



Operación y mantenimiento de equipos electrolizadores de tecnología PEM

TEMA 4:

Seguridad y normativa en instalaciones de hidrógeno

Título del Proyecto: “Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España”.

Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002



“Financiado por la Unión Europea –



NextGenerationEU”

CONTENIDO

TEMA 4: SEGURIDAD Y NORMATIVA EN INSTALACIONES DE HIDRÓGENO	3
4.1 Propiedades del hidrógeno	3
4.1.1 Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno.....	3
4.1.2 Inflamabilidad y explosividad del hidrógeno	4
4.1.3 Riesgos toxicológicos y ambientales.....	5
4.2 Medidas de seguridad en instalaciones de hidrógeno.....	6
4.3 Clasificación de zonas.....	7
4.3.1 Clasificación de zonas.....	7
4.3.2 Método de clasificación por fuentes de escape	9
4.3.3 Identificación de fuentes y determinación del grado de escape.....	9
4.3.4 Velocidad de escape	11
4.3.5 Límite inferior de inflamabilidad	12
4.3.6 Ventilación y dilución.....	12
4.4 Normativa relativa a las tecnologías de hidrógeno.....	13
4.5 Medidas de seguridad en aplicaciones estacionarias.....	15
4.5.1 Aplicaciones estacionarias del hidrógeno	15
4.5.2 Fabricación, diseño y selección de equipos	17
4.5.3 Instalaciones	18
4.5.4 Caso particular de aplicación estacionaria: Hidrogeneras	19
4.6 Medidas de seguridad en aplicaciones móviles.....	21

TEMA 4: SEGURIDAD Y NORMATIVA EN INSTALACIONES DE HIDRÓGENO

4.1 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

La producción, manipulación y aprovechamiento del hidrógeno requiere de medidas de seguridad específicas debido a sus propiedades de este gas y los riesgos derivados de su manipulación. En este apartado se describen las propiedades físico-químicas del hidrógeno más relevantes en relación con los peligros potenciales al trabajar con este gas.

4.1.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es un gas que, bajo condiciones normales, posee una serie de propiedades que requieren precauciones especiales debido a su alta inflamabilidad y capacidad de formar atmósferas explosivas.

Las propiedades del hidrógeno pueden resumirse en las siguientes consideraciones generales:

- **Baja densidad y alta flotabilidad:** El hidrógeno tiene una densidad de $0,0899 \text{ kg/Nm}^3$, lo que equivale a una densidad relativa respecto al aire de 0,07. Esto implica que el hidrógeno es extremadamente ligero y se acumula en la parte superior de los espacios cerrados debido a su elevada flotabilidad. Esta característica debe ser considerada en el diseño de sistemas de ventilación y almacenamiento.
- **Alto coeficiente de difusión:** El hidrógeno posee un coeficiente de difusión de $0,2196 \text{ m}^2/\text{h}$ ($0,61 \text{ cm}^2/\text{s}$) en aire bajo condiciones estándar. Esta alta difusividad permite que el hidrógeno se disperse rápidamente en el aire, lo que puede llevar a la formación de mezclas inflamables si no se controla adecuadamente.
- **Baja viscosidad:** Con una viscosidad de $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ en condiciones estándar, el hidrógeno puede escapar fácilmente a través de pequeñas fisuras y defectos en los recipientes de almacenamiento.
- **Energía de ignición mínima:** La energía de ignición del hidrógeno es muy baja, de solo 0,02 mJ. Esta propiedad subraya la importancia de implementar medidas de seguridad rigurosas para evitar la formación de atmósferas explosivas, ya que cualquier pequeña chispa podría desencadenar una detonación.
- **Llama de alta temperatura y difícil detección:** La llama del hidrógeno alcanza una temperatura de 2045°C y es prácticamente transparente a la luz del día, lo que dificulta su detección visual. Ante una luz tenue, la llama puede presentar un color azulado. La única manera eficaz de detectar la presencia de una llama de hidrógeno fuera de las conducciones es mediante un sistema de detección apropiado.

Se resumen en la tabla a continuación las propiedades físico-químicas del hidrógeno:

HIDRÓGENO CAS: 1333-74-0	
INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA	
Estado físico; aspecto Gas inodoro incoloro Peligros físicos El gas se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas. El gas es más ligero que el aire. Peligros químicos El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. Reacciona violentamente con halógenos, materiales oxidantes y grasas. Esto genera peligro de incendio y explosión. Los metales catalizadores tales como el platino o el níquel aumentan este tipo de reacciones.	Fórmula: H ₂ Masa molecular: 2.0 Punto de ebullición: -253°C Punto de fusión: -259°C Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.07 Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 560°C Límites de inflamabilidad, % en volumen en el aire: 4-75 Presión de vapor, KPa a 25°C: 165320 Solubilidad en agua, mg/l a 21°C: 1.62 (muy escasa)

Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno.

Fuente: [Fichas Internacionales de Seguridad Química \(ICSCs\). International Labour Organization.](#)

Algunas definiciones de interés son las siguientes:

- **Densidad de un gas relativa al aire:** Para establecer la densidad de un gas, se utiliza como referencia la densidad del aire, que a temperatura y presión normales (0 °C, 1atm) es: 1,2928 kg/m³.

$$\text{Densidad relativa (adimensional)} = \frac{\text{Densidad gas a } 0^{\circ}\text{C } 1\text{atm (Kg/m}^3\text{)}}{1,292 \text{ (Kg/m}^3\text{)}}$$

- **Límite Inferior de inflamabilidad (LII):** concentración mínima de gas en el aire por debajo de la cual el fuego no es posible.

- **Límite Superior de inflamabilidad (LSI):** máxima concentración de gas en el aire por encima de la cual el fuego no es posible.

4.1.2 INFLAMABILIDAD Y EXPLOSIVIDAD DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es inflamable en concentraciones que varían entre el 4% y el 75% en mezcla con aire. Aunque este rango es amplio en comparación con otros combustibles típicos, el límite inferior de inflamabilidad es considerablemente mayor que el del butano (1,6%) o la gasolina (1%). La alta difusividad del hidrógeno dificulta la acumulación hasta alcanzar la concentración mínima inflamable en entornos abiertos o ventilados.

La temperatura de autoignición del hidrógeno es de 571°C, significativamente más alta que la de la gasolina (280°C) y el diésel (257°C). Esto reduce la probabilidad de ignición accidental en ausencia de una fuente de ignición externa.

