

D 4.4

Directrices y buenas prácticas en materia de seguridad



El proyecto, financiado por la Unión Europea, cuenta con el apoyo de la Asociación para el Hidrógeno Limpio y sus miembros.

Las opiniones aquí expuestas corresponden en exclusiva al autor o autores y no representan la postura de la Unión Europea o la de la Asociación para el Hidrógeno Limpio, que no se hacen responsables de su contenido.

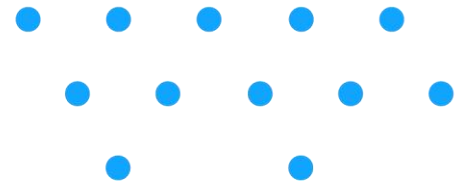


 www.hypop-project.eu

 info@hypop-project.eu

#HYPOPPROJECT





D 4.4	Directrices y buenas prácticas en materia de seguridad
TIPO DE DOCUMENTOS	Informe
MES Y FECHA DE ENTREGA	Mes 28, 30/09/2025
PAQUETE DE TRABAJO	WP 4
RESPONSABLE	ENVI
NIVEL DE DIFUSIÓN	Público
AUTORES	Mattia Miglietta
PROGRAMA	HORIZONTE EUROPA
ACUERDO DE SUBVENCIÓN	101111933
INICIO	Junio de 2023
DURACIÓN	28 meses





Colaboradores

NOMBRE	ORGANIZACIÓN
Mattia Miglietta	ENVI

Revisores expertos

NOMBRE	ORGANIZACIÓN
Ilaria Schiavi	ENVI
María Panadero	CNH2

Historial de revisiones

VERSIÓN	ORGANIZACIÓN	REVISOR/A	MODIFICACIONES
1	ENVI	Ilaria Schiavi	Primera versión para revisión del consorcio
2	ENVI	Mattia Miglietta	Segunda versión tras las observaciones de CNH2

La información y las opiniones que figuran en este informe son responsabilidad del o los autores y no reflejan de modo alguno la opinión oficial de la Unión Europea, ni de sus instituciones, organismos o de cualquier persona que actúe en su nombre.



Índice de contenidos

1	Acerca del proyecto HYPOP	9
2	Documentos de las Directrices HYPOP.....	9
3	Uso de las Directrices de seguridad de HYPOP.....	10
4	Principios fundamentales de la seguridad del hidrógeno y sus tecnologías	12
4.1	La seguridad del hidrógeno: propiedades y comparativas con los combustibles convencionales.....	13
4.1.1	Ventajas en materia de seguridad.....	15
4.1.2	Inconvenientes en materia de seguridad.....	16
4.2	Seguridad de la instalación: principios básicos del análisis de riesgos y atmósferas potencialmente explosivas (ATEX).....	19
4.3	Interacción con planificación: selección y descripción del sitio.....	21
4.4	Estrategias de seguridad para proyectos relacionados con el hidrógeno: medidas de prevención y mitigación	21
4.4.1	Producción de hidrógeno renovable mediante electrólisis con fines industriales	22
4.4.2	Almacenamiento de hidrógeno comprimido para los sectores de la industria y de la movilidad	28
4.4.3	Estaciones de repostaje de hidrógeno (HRS).....	29
4.4.4	Pilas de combustible para los sectores energético y residencial	32
5	Metodologías de evaluación de riesgos	37
6	Recomendaciones y medidas HYPOP para acelerar los procedimientos de aprobación y seguridad	39
7	Metodología.....	46
8	Conclusiones	52
9	Anexo A.....	54
i.	Directrices de la UE	54
ii.	Pruebas de la existencia de normativas para la seguridad de los proyectos de hidrógeno en la UE.....	57
iii.	Referencias básicas para reglamentos, códigos y estándares (RCS)	62
iv.	Talleres técnicos HYPOP	64
	Talleres técnicos: España	64
	Talleres técnicos: Italia.....	65
	Talleres técnicos: Bélgica	66
	Talleres técnicos: Bulgaria	66
	Talleres técnicos: Polonia.....	67



v. Análisis técnico de los requisitos y medidas de seguridad: estudio complementario al informe D2.1 HYPOP	68
CROACIA.....	68
CHIPRE	70
REPÚBLICA CHECA.....	71
LITUANIA.....	76
MALTA.....	78
ESLOVAQUIA.....	78

Índice de tablas

Tabla 1. Guía sobre el contenido de las Directrices de seguridad de HYPOP	10
Tabla 2. Principales propiedades del hidrógeno (información didáctica complementaria)	13
Tabla 3. Estados habituales del hidrógeno, condiciones de operación y aplicaciones	14
Tabla 4. Parámetros relevantes para el desarrollo y la gestión de proyectos de forma segura (información didáctica complementaria)	14
Tabla 5. Rango de inflamabilidad de los combustibles vs. del H ₂	17
Tabla 6. Fallos, riesgos y medidas de prevención y mitigación para la pila de electrólisis	23
Tabla 7. Riesgos asociados a los componentes del BoP de producción de hidrógeno que afectan a la seguridad, y medidas de prevención y mitigación aplicables	25
Tabla 8. Riesgos y medidas de prevención y mitigación en el almacenamiento de hidrógeno comprimido con fines industriales y de movilidad	28
Tabla 9. Posibles fallos y medidas de detección y seguridad para los componentes de las HRS	30
Tabla 10. Tipos y aplicaciones de pilas de combustible (información didáctica complementaria)	33
Tabla 11. Riesgos y medidas de prevención y mitigación para los sistemas de pilas de combustible en el sector energético y residencial	34
Tabla 12. QUÉ, POR QUÉ y CUÁNDO es importante el análisis de riesgo en los proyectos de H ₂	37
Tabla 13. Análisis de riesgos cualitativos y cuantitativos identificados a partir de las mejores prácticas HYPOP.....	37
Tabla 14. Acciones prácticas/recomendables del proyecto HYPOP y beneficios previstos.....	39
Tabla 15. Fortalezas y limitaciones de los enfoques prescriptivos y basados en el rendimiento	42
Tabla 16. Ventajas de presentar el proyecto a las autoridades públicas en una fase temprana	43
Tabla 17. Actividades emprendidas en los paquetes de trabajo 2 y 4 para obtener información sobre los métodos de seguridad destinados a proyectos de hidrógeno.....	46
Tabla 18. Colaboradores HYPOP: Proyectos de la UE, autoridades públicas y entidades privadas.....	47
Tabla 19. Parámetros de seguridad y permisos utilizados para un análisis de fortalezas y debilidades	50



Tabla 20. Directrices de seguridad de la UE identificadas en HYPOP	54
Tabla 21. Normativa de seguridad vigente en la UE para proyectos de hidrógeno	57
Tabla 22. Referencias básicas para reglamentos, códigos y estándares.....	62
Tabla 23. Cantidades límite de sustancias peligrosas según el Reglamento sobre la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas	69
Tabla 24. Distancias de seguridad según la norma NFPA-2/2020 (Croacia).....	69
Tabla 25. Distancias de seguridad obligatorias en la República Checa.....	74

Índice de imágenes

Imagen 1. Directrices de seguridad HYPOP	41
Imagen 2. Cobertura geográfica de la investigación en materia de seguridad, permisos y certificación	50
Imagen 3. Mapa de fortalezas y debilidades según los parámetros de seguridad (a la izquierda) y de permisos (a la derecha) del paquete de trabajo 2.....	51



Nombre abreviado de los colaboradores

ENVI	Parco Scientifico Tecnologico Per L'ambiente Environment Park Torino Spa
IMI	Institute For Methods Innovation
IME	Fundación IMDEA Energía
APRE	Agenzia per la Promozione della Ricerca Europea
CNH2	Centro Nacional del Hidrógeno
RIGP	Regionalna Izba Gospodarcza Pomorza
CLUSTER TWEED	Cluster Tweed
BH2C	Balkanski Vodородen Klaster

Abreviaturas

ATEX	Atmósferas explosivas: Directivas de la UE para equipos y lugares de trabajo en atmósferas potencialmente explosivas
BoP	Balance de planta
EES	Sistemas de parada de emergencia
HAZID	Identificación de peligros
HAZOP	Estudio de riesgos y operabilidad
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
ISO	Organización Internacional de Normalización
LEL	Límite inferior de explosividad
LOI	Índice de oxígeno límite
GLP	Gas licuado de petróleo
PPE	Equipo de protección personal
PSV	Válvula de seguridad de presión
WFMPT	Inspección por partículas magnéticas fluorescentes húmedas



Resumen ejecutivo

HYPOP nace con el ambicioso, pero sencillo objetivo de generar confianza en las tecnologías del hidrógeno, tanto en la ciudadanía como en las autoridades públicas, fabricantes y primeros usuarios. En particular, en sectores emergentes como el de la movilidad y el residencial, donde la transición resulta más compleja. Concretamente, el interés se centra en la seguridad, la tramitación de permisos y la certificación de las tecnologías del hidrógeno para determinar si es posible establecer una estrategia común a nivel europeo. No obstante, al escuchar a las partes interesadas y analizar casos en distintos países, se observa un panorama desigual con respecto a las autorizaciones de seguridad. La razón es que las normativas se interpretan de forma diferente en las distintas regiones, ya que la familiaridad técnica con las propiedades del H₂ varía. Por otro lado, también se aprecian fluctuaciones entre las regulaciones prescriptivas y los enfoques de «resultados» basados en el riesgo. Esto conlleva procesos de autorización largos e impredecibles, márgenes de seguridad inconsistentes —a veces excesivos y otras, insuficientes—, aumento de los costes indirectos y, con frecuencia, desconfianza pública.

Las Directrices de seguridad de HYPOP promueven una estrategia común y se basan en dos pilares: las **acciones técnicas** y la **difusión de información para concienciar a la sociedad**.

Desde el punto de vista técnico, el documento establece una terminología y unos conceptos básicos para abordar la seguridad del hidrógeno y sus tecnologías habilitadoras. Se parte desde los principios generales (propiedades fundamentales del gas, análisis de riesgos o selección del emplazamiento) hasta los aspectos clave específicos para las distintas tecnologías del hidrógeno. Dado que la **inflamabilidad** y **explosividad** del hidrógeno definen su naturaleza peligrosa, hacemos referencia explícita al **marco ATEX** (equipos y operaciones en atmósferas potencialmente peligrosas) y resumimos los **métodos de análisis de riesgos más comunes** identificados durante las reuniones con las partes interesadas de HYPOP (desde HAZID/HAZOP cualitativos hasta herramientas cuantitativas). A partir de estos elementos fundamentales, describimos los **principales riesgos y las medidas preventivas y de mitigación**, así como, si procede, los **beneficios prácticos** que proporcionan a las partes interesadas.

El segundo pilar se centra en la dimensión social y de aceptación, por lo que se ofrecen pautas y acciones prácticas para hacer frente a los siguientes retos: (i) vacíos legales o interpretaciones divergentes (incluso entre regiones u oficinas locales); (ii) la experiencia práctica limitada de las autoridades con los estándares técnicos, los métodos de riesgo y las características específicas del hidrógeno; (iii) la dependencia defensiva de normas redactadas para otros combustibles (gas natural/GLP) y la aplicación parcial de otras normas que no se ajustan a los proyectos de hidrógeno; (iv) los procesos repetitivos y lentos debidos a solicitudes de datos *ad hoc*; y (vi) la desconfianza pública.

Estas recomendaciones se consolidan en una propuesta de **protocolo de seguridad estandarizado y por etapas**: desde un contacto inicial con las autoridades hasta una evaluación de riesgos proporcional, establecimiento de zonas ATEX, selección de medidas de protección y planificación de emergencias. Su objetivo es **acelerar las aprobaciones** y garantizar que los proyectos de hidrógeno cuenten con un **expediente de seguridad sólido y bien documentado**.



1 Acerca del proyecto HYPOP

El proyecto HYPOP (*Hydrogen Public Opinion and Acceptance*) está financiado por la Asociación para un Hidrógeno Limpio bajo el programa europeo Horizonte Europa (A. S. n.º 101111933). Su principal propósito es concienciar a la sociedad y generar confianza en las tecnologías del hidrógeno y en sus beneficios sistémicos, con especial énfasis en la movilidad y las aplicaciones residenciales.

Los resultados que figuran en este documento corresponden a uno de los principales objetivos previstos del proyecto HYPOP: la elaboración de directrices y buenas prácticas que servirán para determinar de manera más eficaz la forma en que la sociedad, los consumidores/usuarios finales y las partes interesadas pueden participar en la implementación de las tecnologías del hidrógeno.

El documento se elaboró a partir del análisis de las prácticas actuales y del diálogo con los distintos grupos de interés. Los grupos destinatarios de las actividades de participación fueron los fabricantes de tecnología, los pioneros en adoptar dichas tecnologías y las autoridades públicas (por ejemplo, servicios de emergencia, municipios, etc.) que intervienen en los procedimientos de seguridad, concesión de permisos y certificación en los distintos países de la UE.

2 Documentos de las Directrices HYPOP

Este documento es parte de una serie de directrices que abordan de forma individual los siguientes aspectos:

- Seguridad (este documento).
- Tramitación de permisos (entregable D 4.3).
- Certificación (entregable D 4.5).

Aunque la seguridad es un pilar fundamental del marco de tramitación de permisos (tratado en D 4.3), necesita un enfoque particular, ya que engloba tanto aspectos sociales como técnicos. Los protocolos de seguridad suelen remitirse a aspectos o normas de certificación, que se exponen en D 4.5. Gracias a estos vínculos existentes, se han incluido, en la medida de lo posible, referencias cruzadas en las tres directrices con el fin de ayudar a los usuarios.



3 Uso de las Directrices de seguridad de HYPOP

Quienes utilicen estas directrices deberán consultar la siguiente tabla para conocer el contenido del presente documento. Si bien se recomienda leer las secciones 4 y 5 por completo al menos una vez, es posible que más adelante solo sea necesario consultar las aplicaciones específicas de interés que se detallan en la sección 4.3. En la sección 6, se describe una estrategia general que podría fomentar la colaboración entre las diferentes partes interesadas.

Tabla 1. Guía sobre el contenido de las Directrices de seguridad de HYPOP

Sección	Contenido
<i>4 - Principios fundamentales de la seguridad del hidrógeno y sus tecnologías</i>	Describe las características del hidrógeno como sustancia, con especial énfasis en su impacto en la seguridad. Es fundamental conocer estas propiedades para entender las medidas básicas de prevención y mitigación. Este documento detalla los aspectos que las partes interesadas deben tener en cuenta al evaluar un proyecto que implique tecnologías de hidrógeno individuales , ya que la combinación de varias de estas tecnologías, por lo general, se considera parte de las aplicaciones industriales, de movilidad, etc., descritas en la subsección 4.3. Además, se menciona la evaluación de riesgos y se hace especial hincapié en la directiva ATEX , que debe aplicarse a todas las tecnologías utilizadas en entornos donde se emplea hidrógeno. Esto se debe a que se vincula con la inflamabilidad y, por lo tanto, con fenómenos explosivos que podrían afectar a las personas presentes en plantas industriales con producción y/o almacenamiento de hidrógeno, estaciones de repostaje (fijas o móviles) y aplicaciones residenciales.
<i>4.4 - Interacción con planificación: selección y descripción del sitio</i>	Esta subsección reúne toda la información en materia de seguridad. En primer lugar, abarca las propiedades básicas del hidrógeno, el funcionamiento y la seguridad de las tecnologías individuales, los análisis ATEX y los métodos de análisis de riesgos. Esta información converge cuando diversas tecnologías del hidrógeno necesitan integrarse en un contexto de aplicación particular. Por lo tanto, los capítulos de esta subsección presentan un enfoque general de la seguridad para varios contextos, como la producción de hidrógeno por electrólisis para aplicaciones industriales y de otra índole, las estaciones de repostaje (fijas y móviles) y los sistemas de pilas de combustible instalados en entornos residenciales.
<i>5 - Metodologías de evaluación de riesgos</i>	Este capítulo describe qué son los análisis de riesgo, por qué se utilizan y cuándo . A continuación, proporciona información general sobre las metodologías que siempre deben acompañar a un proyecto de hidrógeno, con independencia de su aplicación.
<i>6 - Recomendaciones y medidas HYPOP para acelerar los procedimientos de aprobación y seguridad</i>	Clasifica las principales problemáticas, las acciones prácticas y las recomendaciones, así como los beneficios de afrontarlas. HYPOP plantea un protocolo estándar («Directrices de seguridad HYPOP») con el fin de facilitar el diálogo entre las autoridades públicas y los diseñadores . De esta forma, estos últimos podrán presentar proyectos de hidrógeno con una filosofía de seguridad común, entendible y que cuente con la aceptación de las autoridades públicas



Sección	Contenido
	(por ejemplo, servicios de emergencia) y de la ciudadanía en el menor tiempo posible.
<i>7 - Metodología</i>	Describe la metodología utilizada para recopilar los datos necesarios para elaborar las directrices. Además, ofrece una visión general de las partes interesadas que participaron, de los tipos de actividades de investigación llevadas a cabo y un resumen gráfico de los resultados obtenidos del estudio técnico sobre los requisitos de seguridad y las barreras identificadas en el documento 2.1.
<i>8 - Conclusiones</i>	Ofrece un resumen de la investigación de HYPOP para el desarrollo de las Directrices de seguridad.



4 Principios fundamentales de la seguridad del hidrógeno y sus tecnologías

La seguridad es un concepto intangible y abierto a la interpretación, lo que limita tanto su estudio científico y su aplicación práctica. En la ingeniería de seguridad, existen varias propuestas a la hora de definir el concepto de seguridad. A continuación, podemos ver algunas de las definiciones más citadas:

- «Ausencia de riesgo inaceptable para el entorno por parte de las unidades funcionales y físicas en cuestión» – Vocabulario Electrotécnico Internacional en línea¹.
- «Ausencia de riesgo que no sea tolerable» – Guía ISO/IEC 51:2014², donde el riesgo se define como «la combinación de la probabilidad de que se produzca un daño y las consecuencias de ese daño».
- «Ausencia de riesgo inaceptable» – Norma ISO 11014:2009³.

La seguridad de cualquier instalación está estrechamente ligada al concepto de riesgo que, tal y como se ha definido, surge de la combinación de:

- La **probabilidad** de que ocurra un evento peligroso (ocurrencia accidental).
- La **gravedad** de sus consecuencias (el alcance del posible daño).

Esta probabilidad no es solo una cuestión teórica, sino que también considera:

- La frecuencia de exposición a la situación de riesgo.
- La probabilidad de que el evento perjudicial llegue a materializarse.
- La posibilidad de prevenir o mitigar el daño (por ejemplo, mediante sistemas de alarma, distancias de seguridad o formación del personal).

