en este tema está dirigida al NIVEL 1: Bombero. También hay temas 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.

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.

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.

Conocimientos previos: Bombero

EQF 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

Con frecuencia se alude al término "seguridad" como una barrera "no técnica" para las tecnologías FCH emergentes. Sin embargo, hay varios retos de ingeniería que deben abordarse antes de lanzar estas tecnologías al mercado. Uno de ellos es la reducción de la longitud de la llama del chorro de hidrógeno desde el valor actual de 10-15 m desde el depósito a bordo del vehículo FC para permitir la evacuación y el rescate de los pasajeros y su salvaguarda por parte de los intervinientes. Otro problema importante sin resolver es el de aumentar el índice de resistencia al fuego de los depósitos de almacenamiento de hidrógeno a bordo de 1 a 7 minutos (valor actual de los depósitos de tipo IV) a fin de permitir un mayor tiempo de purga de los depósitos. Así se evitarían graves daños en las estructuras civiles, tales como garajes, en caso de fuga accidental de hidrógeno. Además, excluiría incluso la posibilidad de que se formen grandes nubes de hidrógeno-aire en el interior de los túneles, que pueden provocar víctimas mortales a lo largo del túnel en caso de incendio. El mayor grado de resistencia al fuego de los depósitos de hidrógeno permitiría la evacuación segura de los civiles del lugar del accidente, y garantizaría la vida de los pasajeros y los intervinientes [1].

Sin duda, los intervinientes tendrán que enfrentarse a incidentes o accidentes con llamas de hidrógeno porque el fuego de hidrógeno es un escenario típico de muchos accidentes. El conocimiento de la posible longitud de las llamas de hidrógeno y de las distancias de separación correspondientes es de vital importancia para el personal de primera respuesta. También habrá una radiación térmica causada por el incendio, que puede causar daños a las personas y a las estructuras, edificios, equipos, etc. en las distancias más allá de la longitud de la llama. En este tema se tratarán varios factores que afectan al alcance de un incendio de chorro y al flujo de calor radiativo asociado, incluyendo la presión de depósito de hidrógeno y el tamaño de la fuga. Los métodos de detección de incendios de hidrógeno, las técnicas de mitigación y extinción de incendios de hidrógeno también se consideran en este tema.

Al final de este tema, los intervinientes podrán:

- Distinguir entre los diferentes tipos de incendios de hidrógeno: desde microllamas hasta fuegos de chorro y bolas de fuego,
- Evaluar las longitudes de llama de hidrógeno con la ayuda de nomogramas y correlaciones dimensionales y adimensionales,
- Evaluar la ubicación media de la punta de la llama de chorro,
- Predecir las distancias de separación para proteger a las personas y las estructuras,

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

- Explicar el efecto de los diferentes factores sobre la longitud de la llama del chorro de fuego: tamaño y forma de la boquilla, fijación del chorro, flotabilidad, barreras o paredes,
- Comparar las longitudes de llama y los flujos de calor de los incendios por chorro de hidrógeno y otros combustibles comunes (CNG y LPG),
- Explicar los efectos de la presión en los incendios por chorro de hidrógeno,
- Identificar los principales métodos de detección de incendios de hidrógeno,
- Reconocer las técnicas de mitigación de los incendios de hidrógeno,
- Aplicar las prácticas de extinción de incendios de hidrógeno,
- Apreciar los principales retos de seguridad relacionados con el estado actual de las tecnologías de FCH.

3. Terminología básica

Para comprender plenamente los incendios de hidrógeno y otros fenómenos relacionados (tales como microllamas, enfriamiento, lift-off, blow-off y blow-out, radiación térmica, visibilidad de la llama, longitud y velocidad de la llama, incendios por chorro de impacto, etc.) será útil aprender algunas definiciones que se enumeran a continuación. Por favor, preste atención a las cifras adimensionales, que se utilizarán con frecuencia en este y otros temas.

Purga es un proceso por el cual la presión de almacenamiento desciende con el tiempo durante una fuga [1].

Llama soplada (blow-off) es la extinción de la llama a alta velocidad sin llama levitada [2].

Autoextinción (blow-out) es la extinción de la llama a alta velocidad con llama levitada [2].

Límite de blow-out es un límite de velocidad del flujo de combustible más allá del cual se extingue una llama levitada [2].

Deflagración es el proceso posterior al encendido débil en una mezcla combustible, que se propaga a velocidad subsónica en la mezcla fresca y no quemada [3].