En cuanto a su potencial explosivo, el hidrógeno puede detonar en concentraciones entre el 18,3% y el 59% en volumen. El límite inferior de explosividad del hidrógeno es superior al de otras sustancias como el gas natural (4,4%) o los vapores de gasolina (1,4%). Además, la baja densidad del hidrógeno resulta en una menor densidad energética en caso de explosión, reduciendo así la energía liberada y, por ende, los daños potenciales.

A pesar de los riesgos específicos asociados al uso del hidrógeno como combustible, estos no superan en peligrosidad a otros combustibles comúnmente utilizados en la industria, la automoción o los hogares. Sin embargo, es fundamental implementar medidas de seguridad para asegurar un manejo seguro de este gas.

Definición de Atmósfera Explosiva (ATEX)

Una atmósfera explosiva (ATEX), se define, según el Real Decreto 144/2016, como "la mezcla con aire, en condiciones atmosféricas, de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en la que, tras una ignición, la combustión se propaga hacia la totalidad de la mezcla no quemada".

Para que una sustancia genere una atmósfera explosiva es necesario que alcance una concentración comprendida entre el LII: límite inferior de inflamabilidad, y el LSI: Límite superior de inflamabilidad. En el caso del hidrógeno, estos límites comprenden del 4 al 75% de hidrógeno en el aire, expresado como porcentaje en volumen.

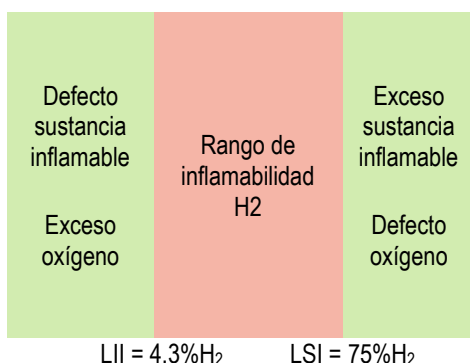


Ilustración 1: Rango de inflamabilidad del hidrógeno. Fuente: Elaboración propia.

Peligrosidad de la ATEX generada

Una vez identificada la posibilidad de formación de ATEX, para acabar de ponderar el riesgo de esta atmósfera explosiva se debe saber si esta ATEX es potencialmente generadora de una explosión peligrosa o solo de una deflagración atmosférica. Si bien ambos casos tienen riesgo, la explosión lo es más; la diferencia la marca si esta ATEX se genera en un recipiente o en un ambiente o espacio abierto.

Si una ATEX está en un recipiente, al inflamarse, producirá una combustión será sumamente rápida y se liberará mucha energía en forma de calor (aumento de temperatura) en el interior del recipiente, el cual, al tener un volumen acotado, no permitirá expandirse a los gases y, por tanto, aumentará la presión hasta que el recipiente no resista y "explote". Este es el mayor riesgo asociado a las ATEX.

Las consecuencias de esta explosión serán mayores cuanto más volumen tenga el recipiente, cuanto mayor presión alcance antes de explotar, según su ubicación, etc. El tamaño del recipiente también condiciona los efectos de la explosión: uno pequeño se podrá llegar a saturar fácilmente de combustible y uno grande tendrá la dificultad de conseguir una mezcla homogénea de una gran cantidad necesaria de combustible, ya que la máxima explosividad se da en la mayoría de sustancias a concentraciones de entre 750 y 1.250 g/m³.

4.1.3 RIESGOS TOXICOLÓGICOS Y AMBIENTALES

El hidrógeno es incoloro, inodoro, insípido y no tóxico. Sus efectos sobre el ser humano se manifiestan únicamente cuando su concentración es suficientemente alta para causar asfixia. Su llama, de color azul pálido y casi invisible, y la producción de agua como único subproducto de su combustión, minimizan los efectos dañinos sobre las personas y el medio ambiente.

4.2 MEDIDAS DE SEGURIDAD EN INSTALACIONES DE HIDRÓGENO

La manipulación y uso del hidrógeno gas conllevan riesgos de ignición y explosión debido a sus propiedades físico-químicas. En este apartado se detallan una serie de medidas de seguridad preventivas diseñadas para minimizar estos riesgos y garantizar un entorno de trabajo seguro.

Sistemas de ventilación

Dada la alta reactividad del hidrógeno y la baja energía requerida para que una mezcla de hidrógeno y aire alcance sus límites de inflamabilidad, es indispensable implementar estrategias de seguridad para evitar concentraciones inflamables o explosivas. Para ello, el hidrógeno se deberá utilizar en espacios con una ventilación adecuada capaz de evacuar rápidamente cualquier fuga de gas, evitando así la acumulación de hidrógeno en niveles peligrosos.

Sistemas de detección y corte

Debido a las características del hidrógeno gas, que lo hacen casi imperceptible para las personas (incoloro, inodoro), es necesario contar con medios de detección. Estos sistemas suelen consistir en detectores conectados a una central de control que puede activar alarmas sonoras o visuales, y en algunos casos, poner en marcha automáticamente sistemas de venteo o extracción, o detener equipos que pudieran estar provocando la fuga. Estos sistemas son fundamentales para la detección temprana de fugas y la prevención de incidentes graves.

Los sistemas de detección y corte de fugas deben cumplir unos requisitos mínimos de acuerdo con las normas de aplicación: UNE-EN 50194-1, UNE-EN 50244, UNE-EN 60079-29-1 y UNE-EN 60079-29-2.

Los detectores deben activarse antes de alcanzar el 30 % del LII del gas en cuestión. El número de detectores será de un mínimo de dos y de uno por cada 25 m² de planta de la sala.

Deberán instalarse en función de la densidad relativa del gas:

- Más pesados que el aire, a 20 cm del suelo, con protección de golpes.
- Más ligeros que el aire (caso del hidrógeno), a 30 cm del techo o en el propio techo, sin obstáculos y nunca cerca del flujo de aire; tener en cuenta la instalación para los mantenimientos de calibración periódicos. El sistema de detección debe activar el corte.

Inertización

La inertización consiste en reemplazar el aire por un gas inerte, que es un gas que no reacciona con el oxígeno. Los más típicos son el nitrógeno, el CO₂, el vapor de agua, los gases de combustión y los gases nobles, por ejemplo el Argón.

