



Programa Europeo de Formación de Formadores para Equipos de Respuesta

Tema 8

Fuentes de ignición y prevención de la ignición

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



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

El hidrógeno se inflama fácilmente porque tiene la Energía Mínima de Ignición (MIE) más baja entre los combustibles conocidos. A menudo es difícil establecer el origen exacto de la ignición del hidrógeno y determinar su mecanismo específico. Este tema ofrece una visión general de los incidentes y mecanismos de ignición del hidrógeno.

Palabras clave

Energía Mínima de Ignición (MIE), temperatura de autoignición, fuentes de ignición, mecanismos de ignición

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	6
3. Fuentes de ignición	7
3.1 Ignición de descargas electrostáticas	8
3.2 Ignición mecánica	8
3.3 Ignición por una superficie caliente	9
4. Mecanismos de ignición del hidrógeno	10
4.1 Energía Mínima de Ignición (MIE)	11
4.2 Temperatura de autoignición	13
4.3 Ignición por difusión	14
5. Ignición espontánea de un escape súbito	15
5.1 Mecanismo de ignición por difusión	15
6. Prevención de la ignición del hidrógeno	16
6.1 Control de las fuentes de ignición térmicas y mecánicas	17
Referencias	18

1. Público destinatario

La información aportada en esta clase está dirigida al NIVEL 1: Bombero.

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

Un bombero es responsable y se espera que sea capaz de realizar operaciones de forma segura con equipo de protección individual, incluido el aparato de respiración, y utilizando el equipamiento correspondiente, como por ejemplo vehículos, escaleras, mangueras, extintores, herramientas 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, BA y demás equipos que se espera que utilicen; los primeros intervinientes deben poseer los conocimientos y práctica necesarios. Es preciso que los comportamientos que los mantendrán seguros a ellos y a otros compañeros se describan en los Procedimientos Operativos Estándar (POE). Se requiere la capacidad práctica de evaluar dinámicamente el riesgo para la propia seguridad y la de los demás.

1.3 Aprendizaje previo: Bombero

MEC 2 Conocimientos fácticos 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

Introducción y objetivos

Este tema proporcionará al personal de primera intervención información sobre las posibles fuentes de ignición del hidrógeno y sus mecanismos relacionados, incluido el mecanismo de difusión de la ignición espontánea durante un escape súbito de hidrógeno. Trata las principales características relacionadas con la ignición de la mezcla de hidrógeno y oxígeno: la energía mínima de ignición, su dependencia de la concentración de hidrógeno en la mezcla, la temperatura de autoignición y el efecto de la triboelectricidad. En este tema también se describen los métodos utilizados para prevenir la ignición del hidrógeno mediante la evaluación minuciosa de las posibilidades de ignición y la eliminación de las fuentes de ignición.

Al final de este tema, los intervinientes podrán:

- Reconocer los diferentes tipos de fuentes de ignición;
- Identificar los mecanismos de ignición del hidrógeno según la fuente de ignición;
- Comparar los valores de la Energía Mínima de Ignición (MIE) y la temperatura de autoignición del hidrógeno con los de otros combustibles comunes;
- Explicar la energía mínima de ignición en función del contenido de hidrógeno en la mezcla;
- Evaluar las etapas de la ignición espontánea de un escape súbito de hidrógeno;
- Reconocer los medios para controlar las fuentes de ignición del hidrógeno;
- Indicar las principales medidas de prevención de la ignición del hidrógeno.

Fuentes de ignición

Es difícil definir la fuente exacta de ignición del hidrógeno a causa de la baja energía mínima de ignición (MIE) del hidrógeno. Por ello a menudo es difícil distinguir qué causa exactamente la ignición del hidrógeno y cuál fue el mecanismo de ignición. A continuación se incluye una lista de posibles fuentes de ignición.