El uso de hidrógeno conlleva algunos riesgos que se asocian a las características de la propia sustancia, tal y como se detalla a continuación. No obstante, si se aplican los protocolos de seguridad y las medidas de mitigación de riesgos adecuadas, el **hidrógeno y las tecnologías basadas en él no son más peligrosas que los combustibles convencionales u otras soluciones sostenibles alternativas a los combustibles fósiles**. Además, estos riesgos no varían en función del país, por lo que la **seguridad frente al hidrógeno puede y debe garantizarse de la misma manera en todos los países de la UE**. Esto permite adoptar **soluciones replicables** a nivel transfronterizo, lo que conduce a un proceso burocrático simplificado y a la reducción de los costes del proyecto.

El objetivo de las siguientes subsecciones es proporcionar las nociones básicas para saber cómo manejar el hidrógeno en general y sus tecnologías específicas.

¹ <https://www.electropedia.org/>

² <https://www.iso.org/standard/53940.html>

³ <https://www.iso.org/standard/44690.html>



4.1 La seguridad del hidrógeno: propiedades y comparativas con los combustibles convencionales

El hidrógeno es el elemento más ligero y pequeño que existe. Se presenta en estado gaseoso en condiciones atmosféricas, es decir, **en condiciones estándar de temperatura y presión (25 °C y 1 atm)**. Es una sustancia incolora, inodora, insípida, no tóxica y no venenosa. Aunque no es corrosivo, es capaz de deteriorar ciertos metales. A continuación, la siguiente tabla nos muestra las propiedades fisicoquímicas del hidrógeno más relevantes.

Tabla 2. Principales propiedades del hidrógeno (información didáctica complementaria⁴)

Propiedad	Valor	Unidad (SI)
Temperatura de autoignición	500	°C
Punto de ebullición (1 atm)	-252,9	°C
Densidad (TPN)	0,08375	kg/m ³
Coefficiente de difusión en aire (TPN)	0,610	cm ² /s
Entalpía (TPN)	3858,1	kJ/kg
Entropía (TPN)	53,14	J/g·K
Temperatura de llama en aire	2045	°C
Rango de inflamabilidad en aire	4,0-75,0	vol. %
Energía de ignición en aire	2×10^{-5}	J
Energía interna (TPN)	2648,3	kJ/kg
Peso molecular	2,02	g/mol
Gravedad específica (aire = 1) (TPN)	0,0696	—
Volumen específico (TPN)	11,94	m ³ /kg
Calor específico, C_p (TPN)	14,29	J/g·K
Calor específico, C_v (TPN)	10,16	J/g·K
Conductividad térmica (TPN)	0,1825	W/m·K
Viscosidad (TPN)	$8,813 \times 10^{-5}$	g/cm·s

**TPN = 1 atm, 20 °C (condiciones normales de temperatura y presión).*

El hidrógeno también puede presentarse en estado líquido cuando se alcanzan unas condiciones de temperatura y presión concretas. Su punto de ebullición es de -253 °C a 1 atm. El término

⁴ <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/>

«hidrógeno criogénico» se suele utilizar de forma más general para referirse al hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas. Por ende, el hidrógeno líquido es una forma criogénica.

En función de la aplicación específica, el hidrógeno se produce y utiliza en diferentes condiciones y en sus diversos estados físicos.

Tabla 3. Estados habituales del hidrógeno, condiciones de operación y aplicaciones

Estado	Rango de Temperatura	Rango de presión	Aplicaciones típicas
Gaseoso (comprimido)	Ambiente (20-25 °C)	Hasta 700 bar	Pilas de combustible para vehículos, usos industriales
Líquido (criogénico)	Por debajo de -252,87 °C	1 atm	Propulsión espacial, almacenamiento de alta densidad
Criogénico comprimido	De -240 a -253 °C	200-350 bar	Transporte y distribución

La siguiente tabla incluye otras propiedades relevantes para el desarrollo y la gestión de proyectos de forma segura. Entre ellos, el establecimiento de zonas ATEX de las instalaciones, las distancias de seguridad, los sistemas de protección y los sistemas de detección de gas y fugas.

Tabla 4. Parámetros relevantes para el desarrollo y la gestión de proyectos de forma segura (información didáctica complementaria⁵)

Parámetro	Deflagración	Detonación	Unidad
Límite inferior de inflamabilidad	4,1	18,3	vol. %
	3,6	16,1	g/m ³ de aire
Límite superior de inflamabilidad	74,0	59,0	vol. %
	67	51,8	g/m ³ de aire
Valor de detonación estequiométrica en aire	—	29,53	vol. %
Temperatura de autoignición	574	574	°C
Energía mínima de ignición	0,02	≥ 10 ⁷	mJ
Temperatura máxima de llama	2318	2318	K
Energía de la explosión	—	2,02	kg TNT m ³ (gas en TPN)
Velocidad de combustión en aire (en función de la concentración)	102-325	—	cm/s

⁵ <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials/educational-training/lecture-2-properties-of-hydrogen-relevant-to-safety/>



Parámetro	Deflagración	Detonación	Unidad
Velocidad de detonación en aire	—	1,48-2,15	km/s

Las principales propiedades del hidrógeno que afectan a la seguridad incluyen:

- Densidad de vapor relativa.
- Emisividad y temperatura de las llamas.
- Rango de inflamabilidad.
- Difusividad.
- Punto de ebullición.

Las propiedades del H₂ que figuran a continuación se clasifican en función de su impacto en la seguridad:

- Si una propiedad intrínseca del hidrógeno contribuye a una mayor seguridad para el medioambiente y las personas, la consideramos **una ventaja en materia de seguridad**.
- Si una propiedad intrínseca del hidrógeno requiere **medidas de mitigación** para alcanzar el mismo nivel de seguridad que los combustibles convencionales, la consideramos una **desventaja** o un **punto en contra** en materia de seguridad.

4.1.1 Ventajas en materia de seguridad

Densidad de vapor relativa

Hace referencia a la densidad de un gas o vapor en comparación con el aire.

- Si el valor es **mayor que 1**, el gas es **más pesado que el aire** → tiende a acumularse en zonas bajas (como sótanos o zanjas).
- Si el valor es **menor que 1**, el gas es **más ligero que el aire** → tiende a ascender y a dispersarse hacia arriba.
- Si el valor es **igual a 1**, se comporta como el aire y tiende a difundirse sin una dirección preferente.

IMPACTO EN LA SEGURIDAD:

Conocer la densidad relativa del vapor es crucial en el contexto de la seguridad de los combustibles para:

- Diseñar sistemas de ventilación adecuados.
- Evaluar el riesgo de acumulación en espacios confinados.
- Determinar la ubicación de los sistemas de detección de fugas de gas (por ejemplo,

El hidrógeno es una molécula mucho más ligera que el aire y otros combustibles convencionales. De hecho, el hidrógeno es:

- **14 veces más ligero que el aire.**
- **6 veces más ligero que el gas natural.**



- **57 veces más ligero que el vapor de gasolina⁶.**

Para usos al aire libre (como vehículos de hidrógeno y estaciones de repostaje), el hidrógeno tiende a dispersarse hacia arriba con gran rapidez, lo que disminuye la posibilidad de contacto o interacción con una chispa. En cambio, en espacios cerrados el hidrógeno tiende a acumularse justo cerca del techo. En caso de fugas, los combustibles fósiles, que suelen ser más pesados, se acumulan y forman nubes combustibles de gran tamaño, lo que aumenta así el riesgo de incendio o explosión.

Emisividad y temperatura de las llamas

Las llamas de hidrógeno emiten poco calor radiante en comparación con las de otros combustibles fósiles convencionales. **Una menor carga térmica reduce la probabilidad de incendios en cadena o de daños estructurales en otros componentes que puedan estar presentes en el lugar.**

Sin embargo, la baja emisividad hace que las llamas sean casi invisibles al ojo humano. Este hecho, unido a que la temperatura de la llama puede alcanzar los 2400 °C, representa un riesgo. A pesar de ello, es poco probable que se produzca una fuga en las instalaciones de producción, almacenamiento y uso de hidrógeno actuales sin que se activen los dispositivos de emergencia. Las medidas habituales de mitigación incluyen la aplicación de distancias de seguridad mínimas.

4.1.2 Inconvenientes en materia de seguridad

Rango de inflamabilidad y energía mínima de ignición

La inflamabilidad es una particularidad del hidrógeno que exige la atención de las autoridades públicas responsables de la seguridad y la salud de la población, así como de los responsables de proyectos que se encargan de garantizar la seguridad de la operación de actividades económicas cercanas o directamente relacionadas.

También es importante tener en cuenta el índice de oxígeno límite (LOI), es decir, la concentración mínima de oxígeno que permitirá que se propague una llama en una mezcla de combustible, aire y nitrógeno. Ninguna mezcla de hidrógeno, aire y nitrógeno en condiciones TPN propagará la llama si contiene menos del 5 % de oxígeno en volumen. $LOI_{H_2} = 5$

El rango de inflamabilidad se refiere al intervalo de concentraciones de gas entre el **límite inferior de inflamabilidad (LFL, por sus siglas en inglés)** y el **límite superior de inflamabilidad (UFL)**.

- El **LFL** es la **concentración mínima** de una sustancia combustible en un oxidante gaseoso (normalmente aire) que permite la propagación de la llama.
- El **UFL** es la **concentración máxima** en la que todavía puede producirse la combustión.

El hidrógeno (y cualquier gas) puede incendiarse si su concentración en el aire se encuentra **entre el LFL y el UFL, siempre que haya una fuente de ignición presente.**

⁶ <https://h2tools.org/bestpractices/gaseous-gh2-and-liquid-h2-fueling-stations/hydrogen-compared-to-other-fuels>



ASPECTOS IMPORTANTES EN MATERIA DE SEGURIDAD:

En materia de seguridad de los combustibles, es crucial vigilar las diferentes fuentes de ignición que pueden provocar llamas de hidrógeno:

- Fuentes eléctricas: motores, interruptores, relés o teléfonos móviles.
- Electricidad estática.
- Carga eléctrica por el funcionamiento de equipos debido a tuberías con una conexión a tierra deficiente o no conductoras.
- Fuentes mecánicas e impactos: chispas por colisiones.
- Fenómenos de fricción (superficies en contacto).
- Fuentes térmicas: superficies calientes, etc.
- Otras fuentes de llamas vivas: fuego abierto y chispas de soldadura, combustión o esmerilado.
- Superficies calientes, como un colector de escape.
- Gases de escape de vehículos.
- Fuentes químicas.

Dadas tales fuentes de ignición, una propiedad del hidrógeno asociada a la inflamabilidad es la energía mínima de ignición (MIE, por sus siglas en inglés). Se define como la energía eléctrica mínima necesaria para prender una mezcla de sustancias inflamables y puede variar según la temperatura y la presión: MIE = 0,017 mJ. Este valor es inferior a la décima parte del de otros combustibles comunes como el metano, el GLP o la gasolina.

Cuando la concentración de hidrógeno en el aire alcanza entre un 4 % y un 75 % (los límites de explosión), puede deflagrar bajo fuego abierto, electricidad estática o altas temperaturas (≥ 500 °C). Este rango de inflamabilidad es considerablemente más amplio que el de otros combustibles convencionales. Por ejemplo, la gasolina tiene un rango de inflamabilidad del 1 % al 7,6 %, el propano del 2,2 % al 9,6 %, y el metano del 5,3 % al 15 %.

Tabla 5. Rango de inflamabilidad de los combustibles vs. del H₂⁷

Combustible	Punto de inflamación (°C)	Rango de inflamabilidad en aire (vol. %)
Hidrógeno	-231	4-75
Metano	-188	5,3-15
Propano	-104	2,2-9,6
Gasolina	-45	1-7,6
Metanol	11	6-36,5
Etanol (70 %)	17	3,3-19
Queroseno	36	0,7-5
Combustible para aviones	60	0,7-5
Diésel	62	0,6-5,5
Biodiésel	130	0,6-6

⁷ <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials/educational-training/lecture-2-properties-of-hydrogen-relevant-to-safety/>



Temperatura de ignición: La temperatura más baja a la que un combustible produce suficientes vapores en su superficie para formar una mezcla inflamable con el aire. Aun así, se necesita una fuente de ignición.

Difusividad

Cuantifica la velocidad a la que las moléculas de gas se mueven desde una zona de alta concentración a una de baja concentración, impulsadas por un gradiente de concentración. Aunque esta propiedad del hidrógeno está vinculada a su baja densidad de vapor relativa —que reduce la duración de una atmósfera explosiva—, no se puede considerar una ventaja general en materia de seguridad.

IMPACTO EN LA SEGURIDAD:

En materia de seguridad de los combustibles, el hidrógeno puede impregnar muchos materiales, lo que aumenta la probabilidad de que se formen mezclas explosivas incluso en espacios muy confinados. Asimismo, una vez que dicha mezcla se prende, el frente de llama se propaga con mucha más rapidez, precisamente a causa de la alta difusividad del hidrógeno.

Punto de ebullición

El punto de ebullición es una propiedad fundamental que afecta directamente a la seguridad y a los riesgos potenciales para la salud en caso de contacto directo con hidrógeno líquido o con vapores de hidrógeno. El **punto de ebullición normal (NBP, por sus siglas en inglés)** del hidrógeno es de alrededor de **20,3 K (-252,9 °C)**.

IMPACTO EN LA SEGURIDAD:

Los efectos negativos, que derivan de cambios rápidos del hidrógeno líquido a otros estados como el gaseoso, pueden ser:

- Un **contacto directo con la piel** de hidrógeno líquido puede provocar **quemaduras criogénicas**. Además, **inhalar vapores de hidrógeno** puede causar **problemas respiratorios como la asfixia**, debido al desplazamiento de oxígeno en entornos cerrados o mal ventilados.
- Expansiones significativas de hidrógeno, que dan lugar a un fuerte aumento de la presión y a la posible **propagación horizontal** del hidrógeno liberado.

Medidas de mitigación: Es fundamental contar con una ventilación adecuada, sistemas de control de oxígeno y aislamiento térmico para garantizar la manipulación segura del hidrógeno líquido/criogénico. Además, se recomienda utilizar recipientes criogénicos especiales, como los de doble pared y con aislamiento al vacío, y elegir materiales que resistan una tensión térmica extrema sin volverse frágiles.



4.2 Seguridad de la instalación: principios básicos del análisis de riesgos y atmósferas potencialmente explosivas (ATEX)

La evaluación de seguridad de cualquier proyecto de instalación debe incluir información sobre los análisis de riesgos efectuados para:

- El correcto funcionamiento de las propias tecnologías del hidrógeno.
- Posibles fallos y efecto dominó en otros equipos.
- Equipos ubicados dentro del área de la instalación.
- Deterioro de los materiales que pudieran comprometer el buen funcionamiento del equipo.
- Errores humanos debidos a una mala praxis en el uso y mantenimiento de los sistemas.

Es importante llevar a cabo análisis cualitativos de riesgos (QRA, por sus siglas en inglés) para los casos que figuran en las normativas nacionales o locales aplicables. Además, se incluyen QRA específicos para situaciones más complejas en cuanto a la tecnología utilizada, las características del sitio o aspectos no cubiertos por las normas de seguridad existentes (si las hubiera). Para obtener más información sobre las metodologías de evaluación de riesgos más comunes identificadas en el proyecto HYPOP, véase la sección 5.

El análisis de riesgos debe integrarse con la clasificación de zonas ATEX, lo que conlleva:

- Mapear las zonas 1 y 2 alrededor de los puntos de fuga probables u ocasionales.
- Definir el volumen efectivo en función de los parámetros de ventilación.
- Aislar los equipos no aptos para atmósferas explosivas.
- Optimizar la distribución para minimizar la superposición entre zonas peligrosas y vías de evacuación.

La Directiva 2014/34/UE (ATEX) es la regulación que se aplica con más frecuencia para prevenir y proteger un lugar contra explosiones accidentales⁸. Esta directiva es de especial relevancia para cualquier instalación que utilice gas, incluidas las tecnologías de hidrógeno. Cuando se combina con los análisis de riesgos descritos en la sección 5, la documentación ATEX se centra en clasificar las zonas con riesgo de explosión. Se trata de un requisito previo para el diseño e instalación de sistemas eléctricos y, en un sentido más amplio, es esencial para cualquier evaluación general de seguridad. Por esta razón, y dadas las características mencionadas, la clasificación ATEX figura en los diversos informes de seguridad que los ingenieros de protección contra incendios presentan a las autoridades competentes.

¿Cuál es el propósito de la clasificación de áreas peligrosas?

- Respalda el análisis de riesgos de una atmósfera explosiva.
- Definir los requisitos fundamentales en materia de seguridad contra explosiones para equipos eléctricos y no eléctricos, así como para su instalación en una zona peligrosa, lo que garantiza que no actúen como fuentes de ignición en las

¿A quién va dirigida la clasificación de zonas peligrosas?

En función de la estructura administrativa nacional o local, esta clasificación es útil para muchas partes interesadas, pero, por lo general, la solicitan:

- Quienes se encargarán del análisis de riesgos de una atmósfera explosiva.
- El servicio de salud, seguridad y prevención.
- Cualquier persona que adquiera equipos (dispositivos, maquinaria, etc.) para estas zonas.
- Todo el personal que trabaje o que acceda a estas zonas.
- Personal que utilice herramientas o equipos en la zona (por ejemplo, personal de mantenimiento)

Por lo general, una explosión solo puede ocurrir si los tres elementos siguientes coinciden en el mismo lugar y al mismo tiempo:

1. **Gas inflamable o polvo combustible (combustible).**
2. **Aire, cuyo oxígeno actúa como agente oxidante (oxidante).**
3. **Una fuente de ignición.** Por ejemplo, una chispa, un arco eléctrico o una temperatura elevada en la superficie (ignición).

La seguridad contra explosiones se consigue cuando la probabilidad de que coexistan combustible, oxidante y fuente de ignición se reduce a un nivel aceptable. En una instalación de hidrógeno, las zonas alrededor de cada equipo se clasifican mediante la determinación del alcance espacial de las zonas peligrosas y su riesgo de explosión asociado. Dicho riesgo se evalúa –y, si procede, se reduce a niveles aceptables– al actuar en tres frentes: las fuentes de emisión, el entorno (ventilación, monitoreo, etc.) y las fuentes de ignición potenciales (tanto eléctricas como no eléctricas).

⁸ https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering/equipment-potentially-explosive-atmospheres-atex_en



Las zonas se clasifican en **zonas peligrosas** y **zonas no peligrosas** según el origen del peligro (por ejemplo, gases, vapores o nieblas inflamables, o polvos combustibles) y las características operativas, como los sistemas de contención, los equipos de proceso y los procedimientos de mantenimiento.