Clasificación de zonas y normativas

En función de las concentraciones posibles de hidrógeno, puede ser necesario clasificar el área de trabajo como "Atmósfera explosiva". En estos casos, deben seguirse las indicaciones de la norma UNE-EN 60079-17, que trata sobre la inspección y mantenimiento de instalaciones eléctricas en atmósferas explosivas. Esto implica tomar precauciones especiales, como el uso de instalaciones eléctricas a prueba de explosiones, vestuario ignífugo y procedimientos seguros para trabajos en caliente.

Diseño de instalaciones de protección contra incendios

El diseño de las instalaciones debe tener en cuenta la carga de fuego que puede representar el hidrógeno almacenado y el efecto del flujo de aire de los sistemas de venteo en la propagación de llamas. Esto incluye la instalación de equipos adecuados para la detección y extinción de incendios, y la consideración de las características específicas del hidrógeno en los planes de protección.

Evaluación de riesgos y protocolos de emergencia

La presencia de hidrógeno debe ser contemplada en todas las evaluaciones de riesgos, procedimientos de trabajo y planes de emergencia y evacuación. Es fundamental definir protocolos específicos para la parada segura de instalaciones en caso de emergencia, asegurando así una respuesta rápida y eficaz ante cualquier incidente

Manejo de botellas de hidrógeno

El hidrógeno es un gas que, bajo condiciones normales, se almacena en tanques o botellas a presión, y en casos excepcionales, en estado líquido a temperaturas extremadamente bajas (alrededor de -253°C).

Las botellas de hidrógeno, debido a su peso y configuración geométrica, presentan riesgos adicionales. La caída de estas botellas puede causar daños significativos, y si están presurizadas, el daño al manorreductor o válvula puede resultar en un efecto de acción-reacción que proyecte la botella, generando peligros adicionales. Es crucial manejar las botellas con extremo cuidado, revisarlas periódicamente para asegurar su buen estado, y utilizar medios específicos para su traslado. Las botellas deben estar siempre aseguradas durante su uso mediante soportes, jaulas o cadenas para evitar que se vuelquen.

4.3 CLASIFICACIÓN DE ZONAS

La correcta **clasificación de zonas** en emplazamientos donde se manejen sustancias inflamables y la implementación de **medidas preventivas** es fundamental para garantizar la seguridad industrial.

La normativa internacional proporciona directrices para la clasificación de zonas en ambientes con riesgo de explosión. Estas zonas se categorizan según la **frecuencia de aparición y duración** de la presencia de atmósferas explosivas.

4.3.1 CLASIFICACIÓN DE ZONAS

Las zonas se clasifican como:

- **Zona 0:** Emplazamiento donde una atmósfera explosiva gaseosa está presente de forma continua, durante largos periodos o frecuentemente.

Ejemplo: interior de un depósito de sustancia inflamable siempre y cuando se almacene con aire; si solo es la sustancia, como pasa en las bombonas de gases, no tendríamos mezcla explosiva y, por tanto, ATEX.

- **Zona 1:** Emplazamiento donde es probable la presencia ocasional de una atmósfera explosiva gaseosa en funcionamiento normal.

Ejemplo: se consideran dónde aparece atmósfera explosiva gaseosa cuando realizamos alguna tarea habitual y normal. Podría tratarse de la apertura de un recipiente de un gas o líquido para su uso, dosificación o extracción.

- **Zona 2:** Emplazamiento donde no es probable la presencia de una atmósfera explosiva gaseosa en funcionamiento normal, pero si se genera, persiste solo durante un corto periodo.

Ejemplo: atmósferas que pudieran aparecer de forma improbable debido a fuentes de escape no evitables. Las roturas accidentales no se consideran.

- **Zona desclasificada:** las actuaciones sobre las fuentes de escape derivan hacia la eliminación del riesgo. Por eso es necesario que en los procesos o puntos donde puedan producirse los escapes estén debidamente ventilados, ya sea naturalmente o artificialmente, y poder así desclasificar el emplazamiento. Las actuaciones típicas de desclasificación son:
 - Ventilación por soplado o por aspiración.
 - Detección con actuación automática (ventilación o corte de suministro).
 - Protocolos de manipulación.

La clasificación de zonas se basa en determinar la **presencia de fuentes de escape y en la probabilidad de que se puedan formar mezclas explosivas gas/aire o polvo/aire**. Y también el **grado de frecuencia** en la que se pueden producir la formación de atmósferas explosivas, ya que el mismo proceso que se realice continuamente o que se realice esporádicamente puede dar lugar a zonas diferentes y, en consecuencia, a medidas diferentes.

Se tiene que evaluar la **frecuencia, el impacto y la duración que puede tener un escape (continuo, primario y secundario)**, teniendo en cuenta la **tasa de escape, la concentración, la ventilación y otros factores** que pueden afectar el resultado de la fuga, describiendo el tipo y la extensión de la zona tanto de la atmósfera explosiva gaseosa o de polvo que se pueden llegar a provocar.

Teniendo en cuenta la evaluación de los factores anteriores, que se estudiarán con detenimiento en los siguientes apartados, se realiza la clasificación de la zona según la siguiente tabla:

Grado de escape	Efectividad de la ventilación						
	Dilución alta			Dilución media			Dilución baja
	Disponibilidad de la ventilación						
	Buena	Justa	Pobre	Buena	Justa	Pobre	Buena, justa, o pobre.
Continuo	No peligrosa (Zona 0 ED)	Zona 2 (Zona 0 ED)	Zona 1 (Zona 0 ED)	Zona 0 rodeada por No Zona	Zona 0 rodeada por Zona 2	Zona 0 rodeada por Zona 1	Zona 0
Primario	No peligrosa (Zona 1 ED)	Zona 2 (Zona 1 ED)	Zona 2	Zona 1 rodeada por No Zona	Zona 1 rodeada por Zona 2	Zona 1 rodeada por Zona 2	Zona 0 o Zona 1
Secundario	No peligrosa (Zona 2 ED)	No peligrosa (Zona 2 ED)	Zona 2	Zona 2 rodeada por No Zona	Zona 2 rodeada por No Zona	Zona 2 rodeada por No Zona	Zona 0 o Zona 1

ED: Zona teórica de extensión despreciable.

Tabla 2: Clasificación de zonas ATEX. Fuente: Elaboración propia.