Detonación es el proceso por el cual la onda de combustión se propaga a velocidad supersónica en el medio no reactivo [3].

Drop-back es la reinyección en la boquilla de una llama levitada por una disminución de la velocidad de elevación [2].

Diámetro efectivo es el diámetro del chorro en el lugar donde se produce la expansión hasta 1 bar, en un chorro subexpandido [4].

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

Chorro expandido es el chorro con una presión en la salida de la boquilla igual a la presión atmosférica [1].

Índice de resistencia al fuego es una medida del tiempo durante el cual un sistema de protección pasiva contra el fuego puede resistir una prueba estándar de resistencia al fuego [1].

Separación de llama (lift-off) es la condición en la que la llama y el quemador se separan.

Velocidad de llama es la velocidad de la llama con respecto a un observador fijo [3].

Punto de inflamación es la temperatura más baja a la que el combustible produce suficientes vapores para formar una mezcla inflamable con el aire en su superficie [1].

Número de Froude (Fr) es el número adimensional que equivale a la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de gravedad [1].

Distancia peligrosa es una distancia desde (la fuente de) peligro hasta un valor de efecto físico determinado (mediante modelización física o numérica, o por reglamentación) (normalmente, térmico o de presión) que puede provocar una situación de daño (rango de “sin daños” a “máximo daño”) para las personas, los equipos o el entorno.

Velocidad de combustión laminar es la velocidad de propagación de la llama en relación con la velocidad del gas no quemado que se encuentra delante de ella, en las condiciones establecidas de composición, temperatura y presión del gas no quemado [1].

Altura de lift-off es la altura desde la salida de la boquilla hasta la base de una llama **levitada** [2].

Velocidad de lift-off es la velocidad del flujo de combustible que produce una separación de la llama respecto a la boquilla [2].

Número de Mach (M) es el número adimensional igual a la relación entre la velocidad de flujo local y la velocidad local del sonido [1].

Presión operativa máxima admisible (MAWP) es la presión máxima a la que puede someterse cualquier componente o parte del sistema de presión en todo el rango de temperaturas de diseño [5].

Las condiciones de *temperatura y presión normales* (NTP) son temperatura de 20° C y presión de 1 bar [1].

Llama no premezclada (a menudo denominada *llama de difusión*) es la llama en la que el agente oxidante o comburente y el combustible no se mezclan antes de alcanzar un frente de

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

llama. Durante la combustión, el comburente se combina con el combustible por difusión. La velocidad de la llama está limitada por la velocidad de difusión.

Sobrepresión es la presión en una onda expansiva por encima de la presión atmosférica, o la presión dentro de una estructura de contención que supera la presión operativa máxima admisible de la estructura de contención [5].

Llama premezclada es la llama en la que el comburente se ha mezclado con el combustible antes de alcanzar el frente de la llama. La combustión de combustible y comburente premezclados forma un frente de llama delgado debido a que los reactivos están fácilmente disponibles.

Abertura de enfriamiento es el espacio de chispa entre dos electrodos planos paralelos en el que se suprime la ignición de las mezclas de combustible y aire. La abertura de enfriamiento es la dimensión de la abertura de paso necesaria para evitar la propagación de una llama abierta por una mezcla de combustible y aire inflamable que llena el paso [1].

Número de Reynolds (Re) es el número adimensional que da una medida de la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas [1].

Distancia de peligro (o de separación) es una distancia mínima que separa "objetivos específicos (por ejemplo, personas, estructuras o equipos) de las consecuencias de posibles accidentes relacionados con el funcionamiento de una instalación de hidrógeno" [6].

Chorro subexpandido es el chorro con una presión en la salida de la boquilla superior a la presión atmosférica [1].

Longitud de llama visible es la distancia de la línea central desde la punta de la boquilla hasta el extremo de la llama [2]. Las imágenes digitales visibles, infrarrojas (IR) y ultravioletas (UV) se utilizan a menudo para medir la longitud de llama cuando las longitudes de llama medidas varían entre las distintas imágenes [8].