- **Zona 0:** En el área existe una atmósfera explosiva de forma continua, frecuente o por periodos prolongados.
- **Zona 1:** Es probable que se genere una atmósfera explosiva durante el funcionamiento normal, pero solo de forma ocasional.
- **Zona 2:** Es poco probable que se forme una atmósfera explosiva en condiciones normales de operación. En caso de que se genere, solo durará periodos de tiempo cortos.

Este método de clasificación de zonas es también fundamental a la hora de elegir tecnologías que, por sí mismas, no se conviertan en fuentes de ignición potenciales.

4.3 Interacción con planificación: selección y descripción del sitio

Elegir el lugar para una instalación de hidrógeno es un factor de gran importancia, junto con las consideraciones de seguridad de cada una de las tecnologías.

Por lo tanto, la elección del emplazamiento debe basarse en un análisis multicriterio que contemple lo siguiente:

- Las clasificaciones de uso de suelo y la compatibilidad urbanística, incluidas las restricciones para especies protegidas u otras limitaciones medioambientales.
- Distancias a zonas concurridas y edificios públicos (conviene evitar zonas muy pobladas).
- Disponibilidad de electricidad y agua. La disponibilidad de agua es un factor de riesgo si el emplazamiento se ubica en una zona con escasez de este recurso.
- Ausencia de obstáculos que puedan favorecer el estancamiento del gas.
- Verificación del acceso de vehículos de bomberos y emergencia, así como de la ubicación de las bocas de incendio (aspecto vinculado a las distancias de seguridad).
- Análisis de interferencias: Líneas de alta tensión aéreas, vías férreas, flujos de tráfico intenso, zonas ATEX ya existentes y otros depósitos de combustible.

Para obtener más información acerca de algunos de estos puntos, véase el informe D4.3.

4.4 Estrategias de seguridad para proyectos relacionados con el hidrógeno: medidas de prevención y mitigación

A continuación, veremos las principales fuentes de riesgo asociadas a cada una de las tecnologías de producción, almacenamiento y uso de hidrógeno.

Es fundamental conocer las propiedades intrínsecas del hidrógeno para que las instalaciones funcionen de manera segura. Por ello, esta sección se centra en los principales aspectos en materia de seguridad que deben tenerse en cuenta. Además, también incluye un análisis de las siguientes instalaciones de hidrógeno:



- Producción de hidrógeno renovable mediante electrólisis con fines industriales (4.4.1)
- Almacenamiento de hidrógeno comprimido para los sectores de la industria y de la movilidad (4.4.2)
- Estaciones de repostaje de hidrógeno (HRS) (4.4.3)
- Pilas de combustible para los sectores energético y residencial (4.4.4)

Dado que una instalación de hidrógeno puede contener elementos descritos en esta sección (por ejemplo, una estación de repostaje de hidrógeno con producción y almacenamiento *in situ*, un electrolizador con almacenamiento *in situ*, etc.), la información en materia de seguridad de esta guía debe integrarse para cubrir todos los elementos.

4.4.1 Producción de hidrógeno renovable mediante electrólisis con fines industriales

Se puede producir hidrógeno renovable a partir de electricidad generada con fuentes renovables como la energía solar, la eólica y la hidráulica. Esta energía de corriente alterna (AC) se convierte en corriente continua (CC) para suministrar al electrolizador una corriente constante y unidireccional. Por otro lado, la electricidad también alimenta a todos los componentes del balance de planta (BoP) que rodean la pila de electrólisis. Con esto, se garantiza un funcionamiento eficiente bajo las condiciones de diseño y la seguridad general de la planta.

El balance de la planta podrá consistir en:

- 1) Sistemas de gestión del agua.
- 2) Sistema para el suministro de energía.
- 3) Sistemas de recirculación y purificación de electrolitos.
- 4) Sistemas de purificación de los gases del electrolizador.

En el BoP también se encuentran los sistemas de supervisión y control que activan las funciones de seguridad. Por lo general, los sistemas de supervisión, control y seguridad (por ejemplo, los sistemas de parada de emergencia o EES) son equipos automáticos que podrían activar procedimientos de cierre. Ante una fuga detectada u otras situaciones de emergencia, los sistemas automáticos pueden activar una parada inmediata de los procesos y equipos pertinentes. Asimismo, el personal operativo puede activar de forma manual los procedimientos de parada en caso de emergencia, lo que supone un nivel de control adicional.

El componente principal de un sistema de electrólisis es la celda electrolítica (que contiene cátodo, ánodo, electrolitos y una fuente de corriente eléctrica continua). Por ejemplo, los electrolizadores PEM funcionan a presiones que van desde los 15 hasta los 30 bar y constan de los siguientes elementos:

- 1) Membrana/diafragma.
- 2) Capa catalizadora.
- 3) PTL (capas de transporte porosas).
- 4) Colector de corriente/campo de flujo (rejillas).



5) Placa bipolar.

Toda tecnología conlleva riesgos. Por lo tanto, la probabilidad de que un fallo en un componente provoque una fuga de hidrógeno no es cero, pero es poco probable. Para garantizar un correcto funcionamiento de los componentes del sistema y de los sistemas de alarma y seguridad (cuya función es activarse ante diferentes tipos de peligro), tanto los fabricantes como los integradores de sistemas deben llevar a cabo sus propios análisis y pruebas. Durante un funcionamiento normal del electrolizador, es crucial tener en cuenta múltiples riesgos que pueden originarse de diversas fuentes.

El siguiente párrafo detalla las posibles fuentes de riesgo, su descripción y las medidas de prevención y mitigación necesarias. Esto aplica a proyectos que contemplen la producción *in situ* de hidrógeno mediante electrólisis para cualquier fin (por ejemplo, industrial, de movilidad y residencial). Aunque el foco principal reside en la celda electrolítica, también se incluye a continuación la información sobre el BoP, ya que ambos forman parte de un sistema integrado (BoP + pila).

Tabla 6. Fallos, riesgos y medidas de prevención y mitigación para la pila de electrólisis

Origen del fallo	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
Variación de presión dentro del sistema	Los fallos que generan altas presiones pueden provocar roturas y fugas peligrosas.	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar las válvulas de seguridad de presión redundantes (PSV) diseñadas para los casos de salida bloqueada, exposición a incendios y expansión térmica. • Utilizar los discos de ruptura como un nivel de protección adicional, en paralelo con las PSV, en tuberías y depósitos críticos. • Asegurar que la descarga de las líneas de alivio se dirija a un conducto de ventilación vertical y elevado, equipado con un desempañador, una válvula de retención y un supresor de llamas en la salida.
El hidrógeno y el oxígeno entran en contacto, lo que crea una mezcla	En este caso, el riesgo proviene de un fallo del componente que separa los dos gases, es decir, la membrana. El paso de oxígeno e hidrógeno a través de la	<ul style="list-style-type: none"> • Garantizar el uso de sistemas de control de seguridad con válvulas de apagado automático de seguridad.

Origen del fallo	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
potencialmente explosiva	membrana, o incluso su rotura, pueden ocurrir durante ciertas fases transitorias (por ejemplo, el arranque del sistema). A pesar de que todos los sistemas de electrólisis tienen una selectividad de membrana específica, esta no es absoluta. Por ende, los efectos de la permeación pueden provocar combustión o explosiones dentro de la celda electrolítica, las tuberías y los sistemas de almacenamiento.	
Fuga de hidrógeno fuera del sistema	Se debe supervisar de forma continua el hidrógeno que se filtra al exterior del electrolizador, a la vez que se debe evitar el riesgo de explosión mediante ventilación forzada.	<ul style="list-style-type: none"> • Instalar sensores de H₂ y de O₂ con referencia al LEL ($\leq 25\%$ y $\geq 23\%$ vol., respectivamente). Las alarmas deben activarse al 10% del LEL, mientras que el sistema debe activar una parada forzada si el parámetro supera, por ejemplo, el $> 25\%$ del LEL. • Proporcionar ventilación forzada, que especifique los cambios de aire por hora necesarios.
Fugas de hidrógeno en los flujos de residuos del electrolizador y sistemas asociados (por ejemplo, secadores)	La fuga de hidrógeno al exterior del sistema de electrólisis también puede ocurrir a través de los puntos de drenaje y ventilación del secador, del electrolito y de las líneas de venteo. Cuando se elimina la fase líquida, el hidrógeno en estado gaseoso puede acumularse hasta alcanzar los límites de inflamabilidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que la zona de drenaje esté bien ventilada y alejada de fuentes de ignición. • Dimensionar y ubicar las líneas de ventilación de modo que el gas se disperse de forma segura a la atmósfera. • Los flujos de drenaje de electrolito también deben manejarse en áreas ventiladas. Asimismo, se deben utilizar herramientas que no produzcan chispas y eliminen los residuos cáusticos de

Origen del fallo	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
		acuerdo con la normativa de residuos peligrosos.
Cargas eléctricas/fuentes	Las cargas eléctricas que se acumulan en la superficie de un componente del electrolizador pueden actuar como una fuente de ignición.	<ul style="list-style-type: none"> • Emplear equipos aptos para zonas ATEX (es fundamental comprobar que todos los sistemas tengan el marcado CE).

A continuación, se detallan los diversos riesgos asociados a las posibles causas de fallo de los componentes del BoP que afectan a la seguridad, así como las medidas de prevención y mitigación aplicables.

Tabla 7. Riesgos asociados a los componentes del BoP de producción de hidrógeno que afectan a la seguridad, y medidas de prevención y mitigación aplicables

Componente del BoP	Posibles causas del fallo y riesgos asociados	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
Sistema de gestión del agua	Degradación o fallo de los componentes por la presencia de contaminantes, lo que da lugar a la liberación de gases o líquidos.	<ul style="list-style-type: none"> • La presencia de contaminantes de distinta naturaleza (por ejemplo, iones, sustancias orgánicas, partículas, etc.) puede deberse a un fallo en los sistemas de filtración, ósmosis inversa o desionización. La principal consecuencia de estos contaminantes es la degradación de las membranas. • El deterioro de los sistemas de gestión de la calidad del agua puede causar la filtración de contaminantes en el electrolizador o provocar fugas de gases o líquidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar la calidad del agua, como el carbono orgánico total (COT) para contaminantes orgánicos y conductividad para iones disueltos. • Contención secundaria en los tanques para prevenir el escape de agua y electrolitos de los depósitos y tuberías. • Proporcionar equipos de protección personal (PPE) y establecer procedimientos de seguridad para el

Componente del BoP	Posibles causas del fallo y riesgos asociados	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
		<ul style="list-style-type: none"> • Los fenómenos corrosivos también pueden afectar a los materiales de la pila, lo que aumenta el riesgo de fugas tanto de hidrógeno/oxígeno como del electrolito. 	<p>manejo de productos químicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalar sensores de nivel en tanques y depósitos que activen alarmas cuando los niveles superen o caigan por debajo de los límites establecidos.
<p>Sistema de suministro de energía, rectificadores y transformadores</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alteraciones en la red eléctrica. • Sobrecarga eléctrica. • Tamaño incorrecto. • Sobrecalentamiento, refrigeración deficiente. • Deterioro por antigüedad y degradación del aislamiento. • Conexiones corroídas. • Vibración, golpes mecánicos. <p>Todos los factores mencionados podrían provocar chispas, cortocircuitos y otros fenómenos eléctricos.</p>	<p>Los fallos mencionados pueden provocar descargas eléctricas, chispas u otros fenómenos similares. Aunque estos fenómenos representan un peligro para el personal que manipula los equipos, su mayor riesgo es que pueden causar un incendio o explosión, sobre todo en zonas ATEX.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contemplar la instalación de paneles para zonas no clasificadas o con el índice de protección requerido. • Establecer pruebas periódicas de aislamiento. • Garantizar una conexión a tierra y una unión equipotencial adecuadas.
<p>Recirculación de electrolitos, según corresponda</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminantes. • Microfugas. • Exceso de presión. • Mezcla de gases. <p>Todo lo expuesto puede provocar fugas de líquidos o gases.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El deterioro de la membrana puede contaminar el electrolito y la celda, lo que genera un aumento de la temperatura y la emisión de gases no deseados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Supervisar de forma continua y reemplazar el electrolito. A su vez, revisar los plazos de sustitución de filtros. • Verificar la existencia de

Componente del BoP	Posibles causas del fallo y riesgos asociados	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
		<ul style="list-style-type: none"> • Las microfugas pueden dar lugar a derrames de soluciones cáusticas que causen quemaduras. • El exceso de presión y una mezcla de gases no deseada pueden causar explosiones internas en la celda. 	<p>contención secundaria e instalar sensores de caudal/presión que activen alarmas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Comprobar que la parada automática funciona ante fugas de electrolito de las tuberías y cuando se activen los detectores de T/P. • Purga e inertización inmediatas en caso de mezcla de gases y una descarga controlada.
<p>Sistemas de purificación de gases</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Roturas. • Exceso de presión. • Mal funcionamiento del sistema de secado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las roturas pueden causar microfugas en los circuitos de gas (H₂/O₂) que pueden afectar la seguridad de las zonas ATEX. • El exceso de presión puede provocar la rotura de válvulas y bridas. • Un fallo en los secadores o en los sistemas de secado de gas puede dar lugar a la presencia de líquidos condensados que contengan hidrógeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Llevar a cabo inspecciones periódicas con el fin de detectar fugas. • Verificar que los componentes tengan un sellado con certificación (PED + ATEX). • Instalar válvulas de seguridad de presión (PSV). • Utilizar materiales resistentes a la fragilización. • Drenajes ventilados y procedimientos de purga controlada.

Se debe garantizar la seguridad durante el funcionamiento para proteger sus componentes. **Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo:**



- **Un mantenimiento periódico:** El mantenimiento planificado puede ser preventivo o predictivo e incluye la limpieza rutinaria de los componentes del electrolizador y, si procede, su reemplazo. Así se evita la contaminación por desgaste, corrosión o fallo de las piezas involucradas en el manejo de los gases y el agua/electrolito.
- **Protocolos de prueba:** Mediante análisis regulares de los gases almacenados se garantiza que estos cumplan con los requisitos de pureza exigidos antes de su uso o distribución.

4.4.2 Almacenamiento de hidrógeno comprimido para los sectores de la industria y de la movilidad

Si el proyecto de hidrógeno, tanto industrial como una estación de repostaje, incluye almacenamiento de hidrógeno, es fundamental que las partes interesadas consideren los siguientes riesgos y sus respectivas medidas de prevención y mitigación.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno son los componentes de la planta que suelen operar bajo las condiciones más exigentes de presión (por ejemplo, presiones de hasta 700 bares). Por esta razón, se construyen con múltiples materiales aptos para resistir los fenómenos de degradación típicos que podrían comprometer su integridad, así como la seguridad del personal y las instalaciones. El hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso, líquido o sólido (por ejemplo., hidruros metálicos). A continuación, se detallan los riesgos y las posibles medidas de prevención y mitigación para los sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido, la tecnología más común hoy en día.

Debido a sus propiedades fisicoquímicas y las condiciones de operación típicas de un sistema de almacenamiento (alta presión y larga vida útil esperada), el almacenamiento de hidrógeno presenta ciertos riesgos. **La siguiente tabla presenta los tres principales riesgos asociados al hidrógeno comprimido, que deben tenerse en cuenta si un proyecto de hidrógeno incluye un sistema de almacenamiento fijo o móvil (por ejemplo, bancos de botellas de hidrógeno).**

Tabla 8. Riesgos y medidas de prevención y mitigación en el almacenamiento de hidrógeno comprimido con fines industriales y de movilidad

Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
La fragilización de los metales por hidrógeno se debe a la permeabilidad de este gas. A altas presiones, la molécula (o el átomo tras la disociación) tiene un tamaño tan reducido que le permite penetrar en los intersticios de la red cristalina e incluso sustituir átomos en la estructura del metal. Como resultado, se debilitan los enlaces químicos y se comprometen las propiedades mecánicas, lo que causa la fragilización del material.	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar que las fichas técnicas que acompañan la documentación informen de forma explícita sobre el comportamiento de los metales utilizados frente a la fragilización por hidrógeno. • Si el entorno de las instalaciones requiere medidas de seguridad adicionales, es necesario pensar en modificar el diseño de los componentes para prevenir la

Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
	<p>generación de nuevas fuentes de ignición o fallos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incluir medidas a prueba de fallos como sistemas de parada automática, sistemas de venteo, ventilación y barreras físicas para proteger al personal y los equipos cercanos en caso de ignición.
<p>Agrietamiento provocado por hidrógeno: El hidrógeno tiene la capacidad de amplificar los defectos o grietas del material, sobre todo cuando está en líquidos que entran en contacto con la superficie y luego se difunden en ella.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La corrosión se puede prevenir con inspecciones y pruebas mediante métodos como la inspección por partículas magnéticas fluorescentes húmedas (WFMP) y los ensayos por ultrasonidos, entre otros. Estos métodos también pueden aplicarse <i>in situ</i>.
<p>Corrosión por hidrógeno a alta temperatura: El hidrógeno a alta presión y temperatura, sobre todo por encima de 200 °C, reacciona de forma agresiva con los materiales. Penetra su estructura y, en contacto con las impurezas, forma gases como el metano. A medida que estos gases se propagan, provocan la aparición de poros y otros defectos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es fundamental utilizar aleaciones metálicas que cumplan con la norma API RP 941 - <i>Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures</i>. • El control preventivo se apoya en inspecciones regulares de la superficie y en métodos de ensayo específicos, que también se pueden llevar a cabo <i>in situ</i>, como ensayos por ultrasonidos <i>phased array</i> (PAUT), difracción de tiempo de vuelo (ToFD) y método de captura total/enfoque total (FMC/TFM).

4.4.3 Estaciones de repostaje de hidrógeno (HRS)

Las estaciones de repostaje de hidrógeno (HRS) son instalaciones donde coexisten múltiples tecnologías de este gas en áreas adyacentes. Por lo tanto, **es fundamental que se apliquen las medidas de prevención y mitigación descritas para las tecnologías de producción y almacenamiento, dado que estas son parte integral de la estación y sus posibles escenarios de riesgo.**

El modelo HYPOP ofrece una metodología de seguridad general que puede implementarse, por ejemplo, en:

- HRS con producción *in situ*.
- HRS sin producción *in situ*.



- HRS estándar con almacenamiento fijo o móvil (por ejemplo, paquetes de hidrógeno o remolques cisterna).
- HRS móvil con almacenamiento integrado.

