



Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

Curso Postgrado **URUGUAY**

4CAP-2024

4

H2 HAZARDS

aprea.infovia@gmail.com

Safety
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

José Luis APREA

FEBRERO 2024



Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

Curso Postgrado **URUGUAY**

CAP-2024

SEGURIDAD H2

aprea.infovia@gmail.com

Safety
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

José Luis APREA

FEBRERO 2024



Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

La reproducción total o parcial de este curso exige que se citen las fuentes

IMPORTANTE

Este curso fue preparado por el autor con fines educativos para contribuir a la formación de los interesados y no otorga ninguna garantía, expresa o implícita, ni asume ninguna responsabilidad legal por la exactitud, integridad o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o declara que su uso no infringiría los derechos de propiedad privada. La referencia en este documento a cualquier producto, proceso o servicio comercial específico por nombre comercial, marca comercial, fabricante o de otro modo no constituye ni implica necesariamente su respaldo, recomendación o favorecimiento por parte del autor o de las instituciones citadas. Ninguna afirmación debe ser considerada como una recomendación comercial ni compromiso por parte del autor. El análisis del presente Informe, sus resultados e implicancias revisten el carácter de sugerencias técnicas especializadas ante un requerimiento específico. No representan compromiso para el autor o las instituciones a las cuales este pertenece, ni relevan a la firma, organismo o consorcio convocante de las responsabilidades legales en materia de seguridad de las instalaciones y de las personas.

Safety
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

José Luis APREA

FEBRERO 2024

OBJETIVOS

- 1 Obtener a través de la capacitación el conocimiento básico de los procesos de producción del hidrógeno y sus aplicaciones
- 2 Identificar el hidrógeno y sus propiedades, especialmente las relacionadas con la seguridad, para poder reconocer los principales riesgos y asegurar la prevención de los mismos.
- 3 Brindar los conocimientos necesarios para considerar los aspectos de seguridad en diferentes tipos de proyectos de investigación y desarrollo.
- 4 Conocer las principales normas relacionadas con el hidrógeno e ilustrar mediante el estudio de casos y recomendaciones los aspectos y medidas de seguridad que deben contemplarse en la operación de sistemas del hidrógeno y en su eventual diseño.



Comisión Nacional
de Energía Atómica

Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

SEGURIDAD

CAP-01

1. INTRODUCCIÓN - MÉTODOS DE PRODUCCIÓN - DEMANDA
2. REFORMADO - ELECTRÓLISIS - OTROS MÉTODOS
3. APLICACIONES - TENDENCIAS

CAP-02

1. INTRODUCCIÓN - PROPIEDADES. IDENTIFICACIÓN DE PRODUCTO
2. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS - EXPLOSIÓN Y DETONACIÓN
3. PÉRDIDAS Y SISTEMAS DE DETECCIÓN