4. Tipos de incendios y llamas de hidrógeno

El hidrógeno puede arder en diferentes modos de combustión, entre los que se incluyen el fuego instantáneo, el fuego de chorro, la deflagración, la detonación, etc. Los incendios de hidrógeno pueden abarcar desde **microflamas** con un flujo de masa de 10^{-9} kg/seg hasta llamas de alto flujo de masa (cientos de kg/seg). Los escapes de hidrógeno pueden arder como llamas laminares de difusión o turbulentas no premezcladas, dependiendo del número de Reynolds (Re) en la salida de la fuga. Las llamas pueden ser controladas por la flotabilidad y dominadas por el momento. La mayoría de las fugas peligrosas de hidrógeno se producirán en un régimen dominado por el momento. Dependiendo de las condiciones de salida de la

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

fuga, los fuegos de chorro pueden ser subsónicos (número de Mach $M < 1$), sónicos y supersónicos muy subexpandidos. En los escenarios en los que es posible un fallo del depósito de almacenamiento con la liberación inmediata de hidrógeno en la atmósfera circundante, pueden formarse bolas de fuego de gran tamaño (decenas de metros). La presencia de obstáculos, superficies y recintos afecta de forma significativa a la llama del chorro. Un caso especial son los incendios de hidrógeno licuado (LH_2). Actualmente disponemos de escasos conocimientos sobre los incendios de LH_2 . Hay una laguna de conocimiento con una indicación de que la condensación y solidificación del oxígeno (de la atmósfera) en caso de fuga/derrame de LH_2 puede dar lugar a mezclas explosivas en ciertas condiciones.

5. Flujos de calor por radiación de los fuegos de chorro y de las bolas de fuego

5.1 Flujos de calor por radiación de los fuegos de chorro

El hidrógeno en una atmósfera limpia arde con una llama invisible. Tiene una temperatura de llama adiabática premezclada algo más alta que para una mezcla estequiométrica en el aire, de 2130 °C, en comparación con otros combustibles. Esta temperatura puede provocar lesiones graves en el lugar del accidente, especialmente en un entorno limpio de laboratorio donde la llama del hidrógeno es prácticamente invisible. Sin embargo, la combustión del hidrógeno y las corrientes calientes provocan cambios en el entorno que pueden servir para detectar la llama. Aunque la llama de hidrógeno no es luminosa y dificulta la detección visual, hay un fuerte efecto del calor con turbulencia en la atmósfera circundante y una pluma ascendente de productos de combustión calientes. Estos cambios reciben el nombre de *firma de fuego*.

El siguiente apartado se basa en el trabajo realizado en el centro HySAFER del Ulster [7]. Antes de hablar del flujo de calor por radiación, conviene señalar que una llama de hidrógeno emite una radiación infrarroja mínima y casi ninguna radiación visible. Debido a la ausencia de bandas de radiación de CO_2 y a la fuerte absorción por parte del vapor de agua ambiental, la relación entre las llamas de chorro de hidrógeno visibles e infrarrojas es de 0,88 y la relación entre la longitud de la llama ultravioleta e infrarroja es de 0,78 [9]. No obstante, los flujos de calor por convección y radiación siguen siendo importantes y deben evaluarse para proteger la vida humana, las propiedades y el medio ambiente.

El efecto del flujo de calor por radiación sobre las personas, el medio ambiente y las estructuras se discute en detalle en el tema 6 - Criterios de daños personales y materiales.

5.2 Incendios por chorro de hidrógeno frente a incendios por chorro de combustibles comunes

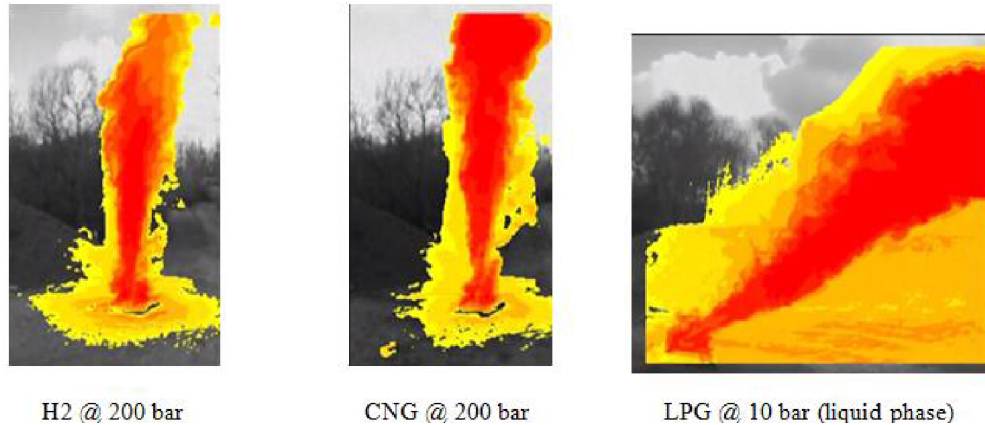
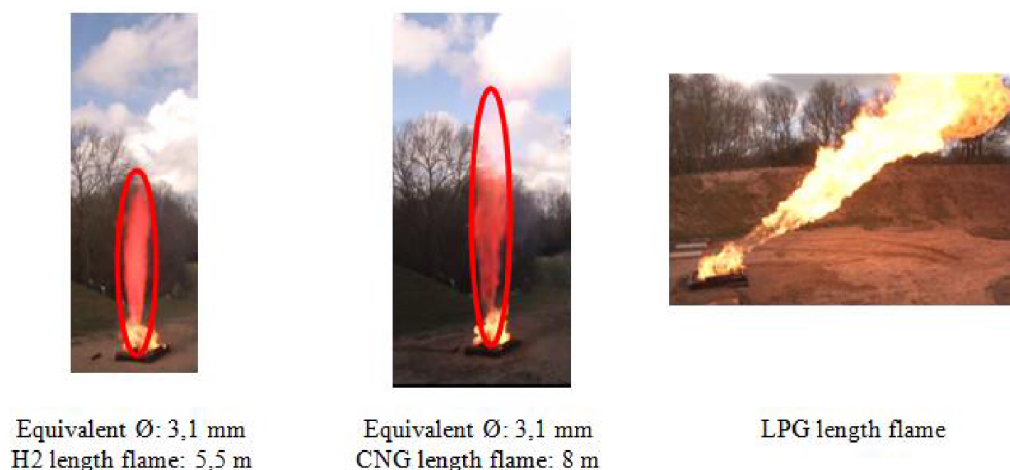