Los siguientes pilares describen las pautas generales a seguir para garantizar la seguridad de un proyecto de estación de repostaje de hidrógeno. En términos generales, estos pasos son aplicables a los diferentes casos mencionados. No obstante, el nivel de atención depende de la cantidad de elementos peligrosos presentes y el entorno del emplazamiento. **Por ello, los diseños de gestión de seguridad más complejos –como las HRS con electrólisis *in situ* o las soluciones en contenedores/móviles– requieren un mayor rigor y documentación técnica detallada por parte de los proveedores (por ejemplo, análisis de riesgos, protocolos de seguridad y mantenimiento, etc.) a fin de respaldar el diseño.** En cualquier caso, los criterios de seguridad básicos figuran en Tabla 9.

Si hay electrolizadores o sistemas de almacenamiento, véanse las secciones 4.4.1 y 4.4.2.

Diseño de ingeniería y obstáculos generales

El sistema debe contar con un diseño abierto y modular con el fin de garantizar la seguridad.

En la siguiente tabla, encontraremos una síntesis que considera la interrelación funcional y física de los diversos componentes de una estación de repostaje de hidrógeno. Para obtener más información sobre tecnologías individuales (por ejemplo, electrolizadores o sistemas de almacenamiento), véanse las secciones 4.4.1 y 4.4.2, aplicables a las HRS con producción *in situ* y con almacenamiento móvil/fijo.

Tabla 9. Posibles fallos y medidas de detección y seguridad para los componentes de las HRS

Componente de la HRS afectado	Posible fallo	Medidas de detección y seguridad
Producción (más detalles sobre el electrolizador y el BoP en la Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente)	<ul style="list-style-type: none"> • Presión y sobrecalentamiento del módulo fuera de los rangos deseados a causa de cargas eléctricas. • Contaminantes generados por fallos en el sistema de gestión del agua. • Fugas menores de H₂. • Mezcla de gases no deseada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Instalar sensores de H₂, presión y temperatura con puntos de ajuste de seguridad, así como sistemas de parada y aislamiento automáticos de la unidad. • Utilizar sistemas de monitoreo de la calidad del agua, contención secundaria en depósitos, PPE y sensores de nivel en los depósitos. • Garantizar una ventilación natural o forzada eficaz.

Componente de la HRS afectado	Posible fallo	Medidas de detección y seguridad
		<ul style="list-style-type: none"> • Llevar a cabo inspecciones programadas y tareas de mantenimiento preventivo. • Formar al personal operativo para que sepan reconocer anomalías.
<p>Gas a alta presión (para más información sobre fallos de material en el almacenamiento, véase Tabla 8, también aplicable a los compresores)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Presión excesiva en la línea. • Fugas en accesorios/válvulas. • Sobrecalentamiento del compresor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorizar la presión y temperatura. • Instalar válvulas de alivio de presión hacia una zona segura. • Activar parada automática del compresor. • Métodos de detección de fugas de H₂. • Ventilar y enfriar desde fuera si es posible. • Llevar a cabo tareas de mantenimiento preventivo.
<p>Dispensador (repostaje de vehículos)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga en el acoplamiento. • Uso indebido por parte del usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> • Llevar a cabo comprobaciones funcionales previas al repostaje. • Instalar detectores locales de H₂. • Activar parada inmediata y purga en caso de fuga. • Utilizar instrucciones de uso orientativas. • Controlar el acceso a usuarios autorizados.
<p>Sistemas eléctricos y de control de la instalación y sus componentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes de ignición en zona clasificada. • Fallo del sistema de seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar equipos con certificación ATEX. • Separar físicamente los paneles. • Ejecutar diagnósticos y autodiagnósticos. • Activar parada selectiva y aislamiento de circuitos defectuosos. • Llevar a cabo inspecciones periódicas y pruebas funcionales.



Componente de la HRS afectado	Posible fallo	Medidas de detección y seguridad
		<ul style="list-style-type: none"> • Documentar la gestión del cambio.
Superficie total y personas (usuarios y personal)	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso no autorizado. • Respuesta tardía. • Coordinación deficiente en situaciones de emergencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cercar el recinto y controlar el acceso. • Actualizar y publicar los procedimientos de emergencia. • Hacer simulacros periódicos con el cuerpo de bomberos. • Implementar un sistema de control remoto y registro de sucesos. • Ofrecer formación continua y cualificada. • Revisar de forma continua las lecciones aprendidas.

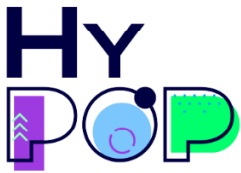
La seguridad de las HRS se garantiza no solo con el diseño, sino también con la integración de barreras en la planta. Estas barreras deben mantener distancias de seguridad internas específicas: electrólisis → compresión → almacenamiento → dispensador.

Tipos de barreras:

- **Pasivas (utilizadas cuando lo justifica el QRA):** Muros de hormigón armado, muros de contención de explosiones, vallas para impedir el acceso de personal no cualificado/no autorizado, etc.
- **Activas:** Sistemas que se activan de forma automática cuando se exceden los parámetros de control, como sensores de temperatura/presión/caudal con lógica de cierre, detección de gas y llama en áreas de compresión y almacenamiento, válvulas de cierre rápido (ESD) y líneas de despresurización hacia un punto de ventilación elevado para favorecer la dispersión vertical.
- **Continuas:** Sistemas que funcionan constantemente para mantener las condiciones dentro de unos límites seguros, como los sistemas de ventilación que evitan atmósferas explosivas.

4.4.4 Pilas de combustible para los sectores energético y residencial

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que, al igual que las baterías, suministran energía eléctrica para una variedad de aplicaciones, desde vehículos hasta usos estacionarios en los sectores energético y residencial. Su funcionamiento depende del



suministro continuo de hidrógeno (o combustibles ricos en hidrógeno) y hasta que sus componentes alcanzan el final de su vida útil.

Hay varios tipos de pilas de combustibles que funcionan a diferentes temperaturas, utilizan diferentes materiales y tienen diferentes fines. Se pueden distinguir por la naturaleza del electrolito –líquido (ácido o alcalino) o sólido– y por sus temperaturas de funcionamiento.

Como sucede con otras tecnologías de hidrógeno, un proyecto que incluya una pila de combustible para suministro eléctrico en entornos industriales, energéticos o residenciales debe considerar los riesgos químicos. Dado que algunas pilas de combustible utilizan electrolitos que contienen agentes corrosivos o irritantes, un daño en ésta podría suponer un peligro para la salud. Sin embargo, en un sistema cerrado y en buen estado, la probabilidad de fuga de estas sustancias es por lo general baja.

La siguiente tabla recoge los principales tipos de pilas de combustible.

Tabla 10. Tipos y aplicaciones de pilas de combustible (información didáctica complementaria⁹)

Pila de combustible	Tipo de electrolito	Temperatura de funcionamiento	Aplicaciones
Membrana polimérica electrolítica (PEMFC)	Polímero a base de fluorocarbono (sólido)	60-90 °C	Móvil/Estacionaria
Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)	Película de ácido fosfórico en una matriz de fluorocarbono (líquido)	>150 °C	Generación de energía estacionaria y sistemas de microgeneración (CHP) residencial
Pilas de combustible alcalinas (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio (líquido)	100 < T < 250 °C	Movilidad
Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC)	Cerámica conductora (sólida)	600 < T < 1000 °C	Estacionarias de Power-to-X
Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC)	Litio fundido y carbonatos de sodio/potasio en una matriz	600 < T < 1000 °C	Estacionarias e industriales

La siguiente tabla presenta los escenarios de riesgo y las medidas de prevención y mitigación que deben tenerse en cuenta, o buscarse específicamente, al revisar el enfoque de seguridad propuesto por el promotor de un proyecto que lo presenta ante una autoridad pública.

⁹ <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/learn-about-hydrogen/education-materials/hydrogen-basics>

Tabla 11. Riesgos y medidas de prevención y mitigación para los sistemas de pilas de combustible en el sector energético y residencial

Origen del fallo	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
Fugas de H₂	El hidrógeno puede escapar a través de microfugas o fallos en las juntas o líneas. Si se acumula en espacios cerrados, puede provocar un incendio o explosión.	<p>Asegurar que el diseño incluya:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Detectores de gas + ventilación forzada. • Certificación de estanqueidad de tuberías, bridas y accesorios (ATEX/IECEX). <p>Los procedimientos de mantenimiento deben incluir la inertización y purga antes de la intervención.</p>
Liberaciones de oxidantes (O₂ o aire comprimido)	Al igual que con las fugas generales, un incremento local en la concentración de O ₂ puede aumentar la probabilidad de incendio.	<ul style="list-style-type: none"> • Tuberías y válvulas de sobrepresión redundantes. • Respetar las distancias de separación respecto a materiales combustibles.
Sobrecalentamiento y superficies calientes	Un mal funcionamiento puede provocar que algunas áreas o superficies alcancen temperaturas que causen quemaduras o vapores nocivos (por ejemplo, > 120 °C para PEM y hasta 800 °C para SOFC).	<ul style="list-style-type: none"> • Proporcionar aislamiento térmico y blindaje. • Verificar los termostatos/fusibles y el sistema de parada automática cuando se superen las temperaturas de seguridad predeterminadas.
Sobrepresión en las chimeneas o en los recipientes de gas o líquido	Válvulas bloqueadas, formación de hielo en componentes/líneas o reacciones incontroladas pueden causar sobrepresión y rotura mecánica.	<p>El diseño de la planta debe incluir:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Discos de ruptura calibrados y dispositivos de alivio de presión (PRD). • Monitoreo continuo de presión y temperatura (P/T) con lógica de control para detectar anomalías y activar el sistema de parada. • Conductos de purga seguros con ventilación al exterior.

Origen del fallo	Descripción del riesgo	Medidas de prevención y mitigación
		<ul style="list-style-type: none"> • Para la formación de hielo, comprobar que se proporciona control térmico y de humedad.
Peligro eléctrico (baja y alta tensión)	Riesgo de descarga eléctrica, arco eléctrico y cortocircuitos, en particular en pilas de alta potencia.	Comprobar: <ul style="list-style-type: none"> • Cajas IPxxB e interruptores de seguridad. • Interruptores diferenciales (GFCI) que se activan con fallos de conexión a tierra en mA, de forma que previene descargas eléctricas e incendios. • Pruebas periódicas de aislamiento en cables, bobinados y equipos.
Compatibilidad de los materiales a la permeación de H₂	El uso de aceros inadecuados aumenta el riesgo de fragilización por hidrógeno en aleaciones de alta resistencia.	<ul style="list-style-type: none"> • Asegurar que las aleaciones metálicas sean resistentes, como el acero inoxidable 316L (a base de Fe-Cr-Ni), el Inconel (superaleaciones de Ni-Cr) y el Hastelloy (superaleaciones de Ni-Mo o Ni-Cr-Mo).

El proyecto HYPOP ha demostrado, a través de la colaboración con partes interesadas y el análisis de mejores prácticas, que **las aplicaciones de hidrógeno en el sector residencial aún no se han consolidado en Europa. Por ello, la información disponible es insuficiente a la hora de establecer un plan de seguridad base para estos contextos, como se hizo con las HRS. El avance del hidrógeno como recurso de equilibrio en el consumo doméstico requiere más proyectos de demostración y un mejor intercambio de información.**

Sin embargo, gracias a las conversaciones con expertos del sector y el intercambio de experiencias en HYPOP, pudimos definir un plan de seguridad general, que se basa en una de las mejores prácticas que figuran en los informes 2.1 y 2.2.

Se adoptó este método al considerar la instalación de un sistema rSOC (pila de óxido sólido reversible) que puede funcionar en modo SOEC (para almacenar excedentes de electricidad mediante la producción de hidrógeno) y en modo SOFC (para generar electricidad y calor útil).

Enfoque metodológico de seguridad



El método de gestión de riesgos debe basarse en la lógica HAZOP de desviación-causa-consecuencia-salvaguarda:

1. Identificación sistemática de desvíos operativos.
2. Análisis de las causas (fallos de los equipos, accionamientos no deseados de las válvulas, errores humanos).
3. Evaluación de las consecuencias sin tener en cuenta las medidas de protección existentes (exceso de presión, fuga de H₂, incendio/explosión).
4. Listado de medidas de seguridad existentes: Válvulas de seguridad de presión (PSV), bloqueos, detectores de H₂, ventilación y componentes con clasificación EX.
5. Recomendaciones adicionales cuando el riesgo residual supera los umbrales aceptables.

Los ejemplos de eventos críticos que deben examinarse para este tipo de aplicación deben ser:

- **E1 - Compresor con descarga bloqueada:** Este riesgo de exceso de presión y fuga de H₂ se mitiga con PSV que ventilan a un área segura. También se pueden incluir enclavamientos por presión, detectores de gas H₂ (programados al 10 % del LEL para activar la ventilación forzada y una alarma) y un sistema de despresurización automática con ventilación de seguridad.
- **E2 - Fallo en la refrigeración:** Riesgo de sobrecalentamiento del compresor, daño de la membrana y fuga de H₂ (interna o externa). Se previene mediante sensores de temperatura y flujo (con puntos de activación), componentes con clasificación EX (Zona 2) y detectores de H₂.
- **E3 - Entrada de aire (baja presión):** Riesgo de formación de mezclas inflamables en el almacenamiento de alta presión. Como medidas de mitigación, tenemos la activación de parada automática por baja presión y el uso de compresores en un recinto con clasificación REI Grado I.
- **E4 - Fugas menores (conexiones):** Riesgo de liberación local de H₂. Se previene mediante detectores de gas, ventilación forzada, alarma y componentes de Zona 2 (EX).

Medidas transversales

Ventilación natural de alto nivel, detección de gas (con un umbral de alarma al 10 % del LEL), parada selectiva, ventilación forzada automática, válvulas de ventilación de accionamiento remoto, alarmas ópticas/acústicas, equipos con certificación EX en Zona 2 y sistemas de despresurización rápida.

5 Metodologías de evaluación de riesgos

Tabla 12. QUÉ, POR QUÉ y CUÁNDO es importante el análisis de riesgo en los proyectos de H₂

<p>¿QUÉ?</p> <p>Los análisis de riesgos son herramientas metodológicas que se basan en conocimientos técnicos y modelos predictivos. El objetivo es prevenir o mitigar fallos que podrían comprometer la integridad del personal o de activos.</p>
<p>¿POR QUÉ?</p> <p>La seguridad de los componentes puede verse comprometida por fallos de funcionamiento o acontecimientos externos, lo que podría desencadenar efectos en cadena en las actividades económicas y las zonas públicas cercanas. La incertidumbre derivada de la falta de conocimiento y de una regulación ambigua a menudo fomenta la filosofía de «cuanto más estricto, más seguro». Esto puede ralentizar la innovación y hacer que los proyectos sean inviables desde un punto de vista técnico y económico. Por esta razón, se utilizan diversos métodos a la hora de analizar los riesgos que conllevan los eventos accidentales con diferentes probabilidades y niveles de gravedad. Por ello, el análisis de riesgos se convierte en una herramienta clave que puede utilizarse en múltiples etapas de un proyecto de hidrógeno.</p>
<p>¿CUÁNDO?</p> <p>Los principales métodos de análisis se dividen en dos grandes categorías: técnicas cualitativas y cuantitativas.</p> <p>Los análisis de riesgos cualitativos se utilizan en las fases iniciales de un proyecto para detectar con rapidez peligros evidentes cuando no hay datos técnicos detallados. También sirven para establecer distancias de separación provisionales. En cambio, las técnicas cuantitativas usan datos numéricos —como tasas de fallo, probabilidad de ignición, estadísticas climáticas, información sobre la población y modelos validados— con el objetivo de ajustar y fundamentar el diseño de seguridad.</p>

A continuación, se expone un breve resumen de los principales análisis de riesgos identificados en el proyecto HYPOP a partir de las mejores prácticas, recogidas en el informe 2.1, y de los diálogos con diversas partes interesadas y de proyectos de hidrógeno europeos.

Tabla 13. Análisis de riesgos cualitativos y cuantitativos identificados a partir de las mejores prácticas HYPOP

<p>Técnicas cualitativas</p>
<p>HAZOP (Estudio de riesgos y operabilidad)</p> <p>Esta técnica sistemática analiza cada elemento (o nodo) para describir las consecuencias de un fallo. Identifica las desviaciones y sus causas (con palabras guía como, por ejemplo, «no/sin», «más», «menos», «así como») y las asocia a parámetros de proceso (caudal, presión, temperatura), y propone las acciones correctivas necesarias.</p>



HADIZ (Identificación de peligros) El objetivo de este ejercicio de equipo multidisciplinar es identificar posibles peligros a lo largo de todas las fases del proyecto: diseño, construcción, instalación, desmantelamiento y cambios propuestos en las operaciones existentes. Se suele utilizar como un paso previo o como parte de los análisis de riesgo cuantitativos.
Análisis de hipótesis Este enfoque explora los posibles peligros y las causas de fallo mediante preguntas hipotéticas de tipo «¿Qué pasaría si...?». A su vez, evalúa las posibles consecuencias de cada escenario.
Análisis modal de fallos y efectos (FMEA) Este método semicuantitativo enumera los posibles modos de fallo de un proceso o componente y sus efectos. Normalmente, de forma individual y sin considerar fallos simultáneos. A cada fallo se le asigna un número de prioridad de riesgo en función de su severidad, frecuencia y detectabilidad. Así, se pueden priorizar las acciones para resolver primero los problemas más críticos.
Técnicas cuantitativas
Análisis cuantitativo de riesgos (QRA) Un análisis en profundidad que combina los resultados del árbol de fallos con herramientas de modelización para cuantificar el riesgo global de una instalación o proceso de hidrógeno, lo que incluye la frecuencia de fallos, las probabilidades de ignición y las consecuencias.
Análisis de árbol de fallos (FTA) Método gráfico que mapea los eventos principales no deseados y las combinaciones de eventos básicos que conducen a ellos, asignando probabilidades para estimar la probabilidad de fallo.

Para obtener más información acerca de las técnicas cualitativas, semicuantitativas y cuantitativas, véase la guía de ingeniería de seguridad de hidrógeno de EHSP, un documento de la Empresa Común para un Hidrógeno Limpio¹⁰.

¹⁰ <https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2023-05/EHSP%20Guidance%20on%20Hydrogen%20Safety%20Engineering%20-%20v1-Final.pdf>



6 Recomendaciones y medidas HYPOP para acelerar los procedimientos de aprobación y seguridad

En el marco del proyecto HYPOP, se constató que **la evaluación de cualquier proyecto de hidrógeno debe considerar múltiples factores, como el lugar de instalación, el entorno que rodea el perímetro de la planta y el marco normativo nacional y local.** Por lo tanto, es fundamental contar con una guía de seguridad que combine un enfoque claro con la flexibilidad necesaria para adaptarse a los requisitos y obstáculos de cada país y aplicación en la UE. Dicha guía actuará como un catalizador para acelerar la aprobación y el desarrollo de los proyectos de hidrógeno. También incentivará a los grupos de interés en países donde el sector del hidrógeno –en sus aplicaciones industriales, de movilidad y residenciales– está menos avanzado a nivel práctico y normativo. Para obtener más detalles acerca de las mejores prácticas, los requisitos y los obstáculos normativos de varios países europeos que se utilizaron para elaborar estas directrices, véanse el anexo de este documento y el informe 2.1.