Fuentes eléctricas:

- Chispas eléctricas (por ejemplo, de equipos eléctricos)
- Descargas estáticas (por ejemplo, en filtros de partículas sin conexión a tierra)
- Arco eléctrico (interruptores, motores eléctricos, teléfonos portátiles, buscapersonas y radios).
- Descarga de rayo (por ejemplo, si caen rayos cerca de la chimenea de ventilación)
- Carga eléctrica generada por el funcionamiento de equipos (compresores, generadores, vehículos y otros equipos de construcción)
- Cortocircuitos eléctricos u otros equipos eléctricos
- Partículas electrificadas

Fuentes mecánicas:

- Chispas mecánicas (de válvulas de cierre rápido)
- Impacto y/o fricción mecánica
- Fractura de metal
- Vibración mecánica y flexión repetida

Fuentes térmicas:

- Superficies calientes (por ejemplo, equipos de calefacción)
- Llamas directas
- Chorros calientes
- Escapes (por ejemplo, motores de combustión y chimeneas de escape)
- Cargas explosivas (por ejemplo, cargas utilizadas en la construcción, fuegos artificiales o dispositivos)
- Catalizadores, explosivos y materiales químicos reactivos
- Ondas expansivas y/o fragmentos

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

- Ondas acústicas y expansivas reflejadas o repetidas

Otras fuentes:

- Radiación ionizante (radiactividad)
- Radiación electromagnética
- Radiación ultrasónica
- Luz (láser/fogonazo)
- Compresión adiabática (aumento de presión)

En general, se reconoce que los gases puros no se cargan electrostáticamente en condiciones normales [3], pero esto se aplica por lo general a velocidades y presiones bajas. Cuando los gases se liberan a presiones muy elevadas, el flujo se vuelve sónico y se desconoce la propensión a que se produzca una carga electrostática. Es sabido que los gases puros tienden a no cargarse, pero se sabe que las partículas dentro de la corriente de gas se cargan electrostáticamente [3].

La trayectoria de la descarga en muchos casos prácticos sería probablemente en varios ángulos y direcciones y no en línea recta. Esto implicaría que el hidrógeno se desplazaría siguiendo líneas curvas, lo que permitiría que los materiales a lo largo la superficie de la trayectoria de descarga, por ejemplo, en tuberías, se erosionaran y formarían partículas que se cargarían electrostáticamente [3].

1.4 Encendido de descargas electrostáticas

Hay tres tipos principales de descarga electrostática: chispa, cepillo y corona [1]. Una *descarga de chispa* es un canal de plasma único entre un conductor de alto potencial y un conductor conectado a tierra. Una *descarga de cepillo* es una descarga entre un aislante cargado y un punto conductor conectado a tierra. Una *descarga de corona* es una descarga silenciosa, normalmente continua, con corriente pero sin canal de plasma.

Los estudios realizados en el pasado sobre las aperturas de hidrógeno mostraron que la ignición era rara durante climatologías benignas, pero era más frecuente durante las tormentas eléctricas, aguanieve, nevadas y en las noches de heladas [1].

1.5 Ignición mecánica

Las propiedades de las partículas metálicas incandescentes o chispas que son relevantes por su capacidad de provocar la ignición de una mezcla inflamable incluyen:

- Tamaño
- Material
- Velocidad
- Temperatura

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

- Número
- Velocidad y tiempo de combustión

Existen umbrales de presión de contacto entre metales y de velocidad relativa para la producción de chispas durante el impacto, el frotamiento o el amolado. Por encima del umbral se pierden partículas metálicas del más débil de los dos materiales. En general, las partículas solo se producen cuando la velocidad relativa entre las dos superficies supera 1 m/seg [4].

1.6 Ignición por una superficie caliente

Este fenómeno, común para las mezclas de gas/vapor de aire más inflamables, consiste en que el espacio circundante proporciona una temperatura lo bastante alta, el calor de la combustión no puede liberarse a las superficies circundantes, y eso permite que la reacción de oxidación en cadena progrese [3].

Mecanismos de ignición del hidrógeno

En 2007, Astbury y Hawksworth publicaron un artículo en el que analizaban las estadísticas de los incidentes de ignición de hidrógeno y los mecanismos asociados [1]. Los autores descubrieron que hay informes sobre fugas de hidrógeno a alta presión que se han incendiado sin razones lógicas, y se han sugerido varios mecanismos de ignición. Se indicó que, aunque muchas fugas se han inflamado, también se han notificado fugas en las que no se ha producido ninguna ignición. Cuando se produjeron igniciones sin fuentes de ignición obvias, los mecanismos sugeridos son más bien especulativos y carecen de una base científica rigurosa. Este trabajo ha identificado las lagunas de conocimiento sobre el mecanismo exacto de ignición de una fuga de hidrógeno. Los mecanismos que han sido considerados por Astbury y Hawksworth [1] incluyen la generación de carga electrostática, la ignición mecánica, el efecto Joule-Thompson inverso, la ignición por difusión, la compresión adiabática repentina y la ignición en superficies calientes. Estos mecanismos se analizarán a continuación en este tema.