Figura 1. Imagen infrarroja de fuegos de chorro que muestra la radiación térmica producida por la combustión de hidrógeno (200 bar), GNC (200 bar) y GLP (10 bar).

Como se deduce de la Figura 1, debido a la combustión incompleta, el GNC y el GLP producen CO₂, CO, hollín y otros productos, que tienen un mayor efecto sobre la radiación en comparación con el hidrógeno. Este fenómeno explica por qué la combustión del hidrógeno se caracteriza por unos efectos térmicos menores que los de otros combustibles comunes, aunque la temperatura supere la de una llama de GNC. La Figura 1 incluye una comparación de la radiación térmica producida por el hidrógeno (200 bar), el GNC (200 bar) y el GLP (10 bar): la firma térmica del fuego de chorro de hidrógeno es algo menor que la del GNC, y ambas son mucho menores que la radiación térmica del fuego de GLP.



¹ Liquid phase: fase líquida.

² Equivalent: equivalente. Length flame: longitud de la llama. LPG: GLP.

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

Figura 2. Comparación de longitudes de llama de fuegos de chorro de hidrógeno (diámetro de orificio 3,1 mm), GNC (diámetro de orificio 3,1 mm) y GLP.

Las longitudes de llama calculadas en función del diámetro del TPRD en algunos casos típicos se muestran en la Tabla 1. Para obtener los resultados se han utilizado herramientas de e- Laboratorio y la correlación de la longitud de llama y tres distancias de peligro para fuegos de chorro. (<https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>).

Tabla 1 Longitud de llama calculada frente al diámetro del TPRD en casos típicos

Presión de almacenamiento (bares)	Diámetro de orificio (mm)	Temperatura del depósito (°C)	Longitud de llama (m)
350	1,0	20	2,6
700	1,0	20	3,3
350	1,0	50	2,5
700	1,0	50	3,2
350	3,0	20	7,8
700	3,0	20	9,9
350	3,0	50	7,5
700	3,0	50	9,6
350	1,0	100	3,1
700	3,0	100	9,2

6. Incendio de vehículos PC

Los vehículos de pila de combustible (FCV) son una de las principales aplicaciones en el rápido desarrollo de las tecnologías FCH. Al igual que un coche de batería eléctrica, un coche de pila de combustible carece de motor de combustión interna. Las pilas de combustible convierten la energía almacenada en forma química directamente en energía eléctrica que alimenta los coches. En todo el mundo se han establecido varios miles de FCV y se están utilizando pequeñas flotas de coches de pila de combustible, en especial por parte de empresas y organismos gubernamentales, pero también particulares. Entre ellos se encuentran los modelos de serie de Hyundai (pila de combustible iX35 y NEXO) y los modelos Toyota Mirai I y II. ¡En Alemania hay más de un millar de coches en funcionamiento con un

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

centenar de estaciones de servicio! Además, algunos coches de bomberos ya funcionan con pila de combustible.