A continuación, podemos ver un resumen de las principales problemáticas, las acciones prácticas y las recomendaciones, así como los beneficios de afrontarlas. A su vez, HYPOP plantea un protocolo estándar (Directrices de seguridad HYPOP) que busca facilitar el diálogo entre las autoridades públicas y los diseñadores. De esta forma, los diseñadores podrán presentar proyectos de hidrógeno con una filosofía de seguridad común, entendible y que cuente con la aceptación de las autoridades públicas y de la ciudadanía en el menor tiempo posible.

Tabla 14. Acciones prácticas/recomendables del proyecto HYPOP y beneficios previstos

Problema	Acciones prácticas/recomendaciones	Beneficio previsto
Vacíos legales o interpretaciones divergentes (incluso entre regiones u oficinas locales).	Recopilación de prácticas equivalentes (elaborada en colaboración con autoridades y personal operativo).	<ul style="list-style-type: none"> • Uniformidad de la línea de base. • Menos discrecionalidad.
Escasa experiencia práctica de las autoridades en materia de estándares técnicos, métodos de análisis y aspectos específicos del hidrógeno.	Formación modular (jurídica/técnica/social) para funcionarios y cuerpos de bomberos.	<ul style="list-style-type: none"> • Decisiones más rápidas y mejor fundamentadas.
Uso indebido y dependencia excesiva de regulaciones diseñadas para otros combustibles (gas natural o GLP) que no siempre se ajustan a las características del hidrógeno.	Fichas comparativas de propiedades + guía de adaptación.	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar el sobredimensionamiento injustificado.



Problema	Acciones prácticas/recomendaciones	Beneficio previsto
Aplicación parcial e irregular de los requisitos de la directiva SEVESO en plantas pequeñas por debajo del umbral de riesgo, lo que genera confusión.	Respetar los principios generales de seguridad (para casos por debajo del umbral según la directiva SEVESO) + lista de verificación basada en el riesgo.	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento uniforme de plantas pequeñas.
Los procesos iterativos y lentos provocan retrasos debido a las solicitudes de datos <i>ad hoc</i> y a los ciclos de aclaración no estructurados.	Consulta previa oficial o reunión de alcance antes de presentar el proyecto.	<ul style="list-style-type: none"> • Menos solicitudes de integración posteriores.
Desconfianza pública.	Participación inmediata en sesiones de preguntas y respuestas con un mapa de riesgos más sencillo.	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor aceptación por parte de la comunidad y menos objeciones.

Las **directrices de seguridad HYPOP** se crearon con el apoyo de las diversas partes interesadas y se estructuraron como un método basado en pasos. Cada paso incluye la identificación de errores y riesgos, recomendaciones y acciones prácticas. La información técnica sobre la seguridad del hidrógeno, sus tecnologías y las medidas de prevención y mitigación que se describen en este informe son cruciales para gestionar de forma efectiva los siguientes seis pasos (en particular los pasos 2, 3 y 4).

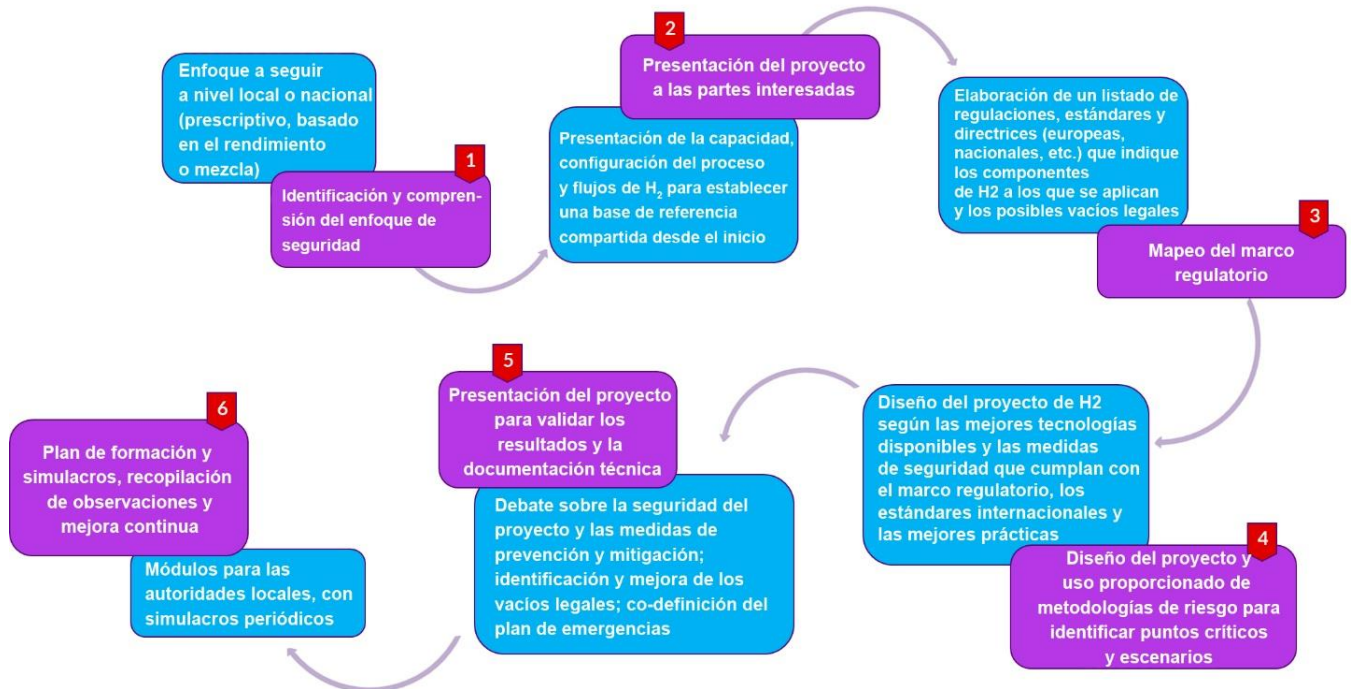


Imagen 1. Directrices de seguridad HYPOP

1) El primer paso es identificar y entender el enfoque de seguridad general a nivel nacional o local, ya sea prescriptivo o basado en el rendimiento.

En muchas ocasiones, los proyectos de hidrógeno en los sectores de la movilidad y residencial se gestionan como proyectos industriales, por lo que se les aplican los mismos requisitos y metodologías. Si no existen directrices claras ni experiencia previa, se recomienda buscar referencias en otros países o adaptar regulaciones de combustibles más comunes. Con toda esta información, ya se puede determinar el enfoque de seguridad más apropiado.

Los casos de estudio analizados en el marco del proyecto HYPOP mostraron que se pueden aplicar dos tipos de enfoques de seguridad, ya sea como alternativas o de forma complementaria:

- **Enfoque prescriptivo:** Establece reglas fijas (véanse algunos ejemplos a continuación). Se suelen encontrar normativas consolidadas o de normas redactadas originalmente para otros combustibles (gas natural, GLP) y luego «adaptadas» al hidrógeno. Las normas técnicas internacionales pasan a formar parte efectiva del conjunto normativo una vez que se transponen a leyes o decretos.

Ejemplos de requisitos prescriptivos comunes

- Distancias mínimas entre las tecnologías de hidrógeno (sobre todo la producción de este gas y el almacenamiento a alta presión) y los límites del emplazamiento.
- Límites de presión o capacidad para activar niveles de protección pasiva.



- Especificación de equipos certificados en zonas peligrosas clasificadas (ATEX).
- **Enfoque basado en el rendimiento:** Define el objetivo de seguridad deseado (es decir, el nivel de riesgo aceptable) y permite flexibilidad en la forma de alcanzarlo. En este caso, se utilizan los análisis de riesgos para identificar los escenarios más críticos y guiar las decisiones sobre la distribución de la planta, las medidas preventivas y procedimientos.

Ejemplos de requisitos típicos basados en el rendimiento

- Distancias de seguridad calculadas mediante herramientas de modelización y simulación.
- Uso de normas internacionales para equipos, operaciones y tareas de mantenimiento.
- Empleo de medidas y materiales de prevención y mitigación si así lo exigen las características específicas del emplazamiento de la instalación o los resultados de las evaluaciones de riesgos.
- Optimización de la distribución mediante simulaciones CFD para reducir las áreas de acumulación o estancamiento.

En la práctica, ambos enfoques **coexisten**. El proyecto HYPOP identificó que, cuando las normas son claras, se aplican los requisitos establecidos en las tablas, y cuando hay lagunas o casos innovadores, se utiliza un enfoque basado en el rendimiento para demostrar un nivel de seguridad equivalente.

Tabla 15. Fortalezas y limitaciones de los enfoques prescriptivos y basados en el rendimiento

Aspecto	Enfoque prescriptivo	Enfoque basado en el rendimiento
Velocidad de la toma de decisiones	Rápida si el caso es «estándar», análisis limitado a ciertas tecnologías H ₂ .	Más lenta, ya que siempre se necesita analizar toda la planta.
Flexibilidad en la innovación	Baja (restricciones rígidas).	Alta (adaptable a nuevas tecnologías).
Transparencia frente a las autoridades locales	Alta (reglas sencillas).	Depende de la calidad del informe de riesgos y requiere conocimientos técnicos.
Riesgo de exceso de ingeniería	Medio/alto.	Controlable (medidas de protección adaptadas al riesgo real).

Entender este enfoque es esencial para saber cómo abordarán las autoridades nacionales o locales un proyecto de hidrógeno.



2) Presentación del proyecto a las partes interesadas públicas

El segundo paso consiste en una presentación resumida (propósito, capacidad, configuración del proceso, flujos de H₂, perfil del usuario) para establecer una base común desde el principio.

Es crucial que las autoridades públicas participen desde el inicio, cuando se definen el tipo de planta, las tecnologías y la ubicación. Se deben abordar de antemano tanto los riesgos técnicos (por ejemplo, disponibilidad de agua o proximidad a instalaciones con sustancias peligrosas o a zonas urbanas que impongan restricciones de construcción o requieran medidas preventivas/mitigantes adicionales, etc.) como los problemas de aceptación de la comunidad y las autoridades locales (por ejemplo, seguridad contra incendios o protección del medioambiente, etc.).

Tabla 16. Ventajas de presentar el proyecto a las autoridades públicas en una fase temprana

Riesgos/problemas a resolver	Beneficios derivados de la intervención
Falta de información y conocimiento técnico del hidrógeno en las autoridades locales y la ciudadanía.	La población conoce y está al tanto de las oportunidades locales y de la importancia de las actividades locales para la sostenibilidad.
Oposición a un proyecto presentado tarde. No hacer una presentación previa antes de enviar la solicitud a las autoridades competentes puede suponer un riesgo.	Obtener opiniones iniciales de las autoridades locales, incluso si el proyecto cumple con la legislación vigente, puede agilizar todo el proceso y evitar retrasos o problemas en las fases posteriores.
Dificultad para interpretar las normativas o falta de conocimiento del marco normativo vigente.	Las autoridades adoptan medidas preventivas, ya que recopilan información y sugieren normativas que deben tenerse en cuenta, lo cual es esencial en caso de que existan lagunas normativas.

La presentación del proyecto es solo el inicio del proceso con las autoridades. Posteriormente, deben celebrarse más reuniones de seguimiento en las que se detallen la filosofía y las medidas de seguridad que se van a proponer.

3) Mapeo del marco regulatorio (probablemente también en paralelo con el paso 2)

Consiste en elaborar una tabla que recoja las regulaciones, estándares y directrices (de la UE, nacionales, locales e internacionales voluntarias) aplicables a cada componente y que indique cualquier vacío legal.

Se recomienda estudiar a fondo la normativa existente. En la mayoría de los países europeos, existen lagunas y ambigüedades interpretativas. En el peor de los casos, el hidrógeno ni siquiera se menciona en las normativas que ponen en práctica los documentos estratégicos nacionales y locales. No obstante, es posible que existan documentos complementarios que las autoridades públicas consideren casi oficiales. Estos reúnen los requisitos y especifican la documentación necesaria para el uso de hidrógeno en los sectores industrial, de movilidad y residencial. Si este recurso no está disponible, se recomienda que las partes interesadas se



pongan en contacto con las autoridades públicas para formar grupos de trabajo que elaboren un documento equivalente. El proyecto HYPOP constató que las directrices de seguridad ofrecen los siguientes beneficios:

- **Claridad:** Identifican los puntos críticos, definen las funciones de las autoridades y cubren los vacíos legales.
- **Alcance:** Son herramientas accesibles para captar el interés y llegar a un público más amplio.
- **Confianza:** Al mostrar las mejores prácticas en la UE, fomentan la confianza y conciencian a las autoridades locales.
- **Cooperación:** Su desarrollo fomenta la colaboración entre las partes interesadas y las autoridades, ya que su elaboración requiere consenso y trabajo en equipo.

Beneficio principal: Fortalece la relación con las autoridades públicas, genera confianza, hace visibles los vacíos legales, los requisitos obligatorios y los problemas de interpretación. Para obtener más información y ejemplos de las directrices revisadas en el marco del proyecto HYPOP, véanse el anexo de este documento y el informe 2.1.

4) **Diseño técnico-económico del proyecto y uso adecuado de metodologías de riesgo para identificar puntos críticos y escenarios**

El diseño de proyectos de hidrógeno debe basarse en las mejores tecnologías disponibles y en medidas de seguridad que cumplan con las normativas, los estándares internacionales y las mejores prácticas.

No se requiere un análisis cuantitativo de riesgos (QRA) completo en todos los proyectos, ya que este es el nivel más complejo que identificó HYPOP. En cambio, es mejor optar por un enfoque proporcional que evite costes innecesarios y garantice la credibilidad del proyecto:

- **Análisis cualitativo estructurado** (HazID + matriz de riesgos) como base mínima.
- **Análisis semicuantitativo** (es decir, un enfoque intermedio entre el cualitativo y el cuantitativo, tal y como se detalla en la sección 5) si la decisión sigue sin ser clara o aparecen escenarios de riesgo moderado.
- **Solo se necesitará un QRA completo en las siguientes situaciones:**
 - Diseño de planta denso o con poco espacio.
 - Presencia de equipos de alta presión.
 - Solicitud de excepción a las distancias de seguridad establecidas por la normativa.
 - Proximidad a edificios públicos o zonas concurridas.
 - Riesgos acumulativos o potencial de efecto dominó.

5) **Presentación del proyecto para validar los resultados de la primera reunión y la documentación técnica**



El objetivo de este paso es analizar la seguridad del proyecto y las medidas de prevención y mitigación, identificación y mejora de las lagunas normativas y definición conjunta del plan de respuesta a emergencias.

El debate entre las autoridades y los diseñadores debe basarse, como mínimo, en el siguiente conjunto de documentos (cuyas abreviaturas se deben a las siglas en inglés): diagrama de flujo del proceso (PFD), diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), diseño de la planta y clasificación ATEX. Otros ejemplos son la matriz de escenarios, el informe de riesgos, la lógica del sistema de parada de emergencia (ESD), la metodología de detección y la justificación de las distancias de seguridad.

Si el proyecto se valida, es posible que se **soliciten medidas de seguridad adicionales definidas en conjunto**, si fueran necesarias. De ser así, se podría solicitar más información sobre la monitorización, los sistemas de detección de parámetros de seguridad e instrumentos relacionados y el nivel de ventilación. Asimismo, se podrían exigir **barreras adicionales**, como muros de contención, si el proyecto se sitúa cerca de zonas sensibles o de edificios públicos de gran afluencia.

En esta fase, las autoridades tienen la oportunidad de plantear preguntas, debatir y recopilar información de los diseñadores sobre posibles vacíos legales. De esta forma, pueden ampliar sus conocimientos acerca del proyecto y elaborar futuras regulaciones más efectivas.

Es importante que las autoridades **validen o colaboren en la creación del plan de emergencias**.

6) Plan de capacitación y simulacros, recopilación de observaciones y mejora continua

Se sugiere implementar módulos de capacitación para las autoridades locales que aborden las propiedades físicas del H₂, sus diferencias respecto a otros combustibles (gas natural y GLP) y la seguridad de las tecnologías del hidrógeno. Además, hacer simulacros periódicos para fugas, parada de emergencia o incendios en las proximidades.

Cuando sea necesario, se recomienda desarrollar un plan de formación que, mediante la difusión de conocimientos, también tenga un impacto positivo en los procedimientos de concesión de permisos en general. Asimismo, permite preparar al personal y probar con regularidad los procedimientos y sistemas (detección, evacuación, etc.) y crea un ciclo de mejora continua, basado en la experiencia y observaciones reales. Los resultados pueden medirse mediante indicadores como el tiempo promedio de respuesta a solicitudes de información, el tiempo total del proceso hasta obtener el permiso, el tiempo de respuesta ante emergencias o la revisión anual conjunta de la operación, mantenimiento y fallos.

Los pasos 5 y 6 están destinados a esta fase de transición, en la que el hidrógeno y las tecnologías del hidrógeno se utilizarán en sectores emergentes y en aquellos casos en los que haya pocos conocimientos prácticos sobre proyectos de hidrógeno y un bajo nivel de concienciación. A medida que los países de la UE dispongan de más información práctica, se logrará una mayor convergencia y un enfoque más armonizado en las normas de seguridad de las plantas. Por lo tanto, estos pasos deben aplicarse solo si se consideran necesarios, ya que de lo contrario pueden llevar a consultas reiteradas y a un aumento en los costes del proyecto.

7 Metodología

El proyecto HYPOP se basa en la participación de las partes interesadas. La información que contribuyó a las directrices finales de seguridad para los equipos de emergencia se recopiló a partir de los resultados de los talleres nacionales HYPOP y se aplicó la misma metodología utilizada para recopilar información para el análisis técnico de los requisitos y barreras de seguridad del paquete de trabajo 2.

Los talleres nacionales se llevaron a cabo en España, Italia, Bélgica, Polonia y Bulgaria, cuyos resultados pueden consultarse en el anexo de este documento. Los datos se recopilaron principalmente con herramientas en línea (como Google Forms, Slido) y en Italia y Bélgica se complementaron con mesas redondas. El objetivo de este proceso era entender las experiencias de los actores de toda la cadena de valor del hidrógeno, obtener una perspectiva general de esas experiencias y comparar sus diferencias y similitudes entre los países de los talleres y el resto de los países analizados en el proyecto.