Según se indica en el Real Decreto 681/2003, los procesos industriales se deben diseñar para que los emplazamientos sean no peligrosos para los trabajadores o, en última instancia, zona 2. Por ello, es una obligación legal desclasificar las zonas siguiendo una metodología y, en el caso que sea inevitable un escape, se debe intentar acotarlo a grado secundario y hacer que la cuantía del escape sea mínima.

Así pues, ante la presencia de un escape, debe actuarse siguiendo los siguientes pasos:

1. Si es posible, **eliminar la fuente de escape**.
2. Cuando no se pueda eliminar la fuente de escape, se **minimizarán las consecuencias del escape**, reduciendo su extensión hasta una deseada ED (extensión despreciable).
3. Si no podemos ni eliminarla ni minimizarla **asumiremos la zona generada**. Cuando no podamos dejar de tener esa fuente de escape, el **correcto dimensionado de los emplazamientos** en los que puedan producirse escapes de sustancias inflamables y **determinar si esta sustancia formará concentraciones dentro del intervalo de explosividad**, es decir, por encima del límite inferior inflamabilidad (LII) y por debajo del límite superior de inflamabilidad (LSI). Un primer estudio nos puede indicar la existencia de una zona, el siguiente paso es ver qué **actuaciones** deben realizarse para **reducir su extensión** o incluso su **eliminación** hasta una ED.

4.3.2 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN POR FUENTES DE ESCAPE

Existen varios métodos para la clasificación de zonas ATEX. Según la norma EN 60079-10-1 puede realizarse:

- Por fuentes de escape.
- Códigos industriales y normas nacionales.
- Métodos simplificados que exageran las extensiones.
- Combinaciones varias de métodos.

El procedimiento basado en las fuentes de escape puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Se **identifican las fuentes de escape**. Se analizan de manera detallada todos los puntos en los equipos y emplazamiento que pueden ser considerados como tales.
2. Se **determina la frecuencia o probabilidad, la velocidad de escape y el grado de escape**. Se calculará en función de las condiciones de proceso y de las sustancias implicadas.
3. Se **evalúan la efectividad de la ventilación, la dilución y el emplazamiento**. Se estudiará la desclasificación del proceso en base a la distribución de los diferentes tipos de aberturas y/o ventilación.
4. **Se determina el tipo de zona**. Se crea una zona alrededor de la fuente de escape o pudiendo llegar a desclasificarla.
5. **Se determina la extensión de la zona**. Se delimita el alcance efectivo que puede tener el escape de gas alrededor del punto de estudio, siendo esta extensión el objeto de cálculo.

4.3.3 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES Y DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ESCAPE

Grado de escape

Es fundamental determinar qué elementos del proceso tienen en su interior sustancias inflamables, cuáles pueden originar una fuente de escape y evaluar el grado de escape:

- **Grado continuo:** continuo o frecuente o por periodos largos.
- **Grado primario:** periódico u ocasional en funcionamiento normal.
- **Grado secundario:** infrecuente, no se espera en funcionamiento normal.

Simultaneidad de escapes

Si se pueden dar más de un escape y sumar los escapes, para ello es fundamental el conocimiento del funcionamiento de la instalación. Por ejemplo, en una instalación pueden producirse escapes de grado primario simultáneamente, aunque en la práctica esto se suele impedir.

Ejemplo: En una zona de descarga de líquidos inflamables se impide la descarga simultánea de cisternas o se mantienen distancias para que los escapes no se solapen.

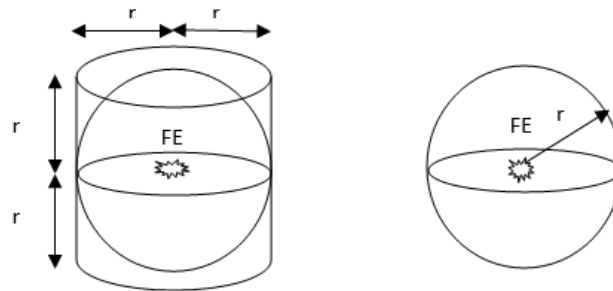
En caso de que puedan llegar a simultanear, se sigue el siguiente criterio de suma de totales:

- **Grado de escape continuo total:** suma de los escapes continuos individuales.
- **Grado de escape primario total:** suma de algunos escapes primarios individuales combinada con el escape continuo total.
- **Grado de escape secundario total:** mayor de los secundarios combinado con el escape primario total.

Ejemplos de fuentes de escape:

- Válvulas de sobrepresión de depósitos, purgadores y puntos de drenaje.
- Puntos de muestreo.
- Sellos de bombas, compresores y válvulas, donde se esperan escapes en funcionamiento normal. Fuentes de escape de grado secundario, las anteriores pero que no se espera en funcionamiento normal.
- Bridas y uniones de conducciones en las que no se esperan escapes. En función de la sustancia, pueden ser más o menos. Estos escapes pueden eliminarse fácilmente mediante ventilación y controles de mantenimiento de estanqueidad.

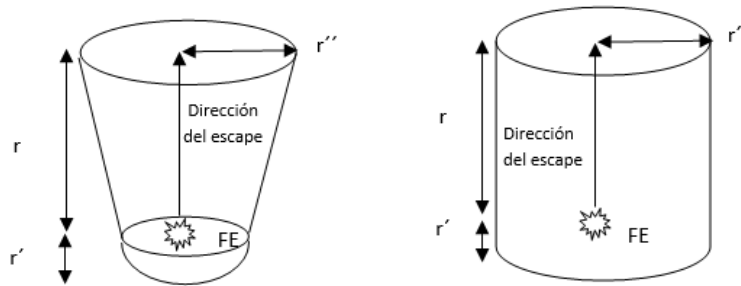
Formas sugeridas por EN 60079-10-1 Para gas / vapor a baja presión:



FE: fuente de escape
r: extensión principal del emplazamiento peligroso.

Ilustración 2: Formas de escape sugeridas por EN 60079-10-1 para gas/vapor a baja presión. Fuente: Elaboración propia.

Para gas/vapor a alta presión:



FE: fuente de escape
r: extensión principal del emplazamiento peligroso.
r', r'': extensiones secundarias a definir teniendo en cuenta el comportamiento del escape.

Ilustración 3: Formas de escape sugeridas por EN 60079-10-1 para gas/vapor a alta presión. Fuente: Elaboración propia.