Como ejemplo, según las estadísticas de incendios en Gran Bretaña [10], en el Reino Unido se registraron 28.800 incendios de vehículos de carretera en 2011-2012. A modo de comparación, en Estados Unidos se produjeron 172.500 incendios de automóviles en el mismo periodo. Se vieron afectados diferentes tipos de vehículos: automóviles, vehículos pesados, vehículos ligeros, vehículos de transporte público, etc. La mayoría (65%) de los incendios se produjeron en coches, el 10% en furgonetas, el 4% en camiones y el 2% en autobuses o minibuses [10]. Las causas de los incendios pueden ser accidentales, deliberadas o desconocidas. La mayoría de los incendios deliberados (43%) afectaron a vehículos rodados: 13.900 incendios. El número de víctimas mortales en incendios de vehículos de motor en 2011-12 fue de 37 [10].

Durante el período comprendido entre 2000 y 2006, se documentaron 20 fallos catastróficos de depósitos de GNC, 11 de los cuales se han atribuido a incendios de vehículos [11]. De estos 11 incidentes, las pruebas sugieren que la mayoría de los PRD no se activaron (en caso de incendio localizado). "Las pruebas demuestran que todos los depósitos de combustible (tanto de GNC como de hidrógeno), al margen de la presión operativa, son muy susceptibles de sufrir una rápida degradación debido a incendios localizados" [11]. Esto implica que no se puede descartar un fallo catastrófico en la evaluación de riesgos [10].



Figura 3. Incendio de chorro de hidrógeno e incendio de gasolina: 3 seg (izquierda) y 60 seg (derecha) después del inicio del incendio de un coche [13].

Los peligros y los riesgos asociados a los FCV se deben probar e interpretar de forma profesional, con plena comprensión de las consecuencias por parte de todos los interesados, desde los diseñadores de sistemas de FC hasta los usuarios, pasando por los reguladores. La primera comparación de la "gravedad" de las fugas y las igniciones de combustible de hidrógeno y gasolina fue realizada por Swain [13]. La Figura 3 muestra las instantáneas de

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios fuego de chorro de hidrógeno y de fuego de gasolina a los 3 seg (izquierda) y a los 60 seg (derecha) después de comenzar el incendio de un coche. Cabe señalar que estas primeras imágenes NO reflejan el diseño más reciente de los TPRD angulados y de menor diámetro.

Además, también cabe tener en cuenta los niveles sonoros asociados a las fugas de hidrógeno y a la explosión.

Agradecimientos

Reconocemos la aportación del proyecto HyResponse, ya que los materiales aquí presentados se basan en las clases originales de HyResponse.

Referencias

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Parte I y Parte II. Disponible en: www.bookboon.com, libro electrónico de descarga gratuita.
2. Cheng, TS, Chiou, CR (1998). Experimental investigation of the characteristics of turbulent hydrogen jet flames. Combustion Science and Technology. Vol. 136, p. 81-84.
3. Dorofeev, SB (2009). Evaluation of hydrogen explosion hazards: phenomenology and potential flame acceleration and DDT. 4ª Escuela Europea de Verano sobre Seguridad del Hidrógeno.
4. Birch, AD, Brown, MG, Dodson, MG, Swaffield, F (1984). The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas. Combustion Science and Technology. Vol. 36, p. 249-261.
5. NFPA → 52. Código de sistemas de combustible de gas natural para vehículos, edición de 2019.
6. LaChance, J, Tchouvelev, A and Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36 p. 2381-2388.
7. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. Tesis doctoral. Universidad de Ulster.
8. Schefer, RW, Houf, WG, Bourne, B y Colton, J (2006). Spatial and radiative properties of an open-flame hydrogen plume. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 31, pp. 1332-1340.

Clase 9: Distancias peligrosas respecto a llamas de hidrógeno y extinción de incendios

9. Houf, WG y Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32, pp. 136-151.
10. Case for safety. Relative frequency of failure modes. Disponible en: http://h2safe.net/case_safety.html [consultado el 25/11/2020].
11. Estadísticas sobre incendios, Gran Bretaña, 2011-2012. Departamento de Comunidades y Gobierno Local.
12. Gambone, LR y Wong, JY (2007). Fire protection strategy for compressed hydrogen-powered vehicles. 2ª Conferencia Internacional sobre Seguridad del Hidrógeno, San Sebastián, España, 11-13 de septiembre de 2007.
13. Swain, MR (2001). Simulación de fugas de combustible. Actas de la Revisión del Programa sobre Hidrógeno DOE 2001. Disponible en: <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf> [consultado el 25/11/2020].