Al analizar la base de datos de Incidentes de riesgos mayores del Servicio de Salud y Seguridad¹ (Reino Unido), Astbury y Hawksworth [1] revelaron 81 incidentes relacionados con emisiones de hidrógeno. De ellos, tan solo se informó de un retraso entre el escape y la ignición en 4 casos. Los autores asumieron que en los demás casos el hidrógeno se encendió inmediatamente. En 11 casos se identificó la fuente de ignición, pero en el resto, esto es, en el 86,3% de los incidentes, la fuente de ignición no quedó clara. En cuanto a los escapes sin presencia de hidrógeno, el 1,5% no se encendieron, y el 65,5% de las fuentes de ignición no se identificaron. Esto demuestra la sugerencia de que hay una diferencia en la propensión a la ignición entre los gases de hidrógeno y los de no hidrógeno cuando se liberan. Los siguientes incidentes/accidentes han sido revisados por Astbury y Hawksworth [1] entre otros. A partir de los trabajos realizados por Nusselt en Alemania, se informó de varias igniciones espontáneas de hidrógeno a 210 bar descargado a la atmósfera. Se había observado que los cilindros de almacenamiento tenían cantidades de óxido de hierro (es decir, óxido) en ellos aunque estuvieran aparentemente secos, y en un principio se pensó que existía la posibilidad de que se produjera una carga electrostática. Sin embargo, los experimentos de descarga de hidrógeno en un embudo abierto provisto de un tubo largo no mostraron ninguna ignición, excepto cuando el embudo estaba cubierto por una tapa de hierro. No se comprendió el mecanismo, por lo que se realizaron más ensayos. Se observó una descarga de corona únicamente cuando las pruebas se realizaron en la oscuridad. La descarga de corona aumentaba cuando el hidrógeno se filtraba por una brida y se golpeaba la tubería para

¹ En esta base de datos no se registraron las emisiones de hidrógeno que simplemente se dispersaron y no implicaron fuego, explosión u otro peligro importante. Por lo tanto, el hecho de que la ignición se registre como cero no indica necesariamente que todos los escapes de hidrógeno se hayan encendido.

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

levantar el polvo. Tras el golpeo se produjo una ignición. Otros trabajos demostraron que cuando se utilizaban alambres de cobre afilados para propiciar las descargas de corona, la ignición se producía cuando la punta se doblaba en dirección contraria a la del gas, y no se producía ninguna ignición cuando el alambre apuntaba en la dirección del flujo [1].

Otro incidente comunicado por Astbury y Hawksworth [1] se refiere a una botella de hidrógeno conectada a un aparato de laboratorio. Un técnico de laboratorio forzó (rompió la válvula) para limpiar la suciedad de la conexión, y cuando lo hizo, el gas que escapaba se encendió de inmediato. Bond [5] atribuyó esta ignición al fenómeno de la *ignición por difusión* en 1991. Aunque no se cita la presión del gas en este incidente, cabe suponer que habría sido la típica del cilindro lleno de 230 bar. Reider et al. [16] probaron el escape de una gran cantidad de hidrógeno para determinar los niveles de presión sonora. Se liberó hidrógeno gaseoso a una presión inicial de 2360 bar y una tasa inicial de 54,4 kg/seg, durante 10 seg. El gas se transfirió por una tubería de 200 mm de diámetro nominal y una válvula de bola de 150 mm de diámetro a un recipiente cilíndrico dotado de boquilla convergente-divergente que ventilaba a la atmósfera. En la prueba en la que el gas no se encendió deliberadamente, después de 10 seg se cerró la válvula de 150 mm de diámetro, y 3 seg después de empezar a cerrar la válvula se produjo la ignición. Los tres posibles mecanismos de ignición examinados fueron: la electrificación del gas, la electrificación de las partículas en el gas y la abrasión de las partículas metálicas por una barra metálica soldada en la boca de la boquilla. Se descartó el primero porque se sabe que los gases puros tienen una carga electrostática insignificante. Se consideró el segundo mecanismo, pero el sistema se había limpiado y soplado a fondo antes de la prueba. Aun así, la velocidad del gas descargado, de 1216 m/seg, fue mucho mayor durante la prueba que la utilizada antes, por lo que no se pudo descartar este posible mecanismo. El tercer mecanismo se consideró como una posibilidad, ya que la velocidad de descarga era elevada, por lo que era posible que las partículas se desprendieran e impactaran contra la barra. También hay que contar con este mecanismo. Con todo, tras la ignición se descubrió que la barra se había desprendido en un extremo, y eso pudo suponer una posible fuente de ignición, que no se había previsto. Además, la ignición espontánea "inesperada" del escape de hidrógeno en experimentos a gran escala fue explicada también por Chaineaux et al. (1991) [6], Groethe et al. (2005) [7].