Para grados de escape secundarios en la norma EN 60079-10-1 se indica:

Tamaño y radio de la fuente de escape: Para cuantificar una fuente de escape, el valor crítico es el radio del orificio. Determina la velocidad de escape de la sustancia y, en consecuencia, el tipo de y extensión de la zona. La velocidad de escape es proporcional al cuadrado del radio del orificio.

Conocido el grado de escape, se procederá a evaluar las otras características que determinará la **extensión y peligrosidad** de la zona creada, tales como:

- la velocidad y grado de escape
- la concentración (LII)
- ventilación
- otros factores relacionados

4.3.4 VELOCIDAD DE ESCAPE

El valor más importante a la hora de clasificar una zona es la velocidad de escape que puede alcanzar esa fuente, ya que determinará en gran medida la extensión máxima de la zona.

El tamaño de una nube de gas o vapor se determina por la velocidad de escape y la velocidad de dilución. La velocidad de escape se va a ver influenciada por:

- La naturaleza y el tipo de escape.
- La presión del proceso que emana la sustancia. A mayor presión mayor velocidad.
- La concentración de la sustancia inflamable en el medio.

4.3.5 LÍMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD

El otro valor que va a determinar la clasificación es el límite inferior de inflamabilidad. No es lo mismo tener una fuga de hidrógeno, con un LII de 4,4%, ya que podrá alcanzar la concentración más fácilmente, que el amoníaco, con un LII de 15%.

4.3.6 VENTILACIÓN Y DILUCIÓN

La ventilación va actuar como un efecto diluyente de la sustancia inflamable reduciendo la concentración del gas o vapor por debajo del límite inferior de inflamabilidad (LII).

Así, la eficacia de la ventilación dependerá de si la disponibilidad de la ventilación es **buena, justa o pobre**, así como la dilución si es **baja, media o alta**. La eficiencia está directamente asociada al tipo de escape; lo que puede ser bueno para uno no puede llegar a ser suficiente para otro, así que se debe definir bien el tipo de escape. Además de la mencionada velocidad de este escape, existen otros factores que influyen en el tipo y la extensión de zona.

Un gas o vapor que se escape a la atmósfera se mezcla de manera turbulenta y, en menor extensión, se difunde hasta que se dispersa por completo y la concentración llega a ser esencialmente nula. La ventilación natural o artificial favorece la dispersión, es decir, su dilución en el medio y de dispersar más eficazmente un gas escapado. Una velocidad adecuada de ventilación puede reducir el tiempo de persistencia de una ATEX e influir determinadamente en el tipo de zona.

La ventilación tiene dos funciones básicas:

- Aumentar la velocidad de dilución y promover la dispersión para limitar la extensión de la zona.
- Evitar la persistencia de una ATEX influyendo así en el tipo de zona.

La existencia de obstáculos que impidan el movimiento del aire o la ventilación pueden aumentar la extensión de la zona o limitarla dependiendo del sentido del flujo del escape. En la práctica, si esta situación, con obstáculos, se da a una velocidad alta y por cortos periodos de tiempo, no suele tenerse en cuenta, aunque si, si la velocidad es baja y los escapes son por periodos prolongados.

Para las mismas condiciones de escape, cuanto mayor es la ventilación, habrá mayor dilución, y por tanto menor extensión de zona.

Efectividad de la ventilación

Estará condicionada por la cantidad de aire respecto al tipo, la ubicación y la velocidad del escape. La efectividad puede llegar a hacer que un emplazamiento sea no peligroso.

Los criterios para obtener el grado de dilución son dos:

- La velocidad de escape relativa (la velocidad real en relación con el LII en g/m³).
- La velocidad de ventilación (el flujo de aire). Así, la eficacia de un sistema de ventilación dependerá del grado de dilución, de la disponibilidad de la ventilación o del diseño del sistema.

Se reconocen tres grados de dilución:

- **Dilución alta:** actúa eficazmente cerca de la fuente de escape y no permite la persistencia de la ATEX
- **Dilución media:** permite la existencia de una zona mientras hay escape y la elimina una vez finalizado.
- **Dilución baja:** no tiene efectos definitivos con las zonas ni durante, ni después del escape.

Evaluación del grado de dilución

Puede ser **alto, medio o bajo** y depende de la velocidad de la ventilación y de las características del escape.

Criterios para la disponibilidad de la ventilación

Como vamos diciendo, la ventilación en función de su eficacia va a condicionar la peligrosidad de la zona, por ello es crítica la disponibilidad de la misma. Esta disponibilidad cualitativamente se valora en tres niveles: **buena, justa y mala**

- **Buena:** Disponible de manera continua
- **Justa:** Se espera en funcionamiento normal, permitiéndose discontinuidades cortas y poco frecuentes
- **Mala:** Que no cumple con buena o justa, pero que no se espera interrupciones prolongadas

Nota: si la ventilación tiene una disponibilidad escasa no debe considerarse y, por tanto, se tomará un valor dilución baja.

Por norma general, en el interior de los edificios se considerará una disponibilidad de ventilación justa, y no buena, pero si se dota de ventilación artificial la disponibilidad pasará a ser buena.

La ventilación puede ser natural o artificial. La ventilación natural en edificios con aberturas se produce por efecto de los gradientes de temperatura, y llega incluso a considerarse como si estuviera al aire libre si las aberturas son suficientes. Son muy importantes el dimensionado y la distribución de estas aberturas. No obstante, debe considerarse el peor de los casos. Es decir, para una ventilación natural con un grado de ventilación menor lleva a una disponibilidad mayor y viceversa; así consideraremos siempre el peor de los casos.

La ventilación artificial siempre en edificios puede considerarse como buena, pero hay que remarcar que una buena disponibilidad requiere de fiabilidad de los equipos y disponibilidad, que puede requerir soplantes de reserva. Es decir, que en caso de fallo active el soplante de reserva. Aunque en el caso de que impide el escape con la ventilación en funcionamiento, no tiene que modificarse y se puede considerar como disponibilidad buena.

Es más importante una correcta disposición de aberturas de entrada y salida en relación con la fuente de escape que la capacidad de ventilación en sí.

4.4 NORMATIVA RELATIVA A LAS TECNOLOGÍAS DE HIDRÓGENO

La existencia de reglamentación y normativa relativa a las tecnologías del hidrógeno es muy importante para favorecer la introducción de éste en el marco energético actual.