CAP-03

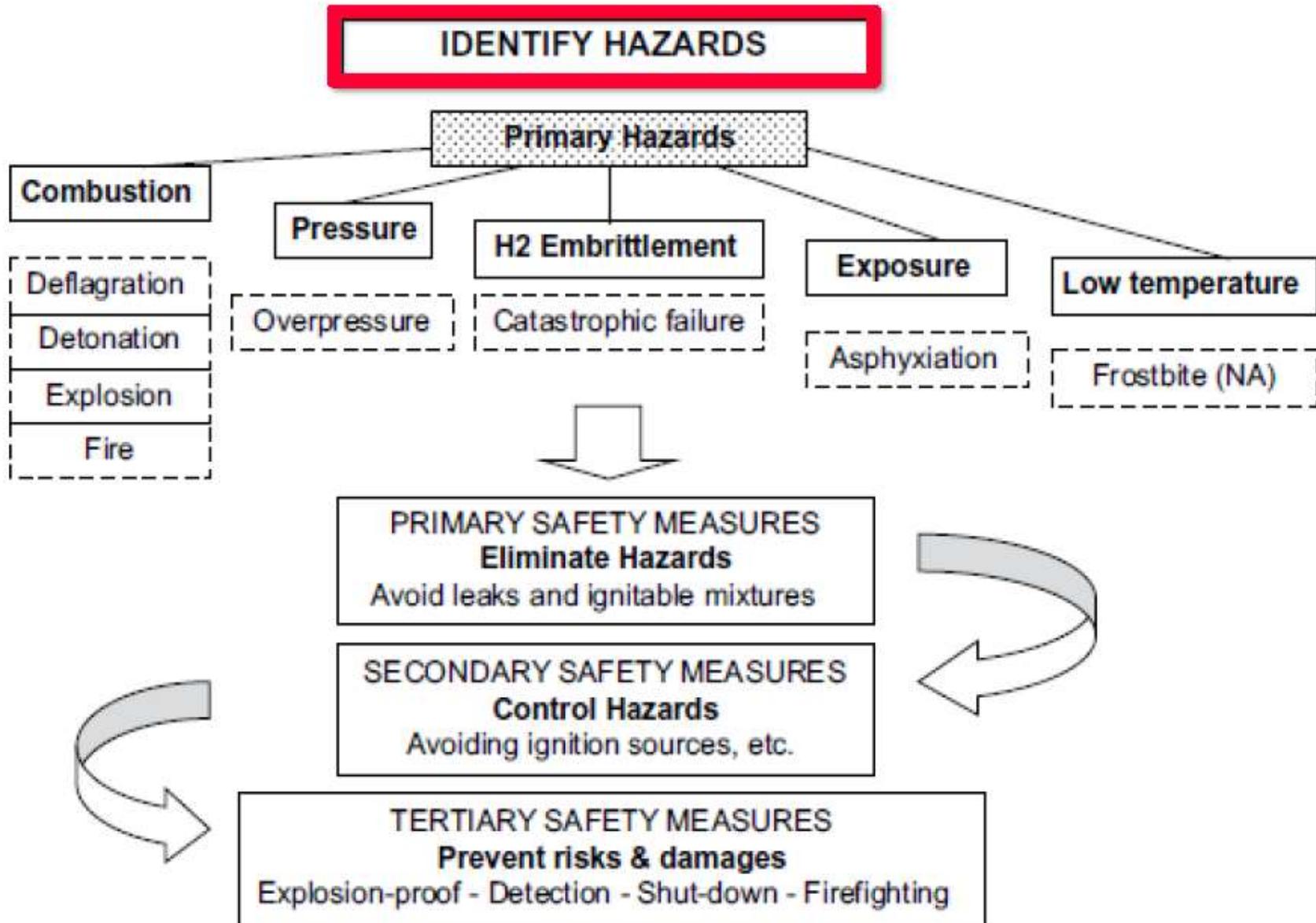
1. ASPECTOS NORMATIVOS - NORMAS DE CALIDAD - ISO 14687
2. ASPECTOS NORMATIVOS - NORMAS DE SEGURIDAD - ISO TR 15916
3. OTROS DOCUMENTOS NORMATIVOS

CAP-04

1. ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS. GUÍAS DE DISEÑO Y RECOMENDACIONES
2. INCIDENTES - ANÁLISIS DE RIESGOS Y PREVENCIÓN DE ACCIDENTES
3. CONCLUSIONES - Q & A



Análisis de Riesgos



PELIGROS ASOCIADOS **Hidrógeno**

Limitaciones

- No existe un enfoque general único respecto a la seguridad del H₂.
- Todos debemos aplicar nuestro propio criterio.

Cuáles son los “peligros del hidrógeno”

- **Peligro: evento o condición que puede resultar en una exposición a daños o pérdidas.**
- Los principales peligros del hidrógeno son:
 - Peligro de combustión (aplicable a todos los gases combustibles)**
 - Peligros por presión (aplicable a todos los depósitos presurizados)**
 - Peligros por bajas temperaturas (en el caso del hidrógeno líquido)**
 - Peligros para la salud (principalmente asfixia)**
 - Peligros de fragilización por hidrógeno**