Además, las medidas de prevención y mitigación extraídas de las mejores prácticas y los enfoques generales de seguridad sirvieron para mejorar las recomendaciones y acciones prácticas finales de las directrices HYPOP descritas en la sección 6. Este trabajo se logró gracias a la labor constante de investigación iniciada en el paquete de trabajo 2, «Requisitos y barreras de seguridad», cuyos datos adicionales se incluyen en el anexo. Por lo tanto, se utilizó la misma metodología para este documento, la cual se basa en una investigación bibliográfica de regulaciones y guías nacionales y locales, en las sinergias con otros proyectos sobre temas regulatorios (como el proyecto HYLAW, A. S. n.º 737977, etc.) y en la experiencia de los actores clave con los que colaboran los socios HYPOP. **La siguiente tabla resume las principales actividades de esta metodología. Asimismo, muestra cómo la seguridad y la certificación de las tecnologías de hidrógeno suelen estar vinculadas y señala qué partes interesadas pueden beneficiarse de cada actividad y tema.**

Tabla 17. Actividades emprendidas en los paquetes de trabajo 2 y 4 para obtener información sobre los métodos de seguridad destinados a proyectos de hidrógeno

Tipo de actividad	Grupos de interés	Tema de referencia
Análisis de los marcos regulatorios de países clave de la UE para la implementación de proyectos de hidrógeno (útil para recomendaciones técnicas y acciones prácticas).	Fabricantes, primeros usuarios, desarrolladores de proyectos y autoridades públicas.	Seguridad.
Revisión bibliográfica y normativa sobre tecnologías del hidrógeno.	Fabricantes.	Seguridad y certificación.
Reuniones con las partes interesadas para conocer sus enfoques de seguridad (nacionales y locales), experiencias personales (por ejemplo, proyectos piloto y reales), opiniones y percepciones.	Fabricantes, primeros usuarios, desarrolladores de proyectos y autoridades públicas.	Seguridad y certificación.

Tipo de actividad	Grupos de interés	Tema de referencia
Análisis de un número limitado de proyectos clave y mejores prácticas (descritos en el informe 2.1).	Fabricantes, primeros usuarios, desarrolladores de proyectos y autoridades públicas.	Seguridad y certificación.
Organización de talleres a nivel nacional e internacional (actividad de enlace entre el paquete de trabajo 2 y el 4).	Fabricantes, primeros usuarios, desarrolladores de proyectos y autoridades públicas.	Seguridad y permisos.

A continuación, podemos ver una tabla que incluye los países de la UE en los que se llevó a cabo el análisis, los tipos de partes interesadas que participaron y sus experiencias aportadas para las directrices HYPOP.

Tabla 18. Colaboradores HYPOP: Proyectos de la UE, autoridades públicas y entidades privadas

País	Tipo de grupo de interés	Referencia y experiencias
Países del proyecto HYPOP		
Bélgica	Clúster de hidrógeno. Empresa privada.	<ul style="list-style-type: none"> • Waterstofnet: Seguridad, permisos y certificación. • Aeropuerto de Bruselas: Coordinador del proyecto STARGATE. • Technifutur: Involucrado en varios proyectos de H₂ (Green SKHy, KnowWHY o HySCHOOL). • VITO: Estudio BAT (mejores tecnologías disponibles) sobre estaciones de repostaje de H₂. • Sertius: Organismo de permisos en Bélgica. • RESA: Gestor de la red de distribución de gas y electricidad. • Universidad Libre de Bruselas (ULB). • Colruyt Group. Administración de la región de Valonia (departamento de permisos y medioambiente).
Italia	Autoridad pública, empresa privada y universidad	<ul style="list-style-type: none"> • Trieste port: Seguridad y permisos (proyecto RENEWPORT). • RINA Consulting: Expertos en seguridad y certificación. • Tecnodelta: Colaborador del proyecto H2CARE. Certificación. • ATENA Scarl: Certificación. Colaborador del proyecto H2ports. • Uniparthenope: Certificación. Colaborador del proyecto FuelSOME.

País	Tipo de grupo de interés	Referencia y experiencias
		<ul style="list-style-type: none"> • A2A company: Seguridad y permisos. Proyecto de hidrógeno Valcamonica. • Tenova: Seguridad y permisos. Proyecto GrInHy 2.0. • Fondazione Bruno Kessler: Seguridad, permisos y certificación. Coordinador del proyecto SWITCH. • UNI - Ente Italiano Normazione: Certificación. Colaborador del proyecto e-SHyIPS. • SAGAT: Seguridad, permisos y certificación. Colaborador del proyecto TULIPS.
España	Empresa privada y asociación de empresas	<ul style="list-style-type: none"> • Redexis: Proyectos OCEANH2 y GREEN HYSLAND. • Tecnalia: Proyecto ARENHA. • TECNIBERIA. • Clúster Andaluz del Hidrógeno. • Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno.
Países EU-13		
Bulgaria (país HYPOP)	Asociación de hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Balkan Hydrogen Cluster: Seguridad y permisos.
Polonia (país HYPOP)	Empresa privada	<ul style="list-style-type: none"> • TUV SUD Poland: Expertos en seguridad y certificación.
Croacia	Centro de investigación y autoridad pública	<ul style="list-style-type: none"> • Instituto de Energía Hrvoje Pozar: Permisos ambientales. Proyectos Interreg. • Ministerio de Economía: Seguridad. • Instituto de Energía y Protección Ambiental (EKONERG): Permisos. • Green Sustainable Solutions: Permisos.
Chipre	Empresa privada y entidad pública	<ul style="list-style-type: none"> • Future Fuels Ltd: Coordinador del proyecto GreenH2CY. Seguridad y permisos. • Autoridad Reguladora de la Energía en Chipre (CERA): seguridad y permisos. • Trinomics.
República Checa	Empresa privada, clúster del hidrógeno, agencias regionales de energía y agencia regional	<ul style="list-style-type: none"> • ORLEN Unipetrol: Experto en seguridad y permisos. • Plataforma nacional checa de tecnología del hidrógeno: Experto en seguridad y permisos. • Centro Energético de la Región de Usti. • Agencia de Energía de la Región de Zlín (EAZK). • Consejo Económico y Social de la región de Usti. • DEVINN company: Seguridad, permisos y certificación. Integradores de sistemas.

País	Tipo de grupo de interés	Referencia y experiencias
Estonia	Centro de investigación	<ul style="list-style-type: none"> • Instituto de Metrología Metrosert: Coordinación del valle del hidrógeno.
Hungría	Empresa privada	<ul style="list-style-type: none"> • PBN Advanced Management: Colaborador del proyecto SMART-HY-AWARE. Seguridad y permisos.
Letonia	N/A	N/A
Lituania	Centro de investigación y autoridad pública	<ul style="list-style-type: none"> • Instituto lituano de energías renovables. Autoridad portuaria estatal de Klaipeda: Seguridad y permisos. • Representante del Ministerio de Transporte: Información sobre el marco normativo. • Consejo de Investigación de Lituania.
Malta	Agencia nacional	<ul style="list-style-type: none"> • Consejo de Malta para la ciencia y la tecnología.
Rumanía	Asociación de competencia en hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • ONG Sostenible. Permisos.
Eslovaquia	Centro de investigación y autoridad pública	<ul style="list-style-type: none"> • Instituto para el desarrollo del servicio público: Colaborador del proyecto H2CE. • Autoridad regional de Kosice: Coordinador del proyecto EASTGATEH2. Información compartida sobre seguridad y permisos.
Eslovenia	Centro de investigación y empresa privada	<ul style="list-style-type: none"> • Kemijski inštitut: Proyecto H2GreenFuture Interreg. • Holding Slovenske elektrarne d.o.o.: Coordinador del valle de hidrógeno NAHV (Adriático Norte) Seguridad, permisos y certificación.
Países líderes		
Francia	Autoridad pública, asociaciones nacionales y empresa privada	<ul style="list-style-type: none"> • Region Centre Val De Loire: Aceptación pública. • France Energies Marines: Enfocados en seguridad, permisos y aceptación pública para el sector marítimo. • ENGIE: Expertos en seguridad y certificación. Investigación prenormativa en el proyecto Thyga. • France Hydrogen
Alemania	Empresa privada	<ul style="list-style-type: none"> • Aeropuerto de Hamburgo: Coordinador del proyecto HyAirport. Seguridad y permisos. • Expertos en seguridad y certificación. Información compartida durante las reuniones de HyTruck. • NOW GmbH.

País	Tipo de grupo de interés	Referencia y experiencias
Países Bajos	Autoridad pública y empresa privada	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogen hub Noord Holland: Coordinador del valle de hidrógeno Noord-Holland. Seguridad, permisos y certificación. • New Energy Coalition: Proyecto LIHYP. Seguridad y permisos. • Nedstack fuel cell technology BV: Seguridad y certificación. Colaborador del proyecto GRASSHOPPER. • KIWA: Certificación. NL Hydrogen.
Suiza	Asociaciones nacionales	<ul style="list-style-type: none"> • H2Mobilitet: Permisos.



Imagen 2. Cobertura geográfica de la investigación en materia de seguridad, permisos y certificación

Los siguientes parámetros se utilizaron para un análisis de fortalezas y debilidades con el fin de evaluar el estado actual del marco regulatorio de la UE. La tabla que figura a continuación resume los resultados clave del paquete de trabajo 2. Para obtener más información, véanse en HYPOP los informes 2.1 y 2.2, «Requisitos y barreras de seguridad» y «Requisitos y barreras para la obtención de permisos», respectivamente.

Tabla 19. Parámetros de seguridad y permisos utilizados para un análisis de fortalezas y debilidades

Parámetros de seguridad	Parámetros de permisos
Directrices disponibles para la evaluación de la seguridad.	Prueba de la existencia de un marco regulatorio para permisos.
Pruebas de la implementación o adopción de metodologías de evaluación de riesgos.	Existencia de procedimientos específicos para el H ₂ .

Parámetros de seguridad	Parámetros de permisos
Existencia de regulaciones, códigos y estándares que definen el método de seguridad del hidrógeno.	Guías para la obtención de permisos de tecnologías de H ₂ .
Aplicación, adopción o prueba de un enfoque basado en el rendimiento y sus requisitos.	Cooperación y actitud general positiva de las autoridades públicas.
Aplicación, adopción o prueba de un enfoque prescriptivo y sus requisitos.	

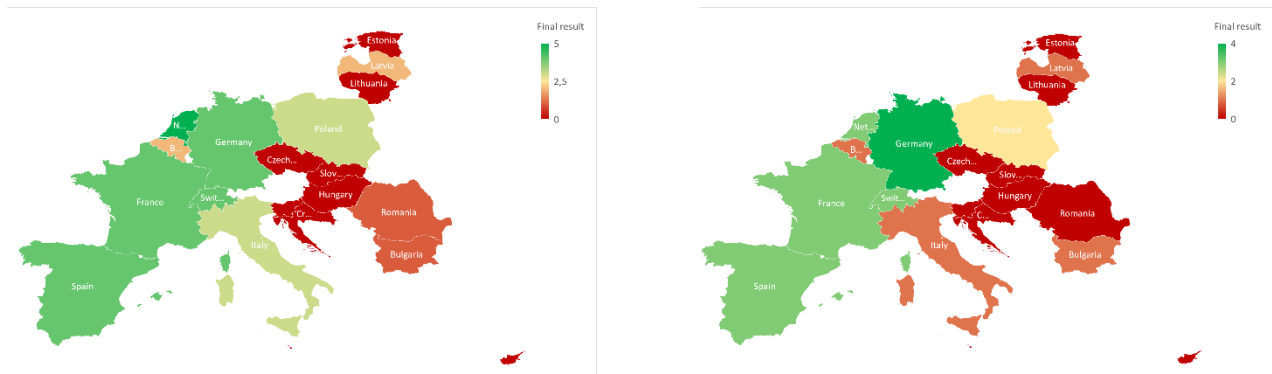


Imagen 3. Mapa de fortalezas y debilidades según los parámetros de seguridad (a la izquierda) y de permisos (a la derecha) del paquete de trabajo 2



8 Conclusiones

Las tecnologías del hidrógeno se consolidan cada vez más como un pilar en la descarbonización de Europa, a la vez que complementan la electrificación y la eficiencia en los sectores de la industria, la movilidad y residencial. Sin embargo, la evidencia HYPOP (análisis de buenas prácticas, talleres con partes interesadas y estudios de caso de permisos) revela un panorama de seguridad muy fragmentado. Esto se debe a la existencia de interpretaciones dispares, conocimiento desigual de las propiedades del H₂ y una alternancia entre enfoques prescriptivos y los basados en el rendimiento.

En este contexto, la percepción y el conocimiento de los actores implicados en los procesos de seguridad y permisos son cruciales para el avance de los proyectos de hidrógeno. Aunque para muchos el uso del hidrógeno es una novedad, sus tecnologías se han utilizado de forma segura en la industria desde el siglo pasado. El desafío actual reside en las nuevas aplicaciones en los sectores de la movilidad y residencial, donde los enfoques de seguridad que sustentan el marco regulatorio deben evolucionar al ritmo de la investigación e innovación. Pero esta no es una tarea fácil. De hecho, los enfoques comunes de seguridad asociados a las tecnologías del hidrógeno y al propio hidrógeno como combustible aún no están completamente desarrollados. Esta incertidumbre se refleja tanto a nivel nacional como local en la UE, donde los requisitos de seguridad pueden actuar como obstáculos que frenan la inversión privada y complican la labor de las partes interesadas responsables de la concesión y obtención de permisos (por ejemplo, autoridades públicas vs. empresas).

Problema actual: Esta fase se caracteriza por una experiencia práctica limitada en el uso del hidrógeno. Muchas autoridades locales (como los cuerpos de bomberos y las oficinas técnicas de medioambiente, urbanismo y prevención de accidentes) carecen de un marco regulatorio, por lo que esto les dificulta la tarea de interpretar las regulaciones existentes (a menudo creadas para otros combustibles) al evaluar soluciones innovadoras.

Objetivo: Reducir la incertidumbre y los plazos de concesión de permisos, además de aumentar el conocimiento y la percepción, al tiempo que se garantizan niveles de seguridad documentados y equivalentes, mediante una vía de interacción estructurada y replicable entre el promotor del proyecto/diseñador de HSE y las autoridades públicas.

Un entorno de seguridad fragmentado conlleva las siguientes consecuencias:

- Plazos para obtener permisos más largos y menos predecibles.
- Normativa de seguridad de la UE desigual y diversificada, lo que conduce a una ingeniería excesiva o insuficiente.
- Aumento de los costes indirectos del desarrollo (ciclos de revisión iterativos, consultoría repetida).
- Debilitamiento de la confianza pública por falta de transparencia.

Las recomendaciones incluidas en las directrices HYPOP se agrupan en dos pilares operativos, pensados para facilitar su implementación y reproducibilidad en el día a día:



- **Acciones técnicas:** Desde la identificación de las lagunas normativas hasta la adaptación específica y la transferencia de las mejores prácticas de los enfoques de la UE, desde los diferentes requisitos técnicos (por ejemplo, certificación y cumplimiento de la normativa ATEX, ingeniería de diseño y contenedorización, detección temprana y ventilación adaptativa, etc.) hasta la normalización gradual de las metodologías de riesgo y un enfoque común en materia de seguridad.
- **Transferencia de conocimiento y concienciación:** El objetivo es establecer un proceso de mejora continua, basado en la capacitación modular para autoridades y operadores. Se busca crear un ecosistema participativo amplio y estandarizado que fortalezca la interacción entre las partes interesadas para fomentar la aceptación pública y combatir la desinformación. Por ello, se organizan talleres entre expertos técnicos y autoridades públicas para dialogar y unificar perspectivas sobre la seguridad. Por último, se colabora con los cuerpos de bomberos para crear protocolos de emergencia conjuntos.

Al implementar este modelo, se acelerará el despliegue seguro de los proyectos, se reducirá la carga administrativa y se fortalecerá la confianza pública, lo que creará un círculo virtuoso entre la innovación y la gestión de riesgos.



9 Anexo A

i. Directrices de la UE

La tabla que figura a continuación recoge algunas directrices de seguridad identificadas en el marco del proyecto HYPOP. Se pueden usar como referencia para explorar diferentes enfoques y crear unas directrices propias. Tan solo sería necesario adaptarlas a la metodología de seguridad y a las mejores prácticas existentes.

Tabla 20. Directrices de seguridad de la UE identificadas en HYPOP

País	Impacto	Temas	Sectores	Entidades	Conclusiones
Suiza ¹¹	Nacional	Seguridad y permisos	Producción de H ₂	Asociación de productores de hidrógeno, empresas y autoridad nacional	<p>El proceso de concesión de permisos se basa en interacciones simplificadas entre las autoridades públicas, en las que el intercambio de información para diferentes tipos de permisos está dirigido por una autoridad principal.</p> <p>Se necesitan dos permisos importantes: de construcción y eléctrico. El permiso de construcción incluye autorizaciones ambientales como la evaluación de impacto ambiental si:</p>

¹¹

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11554&ved=2ahUKEwiEu47S3N-OAxU8cvEDHQm-Hv4QFnoECAkQAQ&usg=AOvVaw2qMyiJ0ZB6GKrH3iWeuf5f>



País	Impacto	Temas	Sectores	Entidades	Conclusiones
					<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad de almacenamiento de gas supera los 50 000 m³ o el de líquido los 5000 m³. • La planta tiene una superficie operativa superior a 5000 m² o si se sintetizan más de 1000 toneladas anuales de productos químicos. <p>Aspectos relacionados con la seguridad:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estándares armonizados a nivel intercantonal para la prevención de incendios. • La normativa para atmósferas potencialmente explosivas es la VUV (equivalente a ATEX 1999/92/EC).
Países Bajos ¹²	Nacional	Seguridad	Movilidad (estaciones de repostaje de hidrógeno o HRS)	Expertos en H ₂ contratados por las autoridades	Las guías de seguridad para las estaciones de repostaje de hidrógeno, evaluadas a nivel municipal o provincial, actúan como normativa. Las distancias de seguridad internas (hasta 8,5 m) se calculan mediante una metodología de evaluación cuantitativa de riesgos, el <i>software</i> SAFETI-NL NL v6.5.4 y los conceptos de seguridad del documento IGC Doc 75/07/E de la EIGA " <i>Determination of safety distances</i> ". La normativa sugiere que, si las distancias de seguridad son demasiado grandes para el diseño de la HRS, se deben considerar medidas de mitigación (como muros cortafuegos) o modificar el diseño y las condiciones de

¹²

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS35/PGS%252035%2520voor%2520website%2520ondertekend.pdf&ved=2ahUKEwiuzPrr3N-OAxW4Q_EDHcHUMjYQFnoECBcQAQ&usg=AOvVaw05GoR5M1E9FmV_6igboHzr



País	Impacto	Temas	Sectores	Entidades	Conclusiones
					funcionamiento del equipo a fin de reducir la gravedad o la probabilidad de un incidente.
España ¹³	Nacional	Seguridad	Producción de H ₂ Movilidad Residencial	Asociación de empresas	<p>Las directrices describen el método de seguridad español basado en el rendimiento. A su vez, detallan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Metodologías de análisis de riesgos más importantes, su función, objetivos y el momento de aplicación durante el proyecto. • Posibles vacíos legales a nivel nacional, recomendaciones de expertos y las normativas, códigos y estándares internacionales (RCS) para la seguridad de las instalaciones de hidrógeno. <p>Elementos clave que influyen en la seguridad (incluida la producción <i>in situ</i>):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zonas de exclusión con acceso limitado. • Distancias de seguridad y medidas de mitigación para escenarios de explosión. • Sistemas de ventilación adecuados para zonas ATEX en caso de fugas de H₂. • Sistemas de detección de gas y fuego.