Directivas europeas:

Existen directrices y reglamentos que se deben tener en cuenta en relación con las tecnologías del hidrógeno:

Normativa	Aspecto que se regula
Directiva 1992/92/CE (ATEX)	Seguridad y salud de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas
Directiva 2014/34/UE (ATEX)	Aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas
Directiva 2014/68/UE (EMC)	Compatibilidad electromagnética
Directiva 2012/18/UE	Control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas

Tabla 3: Directivas europeas relacionadas con las tecnologías del hidrógeno

Las directivas anteriores tienen sus correspondientes trasposiciones a nivel nacional, a través de Reales Decretos, instrucciones reglamentarias.

Normas de la Organización Internacional de Estandarización (ISO)

ISO tiene un comité específico para la estandarización relativa al Hidrógeno, el **ISO/TC 197** sobre "**Tecnologías del hidrógeno**". Fue creado por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) en 1990 con el objeto de desarrollar normas en el campo de los sistemas y dispositivos de producción, almacenaje, transporte, medida y uso del hidrógeno. Dentro del comité ISO existen normas de aplicación a tecnologías del hidrógeno entre las que podemos citar las siguientes:

Norma	Título
ISO 13984:1999	Hidrógeno líquido – Interfaz del sistema de abastecimiento de combustible para vehículos terrestres.
ISO 13985:2006	Hidrógeno líquido – Tanques de combustible para vehículos terrestres.
ISO 14687:2019	Calidad del combustible de hidrógeno – Especificación del producto.
ISO/TR 15916:2015	Consideraciones básicas para la seguridad de sistemas de hidrógeno.
ISO 16110-1:2007	Generadores de Hidrógeno usando tecnologías de procesado de combustible. Parte1: Seguridad.
ISO/TS 16111:2018	Dispositivos transportables para almacenamiento gaseoso-hidrógeno absorbido en hidruros metálicos reversibles.
ISO/DIS 17268-1	Conectores de repostaje de hidrógeno comprimido para vehículos terrestres.

Tabla 4: Normas ISO relacionadas con las tecnologías del hidrógeno

Puede consultarse el listado completo de estas normas en la dirección web del [Comité ISO/TC197](#)

Normas de AENOR (UNE)

Generales

Norma	Título
UNE-EN-60079-10-1: 2022	Atmósferas explosivas. Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas explosivas de gas.

Tabla 5: Norma UNE relativa a la clasificación de atmósferas explosivas.

Específicas

En España el comité **CTN 181** "Tecnologías del hidrógeno" adapta las normas ISO que se han comentado anteriormente, siendo éstas, por ejemplo, las siguientes:

Norma	Título
UNE-ISO 19880-1:2022	Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio. Parte 1: Requisitos generales.
UNE-EN ISO 17268:2022	Dispositivos de conexión para el suministro de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres. (ISO 17268:2020).
UNE-EN 17124:2022	Hidrógeno combustible. Especificación de producto y garantía de calidad para los puntos de suministro de hidrógeno que dispensan hidrógeno gaseoso. Aplicaciones que utilizan las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) para los vehículos.
UNE-EN 17127:2022	Puntos de suministro de hidrógeno al aire libre que dispensan hidrógeno gaseoso e incorporan protocolos de llenado.
UNE-ISO 16110-1:2015	Generadores de hidrógeno que utilizan tecnologías de procesamiento de combustibles. Parte 1: Seguridad.
UNE 181001:2010	Tecnologías del hidrógeno. Terminología.

Tabla 6: Normas UNE relacionadas con las tecnologías del hidrógeno

Además, en España el Comité **CTN222** trabaja en la preparación de normas internacionales relativas a las tecnologías de las pilas de combustible.

A nivel nacional, el hidrógeno ha sido incluido en el "Marco de Acción Nacional de Energías Alternativas en el Transporte", publicado en octubre de 2016.

4.5 MEDIDAS DE SEGURIDAD EN APLICACIONES ESTACIONARIAS

4.5.1 APLICACIONES ESTACIONARIAS DEL HIDRÓGENO

Las aplicaciones estacionarias del hidrógeno cubren un amplio rango de actividades, de las que podemos destacar las siguientes:

- **Aplicaciones industriales:** en las que el hidrógeno generado se aprovecha en otros procesos, como por ejemplo en refinerías, industria alimentaria (saturación de grasas), síntesis de amoníaco, industria farmacéutica, electrónica, obtención de agua oxigenada o ácido clorhídrico; o bien como fuente de energía.

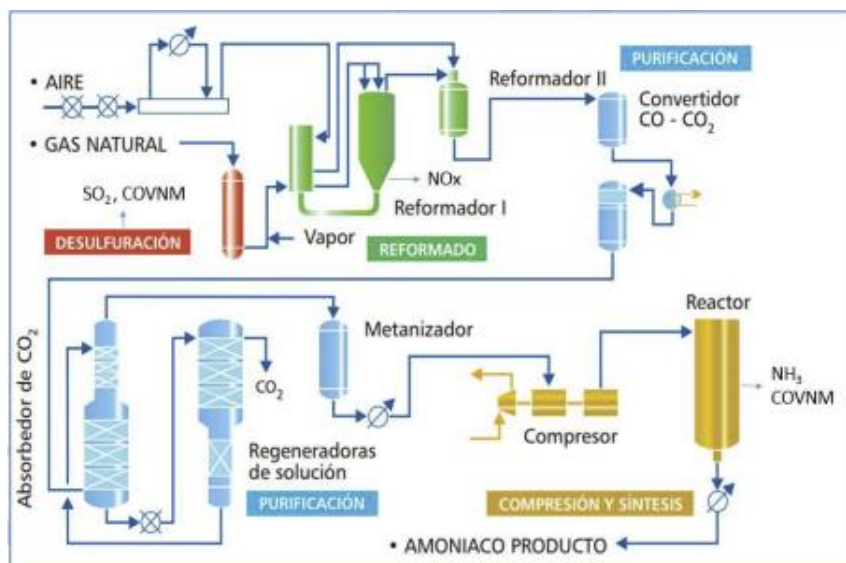


Ilustración 4: Diagrama de proceso de fabricación de amoníaco. Fuente. Fertilberia

- **Aplicaciones de uso doméstico:** para proporcionar electricidad, calor y agua caliente a viviendas individuales, bloques de viviendas, o como generadores de emergencia en comercios, oficinas. Estos sistemas incluyen la generación, el almacenamiento de hidrógeno y la generación de energía mediante pilas de combustible.