1.7 Energía Mínima de Ignición (MIE)

La Energía Mínima de Ignición (MIE) 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 en reposo (en calma/quieta) en la composición más inflamable. Una chispa débil causada por la descarga de electricidad estática de un cuerpo humano puede ser suficiente para encender cualquiera de los combustibles [3]. Para una determinada composición de

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

mezcla deben variarse los siguientes parámetros del circuito de descarga para obtener las condiciones óptimas: capacitancia, inductividad, tensión de carga, forma y dimensiones de los electrodos, así como distancia entre ellos [4]. Además de la composición de la mezcla, la MIE depende de otros factores como la presión y la temperatura iniciales. Dado que la mayoría de las fuentes de ignición generan más de 10 mJ, casi todos los combustibles comunes se encenderían en la mezcla con aire si su concentración supera el límite inferior de inflamabilidad (LII). Las fuentes de ignición capaces de formar choques, por ejemplo las descargas de chispas de alta energía y los explosivos de gran potencia, pueden iniciar la detonación directamente.

Como se indica en la [Figura 1](#), comparado con otros combustibles, el hidrógeno tiene la MIE más baja, 0,017 mJ para mezclas de hidrógeno-aire y 0,0012 mJ para mezcla de hidrógeno-oxígeno, respectivamente. (consulte el tema sobre "Propiedades del hidrógeno relevantes para la seguridad"). Como se ha mencionado anteriormente, la MIE es una función de la concentración de hidrógeno en la mezcla inflamable (ya sea con aire o con cualquier otro comburente). Para una mezcla combustible dada y un tipo de ignición, existe una energía mínima dependiente de la concentración por debajo de la cual no se produce la ignición. La MIE se vuelve infinita en los límites de inflamabilidad ([Figura 2](#)). En el rango de inflamabilidad de las mezclas de hidrógeno-aire, la energía de ignición varía en casi tres órdenes de magnitud.

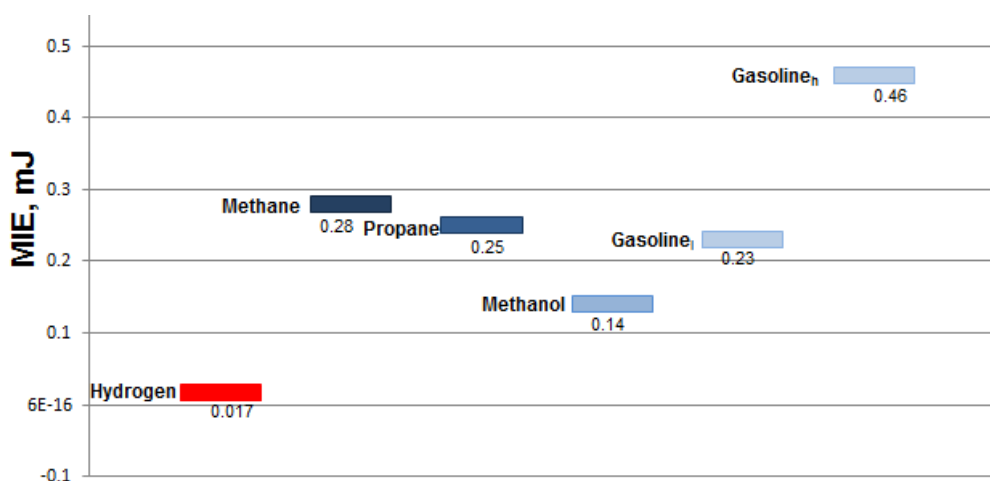


Figura 1. Valores de la MIE para hidrógeno y otros combustibles.