¹³ <https://bequinor.org/general/guia-de-seguridad-del-hidrogeno-de-bequinor/>



ii. Pruebas de la existencia de normativas para la seguridad de los proyectos de hidrógeno en la UE

La siguiente tabla recoge las regulaciones de seguridad identificadas en el marco del proyecto HYPOP, clasificadas según el tipo de enfoque de seguridad y junto con los requisitos clave. Para obtener más información al respecto, véase el informe 2.1 HYPOP.

Tabla 21. Normativa de seguridad vigente en la UE para proyectos de hidrógeno

País	Aplicación de H ₂	Referencia	Requisitos principales	Enfoque de seguridad
Italia	Producción de H ₂	Decreto del 7 de julio de 2023 del Ministerio del Interior. Este decreto establece las normas técnicas contra incendios para el diseño, construcción y funcionamiento de las plantas de producción de hidrógeno mediante electrólisis y sus sistemas de almacenamiento. Asimismo, detalla las metodologías de análisis de riesgo y las medidas de seguridad a adoptar. ¹⁴	<ul style="list-style-type: none"> • Distancias de seguridad de 3 m a 5 m ($P < 10$ bar). • Distancias de seguridad de 15 m a 30 m ($700 < P < 1000$ bar). 	Enfoque prescriptivo
Italia	HRS	Decreto del 23 de octubre de 2018 del Ministerio del Interior: <i>“Technical rule for fire prevention for the design, construction, and operation of hydrogen distribution plants for motor vehicles”</i> ¹⁵	Distancias de seguridad de 12 m a 30 m.	Enfoque prescriptivo

¹⁴ <https://www.vigilfuoco.it/media/notizie/gu-decreto-7-luglio-2023-impianti-di-produzione-di-idrogeno-mediante-elettrolisi-e-relativi-sistemi>

¹⁵ <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/11/05/18A07049/SG>



País	Aplicación de H ₂	Referencia	Requisitos principales	Enfoque de seguridad
España	HRS	Real Decreto 919/2006, de 28 de julio (ITC-ICG 5). ¹⁶	ISO/TS 19880-1:2020: Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio. Parte 1: Requisitos generales.	Basado en el rendimiento
España	Residencial	Real Decreto 656/2017: Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10 ¹⁷ (MIE APQ-1; MIE APQ-5; MIE APQ-10).	<ul style="list-style-type: none"> • Según la cantidad almacenada. • Distancias de seguridad entre equipos peligrosos: 3 m/6 m o muro de separación. 	Enfoque prescriptivo
Polonia	HRS	<i>Regulation of the Minister of Climate and Environment of 21 October 2022 on detailed technical requirements for hydrogen stations (Journal of Laws 2022, item 2158)</i> ¹⁸	<ul style="list-style-type: none"> • Estándares ISO 1988-1 y EN ISO 17127. • Estándares ISO 19880-2 y EN ISO 17268. 	Basado en el rendimiento
Bulgaria	HRS + producción de H ₂ <i>in situ</i>	Reglamento n.º RD-02-20-2 del 28 de septiembre de 2020 “ <i>Conditions and Procedure for Design, Construction, Commissioning and Control of Hydrogen fuel vehicle filling stations</i> ” ¹⁹	<ul style="list-style-type: none"> • Distancias de seguridad de hasta 15 m. • BDS ISO 16111: Dispositivos portátiles de almacenamiento de gas. Hidrógeno absorbido en hidruro metálico reversible. • BDS EN ISO 17268: Dispositivos de conexión para el suministro de 	Enfoque prescriptivo

¹⁶ <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2006-15345#itcicg05>

¹⁷ <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-8755>

¹⁸ <https://www.gov.pl/web/klimat/rozporzadzenie-ministra-klimatu-i-srodowiska-w-sprawie-szczegolowych-wymagan-technicznych-dla-stacji-wodoru>

¹⁹ <https://lex.bg/bg/laws/ldoc/2137206003>



País	Aplicación de H ₂	Referencia	Requisitos principales	Enfoque de seguridad
			<p>hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres. (ISO 17268:2020).</p> <ul style="list-style-type: none"> • BDS EN 17127: Puntos de suministro de hidrógeno al aire libre que dispensan hidrógeno gaseoso e incorporan protocolos de llenado. • BDS EN 60079-10-1: Atmósferas explosivas. Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas explosivas de gas. 	
República Checa	HRS	Metodología para la construcción y operación de estaciones de repostaje de hidrógeno comprimido para dispositivos móviles: ²⁰ guía de aplicación oficial.	Distancias de seguridad de 3 m a 8 m.	Enfoque prescriptivo
Francia	HRS	<i>Arrêté du 22 octobre 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 1416 (station de distribution d'hydrogène gazeux)²¹</i>	Distancias de seguridad de 6 m a 14 m (reducción a un máximo de 10 m).	Enfoque prescriptivo y basado en el rendimiento

²⁰ <https://hzscr.gov.cz/clanek/metodika-vystavby-a-provozu-plnicich-stanic-stlaceneho-vodiku-pro-mobilni-zarizeni.aspx>

²¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000037519292/>



País	Aplicación de H ₂	Referencia	Requisitos principales	Enfoque de seguridad
Francia	Residencial	<i>Arrêté du 12 février 1998 « general requirements applicable to classified installations for environmental protection subject to declaration under heading No. 4715).²²</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Distancias de seguridad interiores de 5 m. • Distancias de seguridad exteriores de 8 m. 	Enfoque prescriptivo
Alemania	HRS	<i>Genehmigungleitfaden Wasserstoff-Tankstellen²³</i>	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 19880-1:2020: Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio. Parte 1: Requisitos generales. • TRGS 720: Mezclas explosivas peligrosas. Información general. • TRGS 727: Prevención de riesgos de ignición por cargas electrostáticas. • TRGS 745: Contenedores portátiles de gas comprimido. 	Basado en el rendimiento

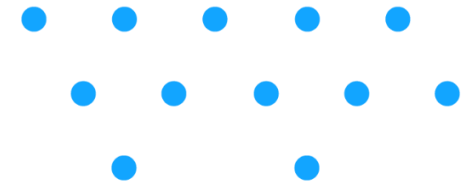
²² <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000571176>

²³ https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/03/NOW_Genehmigungleitfaden_H2-Tankstellen.pdf&ved=2ahUKewibqrlOvt-OAxU_V6QEHabPPCEQFnoECAkQAQ&usg=AOvVaw1DDVCWjEDp6w9zjCd4ybOy



País	Aplicación de H ₂	Referencia	Requisitos principales	Enfoque de seguridad
			Llenado, almacenamiento, transporte interno y vaciado.	
Países Bajos	HRS	<i>PGS35 «Waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen»²⁴</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Distancias de seguridad de 2 m a 8,5 m. • <i>Software SAFETI-NL v6.5.4.</i> • Conceptos de seguridad de la Asociación Europea de Gases Industriales (EIGA). • <i>IGC Doc 75/07/E "Determination of safety distances".</i> 	Basado en el rendimiento
Croacia	Industria, HRS y sector residencial	Basado en la NFPA-2/2020: " <i>Hydrogen technology code</i> " (no es una regulación nacional).	<ul style="list-style-type: none"> • Distancias de seguridad desde el almacenamiento de hidrógeno comprimido: entre 1,5 m y 14 m, en función del equipo involucrado. 	Basado en el rendimiento

²⁴ <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/pgs35/>



iii. Referencias básicas para reglamentos, códigos y estándares (RCS)

La tabla que figura a continuación recoge algunos RCS básicos que pueden ser de utilidad. Para obtener más información sobre los estándares, véanse los informes 2.3 y D4.5 (Directrices de certificación HYPOP).

Tabla 22. Referencias básicas para reglamentos, códigos y estándares

Normas y reglamentos útiles en materia de seguridad del hidrógeno
Protección contra explosiones: IEC/EN 60079 e ISO/IEC 80079.
ISO 22734: «Generadores de hidrógeno utilizando el proceso de la electrolisis del agua. Parte 1: Aplicaciones industriales y comerciales». Esta norma exige a los fabricantes de electrolizadores llevar a cabo una evaluación de riesgos. En función de la ubicación final del equipo, es probable que los propietarios o el personal operativo de la planta tenga que hacer una evaluación adicional del generador de hidrógeno. Para ello, se aplicará la clasificación de zonas según la norma IEC 60079-10-1 o una norma nacional apropiada.
ISO 19880: Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio.
Clasificación de zonas y métodos de protección contra ignición: según IEC 60079, ISO/IEC 80079 y NFPA 2.
ISO/TR 15916: Consideraciones básicas de seguridad de los sistemas de hidrógeno.
Recursos adicionales (con referencias)
Base de datos de códigos y estándares para hidrógeno y pilas de combustible: https://h2tools.org/fuel-cell-codes-and-standards?search_api_fulltext=



Guía EIGA: SISTEMAS DE TUBERÍAS DE

HIDRÓGENO. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC121.pdf&ved=2ahUKEwja-uC4d-OAxVmVqQEHaObHnkQFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw2Xm3-VobjG-Flg0-Bkki3n>

Guía EIGA: GUÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PEQUEÑA

ESCALA: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.eiga.eu/ct_documents/doc246-pdf/&ved=2ahUKEwja-uC4d-OAxVmVqQEHaObHnkQFnoECBYQAQ&usg=AOvVaw1ue2JTdrcuiEf8Qz9O5yME

Guía NFPA: Salvaguardias fundamentales para la generación, instalación, almacenamiento, conducción, uso y manipulación del hidrógeno en forma de gas comprimido: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-2-standard-development/2&ved=2ahUKEwi-1L724d-OAxW4KvsDHU5HizYQFnoECAkQAQ&usg=AOvVaw3X4ls3hYFY0_tlrRBlw7D8



iv. Talleres técnicos HYPOP

Talleres técnicos: España

El Centro Nacional del Hidrógeno organizó dos talleres en España, donde se presentaron los avances del proyecto HYPOP y se debatió con los asistentes, en su mayoría representantes de empresas. Las conclusiones principales se centraron en los desafíos y obstáculos más importantes a la hora de probar la seguridad de las tecnologías del hidrógeno.

Los principales retos y barreras se han resumido en las siguientes categorías:

- **Conocimiento:** La falta de información y concienciación (sobre todo en las administraciones), la disponibilidad de infraestructuras previas y la ausencia de precedentes se clasificaron como un problema.
- **Opinión pública:** Credibilidad, concienciación social (para combatir mitos y demostrar que el hidrógeno no es una tecnología nueva) y otros problemas sociales.
- **Regulación y certificación:** No existe una regulación específica y única, faltan procesos de certificación, homogeneidad y mejores prácticas estandarizadas.
- **Prevención medioambiental**
- **Problemas tecnoeconómicos:** Costes, demanda, uso de la tecnología, horas de funcionamiento de la maquinaria, degradación de los equipos de almacenamiento, diseño de las instalaciones, almacenamiento y distribución del H₂ a través de las HRS.
- **Seguridad:** Se abordaron la baja concienciación sobre la seguridad y la dificultad para detectar fugas. Otros puntos clave son las zonas explosivas, el rango de inflamabilidad del H₂, los valores de presión en la generación y almacenamiento de H₂, y la falta de datos de



accidentes previos para validar los niveles de seguridad. Por ello, es fundamental desarrollar, difundir y aplicar medidas de seguridad pasivas y activas.

Talleres técnicos: Italia

El taller italiano, organizado por ENVIPARK y la asociación H2IT, se celebró durante la Hydrogen Expo Piacenza. El evento reunió a representantes tanto de empresas privadas como de autoridades públicas.

En la mesa redonda se debatió sobre los principales obstáculos que afrontan los grupos de interés del sector del hidrógeno en Italia. La conclusión principal fue la falta de experiencia y la incertidumbre que las autoridades públicas tienen sobre el hidrógeno. A esto se le suman las dudas sobre la correcta interpretación y aplicación de la normativa de seguridad vigente a nivel nacional.

Los debates generaron ideas clave para planificar una futura colaboración con las autoridades de seguridad. Los pasos principales de esta estrategia se detallan a continuación:

- **Presentación del proyecto (seguridad):** Exponer los detalles del proyecto al cuerpo de bomberos para facilitar su comprensión y acelerar el proceso de aprobación.
- **Referencias normativas:** Revisar junto con los bomberos qué decretos y reglamentos ministeriales se aplican a cada sección de la instalación.
- **Identificación de riesgos:** Estudiar los posibles puntos críticos del proyecto y determinar las medidas de mitigación adecuadas.
- **Necesidades:** Adaptar la normativa de seguridad vigente introduciendo condiciones específicas para cada posible tamaño de proyecto y tecnologías instaladas.
- **Herramientas:** Solicitar una evaluación de riesgos y definir la metodología deseada.
- **Enfoque:** Priorizar el análisis de la probabilidad de los incidentes en vez de su gravedad.



Talleres técnicos: Bélgica

CLUSTER TWEED organizó un taller en línea que reunió a expertos en servicios medioambientales y de seguridad, una empresa privada con un proyecto de hidrógeno en una **cadena de supermercados**, una compañía de distribución de gas y electricidad, y la Universidad Libre de Bruselas. CLUSTER TWEED dio una presentación centrada en la situación actual del hidrógeno en Bélgica y sus países vecinos. Para finalizar, se terminó con una breve ronda de preguntas y respuestas que reveló un problema importante: el principal obstáculo para la seguridad de estos proyectos de hidrógeno no es la tecnología, sino la aceptación de las partes interesadas. El problema surge de la ambigüedad del marco administrativo en Valonia, que lleva a las autoridades públicas a temer esta nueva tecnología. Dado que carecen de experiencia específica en hidrógeno, a menudo aplican la normativa SEVESO incluso en proyectos de pequeña escala. Además, la falta de criterios de aceptación específicos les obliga a usar los criterios SEVERO, que resultan excesivamente restrictivos para proyectos de hidrógeno como las HRS. La conclusión unánime de los participantes fue que **es esencial formar y concienciar a las autoridades**. Además, la industria también debe tomar la iniciativa.

Talleres técnicos: Bulgaria

El taller búlgaro, celebrado en la Academia de Ciencias de Bulgaria en Sofía, contó con la participación de representantes de la Agencia Estatal de Meteorología y Supervisión Técnica, la Academia de Ciencias de Bulgaria, varias universidades, municipios y los Servicios Nacionales de Incendios y Seguridad Civil.

Debido a la importante falta de regulación en Bulgaria, el taller se centró, en términos generales, en cuáles eran las principales necesidades que debían abordarse. Durante la sesión, el Servicio Nacional de Seguridad contra Incendios y Protección Civil detalló los requisitos legales y los ejemplos prácticos sobre la producción, el almacenamiento y el uso de hidrógeno. Por su parte, los asistentes coincidieron en que se necesita que el gobierno actúe de forma más proactiva y apruebe las normas necesarias con rapidez. De esta forma, se garantizaría que las empresas puedan adoptar el hidrógeno a gran escala. Como ejemplo de lo primero que veremos en Bulgaria, se va a crear un grupo de trabajo



específico para gestionar los permisos de proyectos de hidrógeno. una medida que los asistentes esperan que impulse el sector del hidrógeno y sus permisos de forma positiva.

Talleres técnicos: Polonia

Este taller tuvo como objetivo presentar el proyecto HYPOP (*Hydrogen Public Opinion and Acceptance*) y fomentar un debate interregional y constructivo sobre las oportunidades y los desafíos de la economía del hidrógeno. El evento congregó a representantes de la industria, la administración pública y expertos en medioambiente, lo que permitió obtener una visión integral del desarrollo de la economía del hidrógeno.

Durante la mesa redonda, los participantes compartieron sus experiencias, necesidades y problemas que afrontan al implementar proyectos de hidrógeno. Se identificaron los siguientes puntos clave:

- Procedimientos administrativos complejos y poco transparentes, sumados a una falta de estándares locales uniformes.
- Falta de conocimientos técnicos y legales en la administración sobre las instalaciones de hidrógeno.
- Falta de herramientas de comunicación pública coherentes y mecanismos de participación ciudadana eficaces.
- Potencial de sinergia con proyectos financiados por la UE sin explotar.
- Necesidad de crear directrices unificadas para la región de Pomerania.



v. Análisis técnico de los requisitos y medidas de seguridad: estudio complementario al informe D2.1 HYPOP

La información que figura en esta sección del anexo complementa el análisis técnico de los requisitos de seguridad para proyectos de hidrógeno incluidos en el informe D2.1. Este trabajo se llevó a cabo (incluso en el caso de la concesión de permisos) en paralelo con la organización de talleres de participación de las partes interesadas. **Para obtener más información, conocer los resultados y consultar las comparaciones con otros países, véase el informe 2.1 HYPOP.**

CROACIA

En la actualidad, Croacia no dispone de una normativa específica para el uso de hidrógeno en la industria, movilidad o sector residencial. Se aplican regulaciones existentes sobre gases inflamables, seguridad en la construcción y energía, a menudo junto con las directivas de la UE. En cuanto a la movilidad y el uso industrial, se siguen las normas de la UE, mientras que en el sector residencial el hidrógeno aún se encuentra en fase piloto.

Las partes interesadas señalan tres desafíos principales en el proceso de obtención de permisos:

- Falta de un marco regulatorio claro y específico.
- Necesidad de requisitos de seguridad adicionales.
- Diferencias en los procedimientos e interpretaciones entre municipios y condados.