Ilustración 5: Equipo comercial para la generación de energía a partir de hidrógeno verde para uso en viviendas. Fuente: Home Power Solutions

- Estaciones de repostaje de hidrógeno (hidrogeneras):



Ilustración 6: Hidrogenera en Corea del Sur. Fuente: www.hidrogeno-verde.es

En todas ellas se deberán tener en cuenta una serie de criterios de seguridad a seguir, tanto en cuestiones de diseño, fabricación, instalación, mantenimiento y operación de los equipos, como en los dispositivos de seguridad necesarios para garantizar el uso seguro de los sistemas de hidrógeno.

4.5.2 FABRICACIÓN, DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

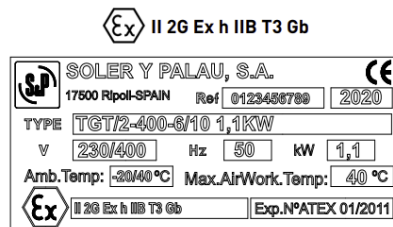
Los equipos utilizados en sistemas de hidrógeno y pilas de combustible deben contar con el **marcado CE**, el cual certifica que el producto cumple con los requisitos mínimos de seguridad y salud establecidos por la legislación.

El fabricante de los equipos debe realizar una **evaluación de riesgos** para identificar los requisitos de salud y seguridad aplicables. Esta evaluación debe ser la base para el diseño y la construcción del equipo, asegurando que se contemplen todas las medidas necesarias para mitigar los riesgos identificados, como pueden ser: riesgos mecánicos, eléctricos, inflamabilidad de gases, incendio y explosiones, y peligros relacionados con la presión.

Para prevenir estos riesgos se deberán implementar las **protecciones adecuadas**. Además, los materiales utilizados en la fabricación deben soportar las condiciones operativas a lo largo de toda la vida útil del equipo.

La **clasificación de zona determinará la categoría** de los aparatos eléctricos a instalar, siguiendo la norma UNE-EN 60079-14:2016. La correcta selección y uso de estos equipos es fundamental para prevenir la combustión de mezclas explosivas. Los equipos deben seleccionarse considerando el modo de protección apropiado, la categoría, el grupo de gas y la temperatura superficial máxima que pueden alcanzar en funcionamiento normal, según la zona en la que se ubiquen.

Cualquier modificación que se lleve a cabo en los equipos o en los procesos que pueda afectar a la clasificación de zonas se debe revisar para asegurar que no afecte a la seguridad de las personas y ni de las instalaciones, actuando en consecuencia. Se debe asegurar que las operaciones habituales, así como las de mantenimiento en las zonas con riesgo de atmósfera explosiva, no modificarán ninguna condición de seguridad de los equipos ni menos de las instalaciones.



- Ex** Cumple la Directiva ATEX
- II** Grupo ATEX Equipo destinado a instalaciones de superficie que no sean minas
- 2G** Categoría 2. Equipo clasificado para ser instalado en atmósfera explosiva de gas - Zona 1
- Ex** Indica que el equipo corresponde a uno o más modos de protección
- h** Tipos de protección contra la explosión para equipos no-eléctricos
- IIB** Grupo de explosión Gas
- T3** Clase de Temperatura Superficial del motor
- Gb** Nivel de Protección del Equipo

Ilustración 7: Izda: Ventilador helicoidal tubular con seguridad ATEX.
Dcha: Marcado del equipo. Fuente: www.solerpalau.com

4.5.3 INSTALACIONES

Control de Riesgos

Para controlar los riesgos asociados con el uso del hidrógeno, se deben tomar las siguientes medidas:

- Evitar fugas de hidrógeno: Implementar sistemas y procedimientos que minimicen la posibilidad de fugas.
- Prevenir la acumulación de atmósferas inflamables: Asegurar una ventilación adecuada para evitar la concentración de hidrógeno en el aire.
- Controlar fuentes de ignición: Identificar y gestionar todas las posibles fuentes de ignición en áreas donde puedan formarse atmósferas inflamables.
- Protección contra incendios y explosiones: Utilizar equipos y materiales que proporcionen una adecuada protección contra estos riesgos.

Ubicación y Diseño de las Instalaciones

Siempre que sea posible, las instalaciones de hidrógeno deben ubicarse en espacios abiertos. Si esto no es viable, las instalaciones interiores deben cumplir con las normativas específicas para tales entornos, asegurando una ventilación adecuada, ya sea natural o forzada, y utilizando barreras contra incendios para separar estas áreas de otras zonas del edificio.

Las instalaciones deben estar protegidas contra el acceso no autorizado y situadas de manera que faciliten el acceso a los bomberos y servicios de emergencia. Además, deben estar equipadas con sistemas de detección de incendios y alarmas.

Detección de Hidrógeno

Debido a que el hidrógeno es incoloro, inodoro e insípido, es esencial contar con sistemas de detección para identificar su presencia en caso de fugas. Los sistemas de detección temprana son necesarios para activar alarmas, iniciar operaciones de seguridad y facilitar la evacuación de personas en caso necesario.

Plan de emergencia

Es fundamental establecer un plan de emergencia para instalaciones que manipulen o almacenen hidrógeno. Este plan debe incluir:

- Descripción y ubicación del equipo de emergencia.
- Programa de pruebas y mantenimiento del equipo de emergencia.
- Identificación de peligros en áreas de almacenamiento.
- Procedimientos de emergencia y ubicación de los mismos.
- Inventario de gases comprimidos y líquidos criogénicos, incluyendo sus hojas de datos de seguridad.
- Plano de la instalación con detalles de zonas de uso, almacenamiento, tuberías, válvulas y dispositivos de emergencia.
- Designación de personal capacitado para actuar como enlace con servicios de emergencia.

Almacenamiento de Hidrógeno

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno deben ubicarse preferentemente en exteriores, evitando temperaturas extremas y asegurando una protección adecuada contra impactos accidentales. Las medidas para prevenir fugas incluyen el uso de depósitos y tuberías que cumplan con la normativa, minimización de conexiones y uniones, y pruebas de presión antes de la puesta en servicio.

Las válvulas de alivio de alta presión deben ventilar hacia lugares seguros, y todas las instalaciones deben ser etiquetadas adecuadamente. Además, es importante purgar los sistemas con un gas inerte, como nitrógeno, para evitar mezclas peligrosas de hidrógeno y aire.