Como se muestra en la [Figura 2](#), una fuente con una energía de ignición de 0,24 mJ no encenderá el metano o el propano, pero sí encenderá una mezcla de hidrógeno y aire dentro del rango de concentración de 6,5 a 58 vol. % de hidrógeno. Una fuente con una energía de 1 mJ encenderá una mezcla de hidrógeno y aire con un contenido de hidrógeno que oscile entre

² MIE: MIE. Hydrogen: hidrógeno. Methane: metano. Propane: propano. Methanol: metanol. Gasoline: gasolina.

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

6 y 64 vol. %. Cabe señalar que en los límites de inflamabilidad la energía de ignición es algo similar para los tres combustibles. Su valor es relativamente alto en comparación con la MIE, y muchas fuentes de ignición podrían proporcionar este nivel de energía. Se necesita menos energía para encender una mezcla que está más cerca de su composición estequiométrica.

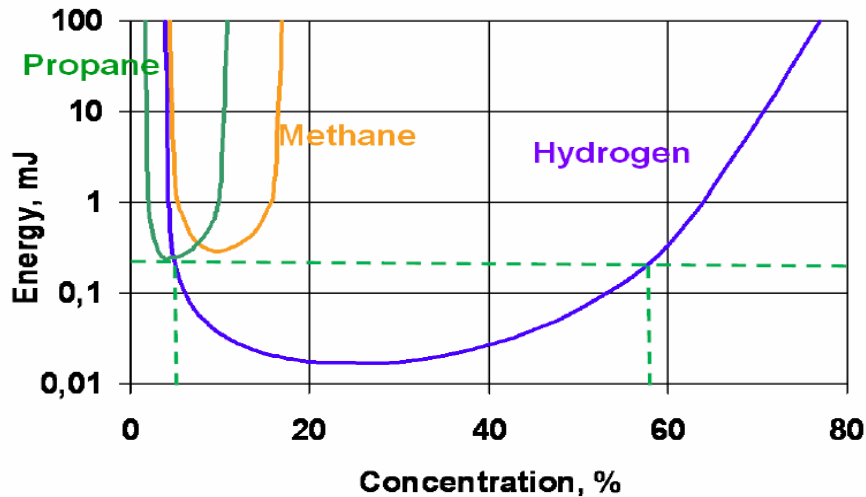


Figura 2. La dependencia de la energía de ignición de la concentración de un combustible (hidrógeno, propano o metano) en el aire [8].

La energía almacenada como electricidad estática en un objeto varía en función de su tamaño y su capacitancia, de la tensión a la que se carga y de la constante dieléctrica del medio circundante [3]. Para modelar el efecto de la descarga estática, se considera a una persona como un condensador de 100 picofaradios (pF), cargado a una tensión de 4.000 a 35.000 voltios. La energía total es del orden de los milijulios (mJ). Los objetos más grandes almacenarán más energía. Esta energía suele descargarse en menos de un microsegundo y es suficiente para encender no solo las mezclas casi estequiométricas, sino también las mezclas cercanas a los límites de inflamabilidad. Algunos materiales aislantes, como la madera, el papel y algunos tejidos, suelen formar una capa conductora que puede evitar la acumulación de estática al absorber el agua del aire en entornos donde la humedad relativa es superior al 50% [9].

1.8 Temperatura de autoignición

La temperatura de autoignición es la temperatura mínima necesaria para iniciar una reacción de combustión de una mezcla de combustible y oxígeno en ausencia de cualquier fuente externa de ignición [3]. La temperatura estándar de autoignición del hidrógeno en el aire es superior a 510 °C [10]. Es relativamente alta en comparación con los hidrocarburos de moléculas largas. Sin embargo, esta temperatura de autoignición puede reducirse mediante superficies catalíticas como el platino. Los objetos a temperaturas que van de 500 a 580 °C

³ Energy: energía. Concentration: concentración. Propane: propano. Methane: metano. Hydrogen: hidrógeno.

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

pueden encender mezclas de hidrógeno-aire o hidrógeno-oxígeno a presión atmosférica. Los objetos sustancialmente más fríos, a unos 320 °C, pueden provocar la ignición del hidrógeno bajo contacto prolongado a una presión inferior a la atmosférica [11]. La temperatura de ignición del chorro de aire caliente es de 670 °C [12].