Requisitos generales de seguridad

Las cantidades límite de sustancias peligrosas que deben almacenarse en el lugar de la instalación deben comprobarse de conformidad con lo especificado en el **anexo IA del Reglamento sobre la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas (OG, 44/14, 78/15, 31/17, 45/17):**



Tabla 23. Cantidades límite de sustancias peligrosas según el Reglamento sobre la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas

Número de serie	Sustancia peligrosa	Cantidades mínimas de sustancias peligrosas (en toneladas)	
		Cantidades mínimas	Cantidades máximas
Anexo IA, parte 2			
15	Hidrógeno	5	50

El hidrógeno es una sustancia peligrosa que, en caso de fuga, puede generar una atmósfera explosiva y posibles explosiones, por lo que se han definido zonas de peligro y distancias de seguridad. A pesar de esto, la legislación croata no especifica las distancias de seguridad para los tanques de hidrógeno comprimido con respecto a otros edificios y fuentes de ignición. Por esta razón, **se aplica la norma NFPA-2/2020**, cuyos valores se detallan a continuación.

Tabla 24. Distancias de seguridad según la norma NFPA-2/2020 (Croacia)

OBJETOS POTENCIALES EN LAS PROXIMIDADES DE UN CAMIÓN CISTERNA DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO (TRÁILER DE TUBO)	DISTANCIA MÍNIMA RESPECTO A UN DEPÓSITO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO (m)
EDIFICIOS RESISTENTES AL FUEGO	5,8
EDIFICIOS INFLAMABLES O DE BAJA INFLAMABILIDAD	5,8
VEHÍCULOS ESTACIONADOS	7,3
CARRETERAS PÚBLICAS, VÍAS FÉRREAS Y OTRAS SUPERFICIES DE TERCEROS	14
DEPÓSITOS DE HIDRÓGENO LÍQUIDO	1,5



OBJETOS POTENCIALES EN LAS PROXIMIDADES DE UN CAMIÓN CISTERNA DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO (TRÁILER DE TUBO)	DISTANCIA MÍNIMA RESPECTO A UN DEPÓSITO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO (m)
LUGARES DE REUNIÓN PÚBLICA	14
LLAMAS ABIERTAS	14
DEPÓSITOS DE OXÍGENO LÍQUIDO	5,8
DEPÓSITOS DE LÍQUIDOS INFLAMABLES	5,8
VÁLVULAS DE RESPIRACIÓN PARA TANQUES SUBTERRÁNEOS	5,8
COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	5,8
MATERIALES SÓLIDOS INFLAMABLES (ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS)	14
TOMAS DE AIRE DE COMPRESORES	14
OTRAS ESTRUCTURAS	14

CHIPRE

El análisis de las partes interesadas ha permitido estudiar el **proyecto GreenH2CY**, una de las pocas iniciativas en Chipre que integra la **producción, almacenamiento y uso de hidrógeno renovable para el transporte por carretera**. El proyecto, que cuenta con la financiación del **Fondo de Innovación 2022**, instalará en una misma ubicación:

- Un **electrolizador PEM de 2 MW** compuesto por dos unidades de electrólisis de 1 MW (con una capacidad de producción de 150 toneladas/año).



- Una **unidad de almacenamiento de hidrógeno** con dos depósitos (2 x 500 kg).
- Una **estación de repostaje de hidrógeno**.

A pesar de que la **percepción pública y el compromiso de la comunidad son muy positivos**, dado que el proyecto representa una oportunidad para la descarbonización del transporte, las partes involucradas **llevan más de dos años con problemas a la hora de obtener los permisos** pertinentes. El principal obstáculo al que se enfrentan es la **falta de conocimientos sobre el hidrógeno por parte de las autoridades** locales y nacionales.

Future Fuels Ltd., coordinador del proyecto, compartió estos desafíos de **seguridad y permisos** con el proyecto HYPOP.

En lo que **respecta a la seguridad**, el **cuerpo de bomberos** es la autoridad competente para emitir los permisos. Aunque la **ausencia de directrices técnicas o una normativa específica para el hidrógeno** hace que la única referencia conocida sea la **Directiva SEVESO**. No obstante, esta directiva **no se aplicó** al tratarse de un **proyecto piloto a pequeña escala** (menos de 5 toneladas) y debido a sus **requisitos de seguridad tan estrictos**.

En su lugar, la solución fue analizar las **directrices existentes para combustibles convencionales** y presentar un informe de seguridad al cuerpo de bomberos. En este informe se incluyó una **evaluación de riesgos** que destacaba el **riesgo de explosión del almacenamiento de hidrógeno** y las **distancias de seguridad necesarias** entre la unidad de almacenamiento y los linderos externos del emplazamiento.

REPÚBLICA CHECA

En la República Checa, las **brigadas de bomberos regionales** (a nivel de distrito) son las **autoridades competentes en materia de seguridad**, aunque hoy en día **no existen grupos de trabajo o iniciativas específicas que reúnan las mejores prácticas y experiencias compartidas**. Por ello, **cada proyecto de hidrógeno se evalúa de manera individual**.

La infraestructura actual del país se basa en cuatro estaciones de repostaje de 700 bar: una en Ostrava (a cargo de VÍTKOVICE, a.s.), una en Praga y otra en Litvinov (bajo el control de ORLEN Unipetrol) y una cerca de Praga (operada por ČEPRO, a.s.).



En la República Checa existe una directriz para el desarrollo de estaciones de repostaje de hidrógeno. Se puede consultar en el siguiente enlace: <https://hzscr.gov.cz/clanek/metodika-vystavby-a-provozu-plnicich-stanic-stlaceneho-vodiku-pro-mobilni-zarizeni.aspx>.

Las principales características de las directrices para las estaciones de repostaje de hidrógeno se describen a continuación.

Estas directrices se han elaborado en ausencia de una normativa oficial y, por lo tanto, sirven, en la práctica, como norma de facto. Establecen una metodología que fija las condiciones básicas para la construcción de nuevas estaciones de repostaje de hidrógeno comprimido para equipos móviles, en particular para vehículos de transporte.

Describe los métodos a utilizar –tanto de forma individual como combinada– para la prevención de accidentes, la mitigación de daños y los procedimientos de respuesta ante emergencias si se generan atmósferas inflamables o explosivas. El documento se elaboró gracias a la colaboración entre organismos públicos y privados, junto con la organización de certificación independiente TÜV NORD, y contiene disposiciones tanto sobre seguridad contra incendios como sobre procedimientos de concesión de permisos.

Para la selección del emplazamiento, el diseño, la construcción, la puesta en servicio, la explotación y el mantenimiento, se basa en la experiencia de plantas comparables y en la normativa sobre GNC y GLP, así como en las lecciones aprendidas del diseño, la construcción, la explotación y el mantenimiento de la primera (y hasta ahora única) estación de repostaje de hidrógeno comprimido en Neratovice, y en las normas técnicas reconocidas internacionalmente adoptadas por la República Checa. No obstante, la guía no cubre la producción de hidrógeno *in situ* ni el uso de hidrógeno líquido, aunque sí diferencia entre estaciones públicas y privadas, con recarga lenta o rápida.

Estructura de las directrices

- **Definiciones, terminología y referencias normativas aplicables.**
- **Requisitos técnicos y administrativos para la presentación de un proyecto de estación de repostaje.**
- **Recomendaciones sobre las características del lugar y el diseño de la estación.**
- **Pruebas para la validación del sistema.**



La estructura adoptada se basa en **un enfoque de seguridad prescriptivo**, que proporciona directrices claras para el diseñador. Las normas principales sobre seguridad contra incendios para el desarrollo de una estación de repostaje de hidrógeno son las siguientes:

- ČSN 73 0802 (seguridad contra incendios en establecimientos no industriales).
- ČSN 73 0804 (seguridad contra incendios en establecimientos industriales).

Referencia clave adicional: **ISO/TS 19880-1. Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio. Parte 1: Requisitos generales**

Requisitos generales de seguridad

- Para evitar que las zonas de explosión peligrosas se superpongan, se debe mantener una **distancia mínima entre dispensadores**.
- Es obligatorio proteger **todos los componentes de la estación** contra los daños mecánicos que puedan sufrir por el movimiento de los vehículos.
- Las **tuberías de hidrógeno** deben cumplir con la norma **EN 13480-3 «Tuberías metálicas industriales. Parte 3: Diseño y cálculo»**.
- Los **recipientes de almacenamiento a presión** deben cumplir con la norma **EN ISO 11114-4 «Botellas para el transporte de gas. Compatibilidad de los materiales de la válvula y de la botella con el gas contenido. Parte 4: Métodos de ensayo para la selección de materiales metálicos resistentes a la fragilización por hidrógeno»**.
- Los **dispensadores** deben instalarse en el exterior, cubiertos por una marquesina fabricada íntegramente con materiales no combustibles, incluido el techo.



Tabla 25. Distancias de seguridad obligatorias en la República Checa

Categoría de distancia	Distancia (m)
Desde fuentes de calor y llamas abiertas	5
Desde zonas con riesgo de incendio y explosión (por equipos de almacenamiento y presión)	5
Desde carreteras públicas y aparcamientos	8
Desde edificios con llamas abiertas, superficies/edificios combustibles y tomas de aire	8
Desde tanques y almacenes de GLP	8
Desde equipos de GNC y GNL	8
Desde el compresor	3

Documentación necesaria para permisos de construcción y planificación, cuya lista completa figura en las directrices y cuyas referencias principales son:

- **Ley 133/1985 Coll.** sobre medios de protección contra incendios (y sus enmiendas).
- **Ley 505/1990 Coll.** sobre metrología (y sus enmiendas).
- **ČSN 1127-1:** Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra explosiones. Parte 1: Conceptos básicos y metodología.
- **Decreto 499/2006 Coll.** sobre la documentación de la construcción (y sus enmiendas).

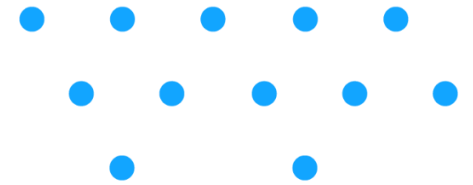


- **Decreto 169/2016 Coll.** sobre el alcance de la documentación para contratos de obras públicas y el inventario de obras de construcción, suministros y servicios (modificado por el **Decreto 405/2017 Coll.**).
- **ISO 26142:** Aparatos de detección de hidrógeno. Aplicaciones estacionarias.
- **IEC 61000:** Compatibilidad electromagnética (CEM).
- **ČSN 73 0810:** Seguridad contra incendios de edificios. Disposiciones generales.

No hay evidencias de directrices ni de normativas específicas para las plantas de producción de hidrógeno, tal y como se indica en el siguiente enlace: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/policies-and-standards/national-policy>. No obstante, se prevén algunos procesos de producción de hidrógeno en el país: Green Mine (2027, Most, región de Ústí nad Labem), donde se construirá un electrolizador como parte del proyecto Green Mine (producción anual de 360 toneladas). Un proyecto en el que el hidrógeno producido por un electrolizador se conecta al exceso de energía fotovoltaica producida. El proyecto debería estar en marcha en 2027 y está gestionado por ORLEN Unipetrol (producción anual de 4500 toneladas).

En la actualidad, República Checa solo cuenta con unos pocos proyectos activos relacionados con el hidrógeno, como algunas HRS que se han construido y están en funcionamiento, y un proyecto de producción de hidrógeno a través de electrolizadores alimentados por un parque fotovoltaico. La particularidad de estos proyectos reside en su ubicación, ya que se sitúan en **zonas industriales** y terrenos pertenecientes a **empresas privadas** (en especial del **sector químico**). Esto influye en los **tipos de autoridades públicas involucradas** debido a su **experiencia y percepción**, puesto que existe una **falta de conocimiento** en entornos públicos o urbanos.

El proyecto de producción de hidrógeno que a día de hoy está en proceso de obtener los permisos correspondientes no se ha enfrentado a grandes problemas de seguridad. La razón principal es que se encuentra cerca de empresas químicas que ya operan con otros gases explosivos. El único desafío ha sido la necesidad de aplicar **estándares y medidas de seguridad adicionales** para tranquilizar al **cuerpo de bomberos**, debido a la cercanía a las **vías del tren**.



Por el momento, no existen **regulaciones de seguridad nacionales o regionales** específicas para proyectos de hidrógeno en la República Checa. Tampoco se dispone de directrices para las HRS sin producción *in situ* ni para las instalaciones de producción de hidrógeno. En el caso de las HRS existentes, se sigue la **normativa estándar** para **estaciones de gas natural y GLP**, junto con las guías que actúan como una metodología. Asimismo, se requiere la instalación de **detectores de gas**, una clasificación de **zonas ATEX** adecuada y un **análisis de riesgos**. Si bien se aplican ciertas **distancias de seguridad prescriptivas**, estas **son negociables con los bomberos** si se mantienen **criterios de seguridad mínimos**. Esto es posible gracias a la **competencia técnica y disponibilidad del cuerpo de bomberos**, que están familiarizados con los entornos industriales.

LITUANIA

El proyecto del puerto de Klaipeda es la iniciativa de hidrógeno más avanzada de Lituania. Uno de sus representantes compartió que el plan incluye la construcción de una planta de producción de hidrógeno y una estación de repostaje en el puerto. Esta planta, equipada con un electrolizador de 1,25 MW, producirá unos 531 kg de hidrógeno al día y podrá almacenar 1500 kg. El hidrógeno se dispensará a través de dos puntos: uno para el público en general y otro para los vehículos del propio puerto, incluidos buques híbridos para la gestión de residuos.

Gracias a esta iniciativa, se ha creado un grupo de trabajo para redactar una normativa nacional de hidrógeno en Lituania.

De hecho, Lituania carece de una hoy por hoy. Esto ha conllevado que el proceso de permisos, que abarca seguridad, medioambiente y otros sectores se haya desarrollado de manera *ad hoc* previa consulta con las autoridades pertinentes. Dicho proceso se ha extendido por más de 2 años y medio y está a punto de finalizar.

Cuando la autoridad portuaria propuso dos ubicaciones en 2023, una fue rechazada por el cuerpo de bomberos al considerar que su proximidad a una zona de manipulación de fertilizantes representaba un peligro.

Aspectos clave sobre la seguridad

- Se requería una solicitud formal para utilizar las normas alemanas para la construcción segura de plantas y la gestión segura del trabajo. En concreto, a principios de este año, el Ministerio de Energía publicó un reglamento que permite el uso de normas alemanas para el diseño técnico de proyectos relacionados con el hidrógeno. Los estándares que se pueden aplicar son los siguientes:



- **Directrices para la instalación de estaciones de repostaje de hidrógeno** (en alemán: *Genehmigungleitfaden Wasserstoff-Tankstellen*).
 - **Requisitos generales de seguridad para estaciones de repostaje de hidrógeno** según la norma ISO 19880-1:2020 (en inglés: *Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 1: General requirements*).
 - **Anexo 1 de la Ordenanza Alemana sobre Sustancias Peligrosas** (en alemán: *Gefahrstoffverordnung*);
 - **TRGS 720: Mezclas explosivas peligrosas: información general** (en alemán: *Gefährliche explosionsfähige Gemische – Allgemeines*).
 - **TRGS 727: Prevención de riesgos de ignición por cargas electrostáticas** (en alemán: *Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen*);
 - **TRGS 745: Contenedores portátiles de gas comprimido: llenado, almacenamiento, transporte interno y vaciado** (en alemán: *Ortsbewegliche Druckgasbehälter – Füllen, Bereithalten, innerbetriebliche Beförderung, Entleeren*).
- Un análisis cuantitativo de riesgos (QRA) fue el punto de partida para exigir, entre otras medidas, una distancia de seguridad de unos 5 metros alrededor de las tuberías de hidrógeno. Este QRA fue necesario porque la normativa de Lituania solo contempla presiones de hasta 200 bares, lo que dejaba un vacío legal para zonas de alta presión.
 - No se solicitó específicamente el uso de cajas o muros de hormigón para separar los equipos, salvo un muro de mitigación de explosiones que protegiera el lado de la terminal.
 - En la actualidad, existen procesos de negociación abiertos en cuanto a nuevas distancias de seguridad.
 - Para identificar cualquier peligro potencial, se exigió un estudio HAZOP.
 - También se organizaron presentaciones públicas para responder a las dudas de la comunidad, en especial las de los grupos ecologistas, dado que expresaron su preocupación por el consumo de agua y el riesgo de explosión. Además, se consultó en repetidas ocasiones a las autoridades locales y se presentaron ejemplos de proyectos del Reino Unido y Japón.



MALTA

En el caso de Malta, no se encontró información sobre procedimientos de seguridad para el hidrógeno ni de normativas generales. En cambio, se han identificado los siguientes elementos de seguridad:

- Ley XXVII de 2000 (y sus enmiendas): Ley de la Autoridad de Salud y Seguridad Ocupacional, Capítulo 424 de las Leyes de Malta.
- S.L. 424.15: Normativa sobre lugares de trabajo (requisitos mínimos de salud y seguridad).
- S.L. 424.19: Normativa sobre el control de los riesgos de accidentes graves.
- S.L. 424.29: Normativa sobre lugares de trabajo (requisitos mínimos de salud y seguridad para el trabajo en obras de construcción), derogada por el aviso legal 88 de 201.

ESLOVAQUIA

HYPOP contactó a un representante de la región de Košice, Eslovaquia. Esta autoridad regional comenzó a trabajar en el hidrógeno hace unos cinco años y ha colaborado en la redacción de una estrategia regional. El representante es ahora el coordinador del recién financiado proyecto **EASTGateH₂ Valley**, cuyo objetivo es instalar **4 MW de producción de hidrógeno electrolítico** y una **HRS**.

Cronograma del proyecto

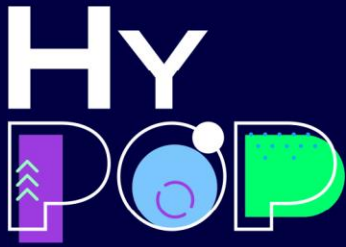
Principalmente, el proyecto se ejecutará en dos fases:

1. **Fase 1:** Instalación del primer electrolizador de 2 MW y preparación inicial para la HRS, que se ubicará en el mismo sitio. Los permisos en esta etapa ya están muy avanzados.
2. **Fase 2:** Instalación de la segunda unidad, también de 2 MW.



Información clave en materia de seguridad

- Aún **no existe un código nacional específico sobre seguridad del hidrógeno**. Por lo tanto, es necesario adoptar un *enfoque individualizado para cada proyecto*.
- El Ministerio de Economía y las asociaciones del sector están trabajando en una nueva normativa.
- En el caso del proyecto actual, la evaluación de los requisitos de seguridad es responsabilidad de la **autoridad de inspección técnica** y del **ayuntamiento**. El **cuerpo de bomberos** también ofrece su apoyo, ya que colabora en la elaboración del plan de gestión de la seguridad y la evaluación de riesgos que forman parte del expediente técnico.



 www.hypop-project.eu

 info@hypop-project.eu

#HYPOPPROJECT



Let's make
the hydrogen
revolution