4.5.4 CASO PARTICULAR DE APLICACIÓN ESTACIONARIA: HIDROGENERAS

Una hidrogenera es una instalación en la que se almacenan grandes cantidades de hidrógeno a presiones elevadas, por lo que es de aplicación la normativa **ATEX (1999/92 CE Y 2014/34/UE)** para asegurar la seguridad de las instalaciones.

Los principales riesgos en una hidrogenera son:

- Explosividad e inflamabilidad del hidrógeno: Debido a su bajo punto de inflamación y amplio rango de combustión.
- Probabilidad de fugas: Las altas presiones de almacenamiento aumentan la probabilidad de fugas.
- Deterioro de materiales: El hidrógeno puede causar fragilización en metales, afectando a su integridad
- Fallos en accesorios: Como en válvulas de alivio, discos de ruptura y manómetros
- Operación inapropiada: Errores humanos en la operación y mantenimiento de la instalación pueden provocar incidentes.

En la mayoría de estados miembros de la Unión Europea existe una deficiencia en relación a la normativa que regule el hidrógeno renovable. Es por esta razón que la Comisión Europea contempla como una actuación prioritaria la creación de marco normativo general, que regule la industria y mercado del hidrógeno, común a todos los Estados miembros.

Varias iniciativas legislativas a este nivel se están desarrollando, como las proposiciones de Reglamento y Directiva sobre un mercado común de gases renovables y del hidrógeno, o la proposición de Reglamento UE sobre infraestructura de combustibles alternativos.

A nivel nacional, hay que tomar como referencia los reales decretos (RD) que pueden ser de aplicación:

- Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos, aprobado por **RD 919/2006**. Este RD fue modificado en 2021 a fin de incluir las estaciones de distribución de hidrógeno en forma de gas, las **hidrogeneras**. Además, actualmente es necesario estudiar paso a paso las tramitaciones requeridas en concepto de construcción y puesta en marcha de una instalación de este tipo en cada una de las diferentes comunidades autónomas.

- **Real Decreto 639/2016**, de 9 de diciembre, por el que se establece un marco de medidas para la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos.

Por otro lado, otras normas relevantes son:

La norma **UNE-EN 17127:2022**, sobre puntos de suministro de hidrógeno al aire libre que dispensan hidrógeno gaseoso e incorporan protocolos de llenado, que se complementa con la **ISO/TS 19880-1** sobre estaciones de servicio de hidrógeno gaseoso, la cual consta de las siguientes partes:

- ISO 19880-1:2022: Hidrógeno gaseoso- estaciones de servicio – Parte 1: Requisitos generales, proporciona recomendaciones sobre las características mínimas de diseño para la seguridad y el funcionamiento de estaciones de servicio de hidrógeno gaseoso. Esta norma es aplicable tanto a estaciones públicas como privadas y puede guiar la implementación en vehículos ligeros, autobuses, tranvías, motocicletas y carretillas elevadoras.
- ISO 19880-2: Dispensadores de hidrógeno.
- ISO 19880-3: Válvulas.
- ISO 19880-5: Mangueras de estación de servicio.
- ISO 19880-6: Conectores.

Estas normas detallan los requisitos específicos de diseño y operación para cada componente de la hidrogenera.

Por otro lado, en las normas **SAEJ2601** sobre protocolos de alimentación, se da una guía sobre los siguientes sistemas en una hidrogenera:

- Sistema de producción de hidrógeno.
- Suministro de hidrógeno por tuberías, en camiones de hidrógeno gaseoso y/o líquido, o en remolques de almacenamiento de hidruro metálico.
- Generadores de hidrógeno in situ que utilicen el proceso de electrólisis del agua o generadores de hidrógeno que utilicen tecnologías de procesamiento de combustible.
- Almacenamiento de hidrógeno líquido.
- Sistemas de purificación de hidrógeno.
- Sistemas de compresión de hidrógeno gaseoso.
- Bombas y evaporadores.
- Almacenamiento de hidrógeno gaseoso.
- Dispositivo de preenfriamiento.
- Dispensadores de hidrógeno gaseoso.

Además, se dispone de la norma **UNE-ISO/TS 20100**, "Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio", la cual abarca contenidos generales basados en buenas prácticas de fabricación y normas de seguridad industrial, como la Directiva de Máquinas, las Normas ATEX y la Directiva de Equipos a Presión. Aunque no define procedimientos específicos de repostaje ni nuevas tecnologías aplicadas, proporciona una buena descripción de los procedimientos de parada y emergencia. Esta norma ha sido derogada, pero sigue siendo útil como referencia inicial para el funcionamiento de una hidrogenera.

En el contexto europeo, esta norma establece el diseño mínimo requerido para asegurar la operación segura de los puntos de repostaje de hidrógeno. Esto incluye los protocolos de repostaje para el suministro de hidrógeno gaseoso comprimido a vehículos con pila de combustible de carretera que cumplen con la legislación aplicable.

4.6 MEDIDAS DE SEGURIDAD EN APLICACIONES MÓVILES

En la actualidad, existen numerosas aplicaciones móviles del hidrógeno que están bastante avanzadas. Algunas de ellas, como los coches, ya se encuentran en fase comercial, mientras que otras, como barcos, trenes, camiones, carretillas elevadoras y motocicletas, están en diversos estados de desarrollo.

La aplicación más destacada del hidrógeno es el vehículo de hidrógeno. La seguridad en el uso de estos vehículos comienza con la seguridad del propio hidrógeno, que, al igual que otros combustibles como la gasolina, el diésel o el gas natural, requiere una manipulación adecuada. Los tanques de almacenamiento de hidrógeno están diseñados específicamente para garantizar la seguridad de estos vehículos.

Todos los vehículos de pila de combustible son sometidos a rigurosas pruebas de seguridad, que incluyen evaluaciones de todos sus componentes. Antes de salir al mercado, los vehículos comerciales de hidrógeno deben pasar pruebas de choque frontales, laterales y traseras.

Para garantizar la seguridad del vehículo, se implementan las siguientes medidas:

- Estructura de acero y plástico reforzado con fibra de grado aeronáutico para proteger la pila de combustible.
- Estructura de seguridad contra impactos para proteger los tanques de hidrógeno en caso de accidente.
- Sensores de hidrógeno que activan mecanismos de seguridad a través del sistema de control si se detecta una fuga.
- Mecanismos de venteo para situaciones de emergencia.