1.9 Ignición por difusión

El fenómeno de la ignición por difusión ha sido calculado por Wolanski y Wojcicki [13], quienes demostraron que la ignición se producía cuando se admitía hidrógeno a alta presión en un tubo de choque lleno de aire u oxígeno. Comprobaron que la ignición podía producirse aunque la temperatura fuera inferior a la temperatura de autoignición del hidrógeno.

Ignición espontánea de un escape súbito

1.10 Mecanismo de ignición por difusión

En las últimas décadas se han hecho muchos intentos de explicar la ignición espontánea de un escape súbito, empezando por el estudio pionero de Wolanski y Wojcicki [13] sobre el llamado "mecanismo de ignición por difusión", como se comenta en el [Apartado 3.5](#). Los datos experimentales proporcionaron las condiciones críticas de este fenómeno. Por desgracia, no pueden aportar una visión detallada de la dinámica del proceso. Por ejemplo, la ubicación exacta de los puntos de ignición iniciales y la progresión de la reacción química dentro de la tubería aguas abajo de un disco o válvula de ruptura apenas pueden identificarse por medios experimentales a altas presiones [3].

Existe la opinión generalizada de que la probabilidad de que se produzca una ignición espontánea de hidrógeno en un escape repentino de un equipo de alta presión es relativamente alta si no se adoptan medidas de mitigación. Con todo, no existen referencias en los códigos y normas con respecto a un problema de ignición espontánea o sobre un diseño de ingeniería específico para evitarlo o promoverlo para tuberías, depósitos y uso de sistemas de alta presión con hidrógeno comprimido [3]. El control de la ignición espontánea de un escape de hidrógeno a alta presión es uno de los retos de la seguridad del hidrógeno, para el que existe una explicación poco fundamentada.

Prevención de la ignición del hidrógeno

Las fuentes de ignición se deben eliminar o aislar de forma adecuada y las operaciones en las instalaciones FCH han de realizarse como si pudieran producirse fuentes de ignición imprevistas. Cabe establecer métodos de conexión a tierra para minimizar el riesgo de descarga estática y la posibilidad de que caigan rayos en entornos exteriores. Los materiales seleccionados para su uso en entornos de hidrógeno se deben evaluar en cuanto a su capacidad para descargar electricidad estática. Los materiales de aislamiento, como madera, papel y algunos tejidos, suelen formar una capa conductora que evita la acumulación de estática al absorber el agua del aire en entornos en los que la humedad relativa es superior al 50%. Las prácticas recomendadas para los métodos de conexión a tierra a fin de evitar las descargas estáticas se encuentran en diversas normas nacionales e internacionales que aluden a la instalación de equipos eléctricos en entornos peligrosos. Los equipos eléctricos seleccionados para uso en entornos de hidrógeno también pueden ser una fuente de chispas o de generación de calor, por lo que se deben procurar seguir las normas eléctricas nacionales e internacionales adecuadas para su instalación.

Hay varias formas de anular o al menos reducir el riesgo de ignición. El Health and Safety Executive (Reino Unido) elaboró una lista con estas medidas preventivas [14]:

- Utilización de equipos eléctricos adecuados (es decir, equipos clasificados para la zona en la que se encuentran). Los equipos mecánicos deben seleccionarse de forma similar.
- Puesta a tierra de todos los equipos con una instalación.
- Eliminación de superficies con temperatura superior a la temperatura de autoignición de los materiales inflamables que se almacenan/utilizan.
- Provisión de protección contra el rayo.
- Correcta selección de vehículos/motores de combustión interna que puedan trabajar en áreas zonificadas.
- Selección correcta de los equipos para evitar fuentes de radiación electromagnética de alta intensidad, por ejemplo, limitación de la potencia de entrada de los sistemas de fibra óptica, evitar los láseres de alta intensidad o las fuentes de radiación infrarroja.
- Prohibición de fumar/usar cerillas o mecheros.
- Control sobre el uso de vehículos habituales.
- Control sobre las actividades que crean zonas peligrosas intermitentes, por ejemplo, la carga/descarga de camiones cisterna.

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

- Control de las actividades de mantenimiento que puedan provocar chispas/superficies calientes/llamas directas mediante un plan de permisos de trabajo.
- Precauciones para controlar el riesgo de incrustaciones pirofóricas, por lo general asociadas a la formación de sulfuro de hierro en el interior de los equipos de proceso.

1.11 Control de las fuentes de ignición térmicas y mecánicas

La ignición de la mezcla de hidrógeno y aire puede ser provocada por una superficie caliente. En el caso del hidrógeno, la temperatura de las superficies calientes o de los puntos calientes no debe superar los 585 °C, incluso para unos pocos mm², según experimentos realizados dentro del proyecto europeo MECHEX (téngase en cuenta que la temperatura de autoignición del hidrógeno, 510 °C, sigue siendo inferior a la especificada más arriba).

Es preferible la separación física de las fuentes de ignición, como la soldadura, las llamas o los trabajos en caliente.

Por lo general, la ignición mecánica resulta de un esfuerzo mecánico en condiciones anormales o de fallo (es decir, rozamiento, amolado e impacto o una combinación de estos factores) y suele constar de tres pasos: generación de calor, transferencia de calor a la atmósfera explosiva circundante y, por último, la propia ignición [15]. El control de la ignición mecánica requiere un diseño cuidadoso del equipo por uno de los siguientes medios:

- Limitar la velocidad de rotación,
- Proporcionar una distancia suficiente entre las partes fijas y las giratorias,
- Instalar sensores de temperatura.

La energía producida por el impacto puede ser tan baja como un par de julios y es suficiente para encender la mezcla de hidrógeno y aire. Para evitar la ignición provocada por el impacto es necesario [15]:

- Utilizar herramientas adecuadas que no produzcan chispas,
- Purgar el hidrógeno antes de cualquier intervención
- Evitar el contacto entre el aluminio y el acero.

Los trabajos en caliente tienen similitudes con la ignición mecánica, pero no se generan por un fallo mecánico del proceso sino por una actividad humana. Es necesario prevenir cualquier accidente/incidente asociado mediante [15]:

- Emisión del "Permiso de Trabajos en Caliente",
- Formación adecuada del personal pertinente,

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

- Proporcionar un equipo de extinción de incendios adecuado,
- Cerrar el suministro de gas durante la intervención,
- Purgar el equipo antes de la intervención.

Referencias

1. Astbury, GR y Hawksworth, SJ (2007). Ignición espontánea de fugas de hidrógeno: revisión de los mecanismos postulados. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 2178-2185.
2. Moorehouse, J, Williams, A y Maddison TE (1974). Investigación de las energías mínimas de ignición de algunos hidrocarburos C1 a C7. *Combustión y llama*. Vol. 23, pp. 203-213.
3. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering*, Parte I y Parte II. Disponible en: www.bookboon.com, libro electrónico de descarga gratuita.
4. Proyecto HyFacts. Capítulo IM. Mecanismos de ignición del hidrógeno. Prevención y mitigación de la ignición. Disponible en: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [consultado el 23/11/2020].
5. Bond, J (1991). *Sources of ignition: flammability characteristics of chemical products*. Oxford: Butterworth Heinemann.
6. Chaineaux, J, Mavrothalassitis, G y Pineau, J (1991). Modelization and validation of the discharge in air of a vessel pressurized by flammable gas. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 134, pp. 104-137.
7. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y e Iwabuchi, H (2005). Deflagraciones y detonaciones de hidrógeno a gran escala, Actas de la 1ª Conferencia Internacional sobre Seguridad del Hidrógeno, 8-10 de septiembre de 2005, Pisa, Documento 120105.
8. Schmidchen, U (2009). Datos y mitos sobre la seguridad del hidrógeno. 3er curso corto internacional y taller de investigación avanzada "Progreso en la seguridad del hidrógeno", Belfast, 27 de abril-1 de mayo de 2009, Irlanda del Norte, Reino Unido.
9. 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.
10. 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 [consultado el 23/11/2020].
11. 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).

Clase 8: Fuentes de ignición y prevención de la ignición

12. 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 13/05/2014].
13. Wolanski, P and Wojcicki, S (1972). Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere. Actas del Combustion Institute. Vol. 14, pp. 1217-1223.
14. Ejecutivo de Salud y Seguridad (2012). Clasificación de áreas peligrosas y control de fuentes de ignición. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm> [consultado el 23/11/2020].
15. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. Tesis doctoral. Universidad de Ulster.
16. Reider, R, Otway, HJ y Knight HT (1965). An unconfined large volume hydrogen/air explosion. Pyrodynamics. Vol. 2, pp. 249-261.