Riesgo

- Peligro multiplicado por la probabilidad de ocurrencia



RIESGO: Peligro x Probabilidad

RIESGO - RISK

| | | Frequency | | | | | Key (SxF) | |
|----------|------------------|--------------------|--------------|----------------|------------|----------------------|-----------|----------|
| | | Almost Certain (9) | Probable (7) | Occasional (5) | Remote (3) | Extremely Remote (1) | | |
| Severity | Catastrophic (9) | High | High | High | Moderate | Moderate | Risk | Value |
| | Critical (7) | High | High | Moderate | Moderate | Low | High | >45 |
| | Substantial (5) | High | Moderate | Moderate | Low | Low | Moderate | 10 to 45 |
| | Marginal (3) | Moderate | Moderate | Low | Low | Routine | Low | 5 to 9 |
| | Negligible (1) | Moderate | Low | Low | Routine | Routine | Routine | <5 |

- **RIESGO: Peligro x Probabilidad**

- **RISK: Severity x Frecuency**

Inertización de recipientes

1. Dilución con gas inerte.

- Mezcla de gas inerte con H₂ a baja presión.

2. Cambio de presión.

- Presurizar con gas inerte después de la expansión a 1-2 bar.

3. Desplazamiento.

- Aplicación típica en conductos sin instrumentación ni empalmes. El gas inerte expulsa el H₂ u otros gases peligrosos de las tuberías.

RECOMENDACIONES

1. En recipientes e instrumentos que contienen volumen muerto, utilizar siempre el método del cambio de presión.
2. Por motivos prácticos, utilizar un mínimo de 5 cambios de gas inerte antes de llenar un depósito con combustible de hidrógeno (o aire).
3. El método de desplazamiento únicamente se recomienda cuando hay que inertizar recipientes con una geometría sencilla y una relación considerable entre altura y diámetro (p.Ej.. tuberías). El desplazamiento es más eficiente cuando el gas desplazado tienen una densidad distinta al gas desplazador.

El método del cambio de presión

Cuando es necesaria la inertización de sistemas de almacenamiento y tuberías complicados, se recomienda utilizar el método del cambio de presión.

El método del cambio de presión requiere estos pasos:

INERTIZACIÓN

1. **Rebajar la presión del depósito a presión que se vaya a inertizar hasta la presión ambiente.**
2. **Presurizar el depósito a inertizar con gas inerte y dejar que los gases se mezclen.**
3. **Rebajar la presión hasta la presión ambiente.**
4. **Repetir los “cambios de presión” hasta alcanzar la concentración de gas inerte deseada.**

Regla práctica:

Con muchos cambios de presión de “amplitud baja” se logra una mejor inertización que un número menor de cambios de presión de “amplitud alta”, utilizando el mismo volumen de gas inerte.

PELIGROS POR PRESIÓN

La necesidad de almacenar hidrógeno con la mayor densidad de energía posible puede provocar un peligro debido a la presión.

Los peligros por presión pueden deberse a:

- **Liberación brusca de gas comprimido:**
 - Sobrepresión.
 - Ondas expansivas.
 - Metralla.
- **Cambio de fase líquida a gaseosa.**
- **Sobrellenado de depósitos de almacenamiento de hidrógeno.**
- **Fallo del sistema de presurización.**
- **Fallo del sistema de alivio de presión.**
- **Escape inadecuado.**
- **Fuego o sobrecalentamiento por una fuente externa.**
- **Explosiones químicas.**

Peligro de asfixia

El oxígeno es esencial para mantener el metabolismo del cuerpo humano.

- El aire ambiental posee un contenido de oxígeno (O₂) del 21% de volumen en nitrógeno (N₂), un gas inerte.
- Con un contenido de oxígeno inferior al 15% del volumen, la capacidad de los humanos de trabajar se reduce.
- Con un contenido de oxígeno inferior al 10% del volumen, las personas pueden perder la conciencia sin síntomas previos.
- Con un contenido de oxígeno inferior al 6% del volumen, cabe esperar que se produzca la muerte en cuestión de minutos.

La asfixia es causada por una falta de oxígeno en la atmósfera.

- **Hidrógeno.**
- **Gas de purga inerte.**

El cuerpo humano no detecta la falta de oxígeno en la atmósfera.

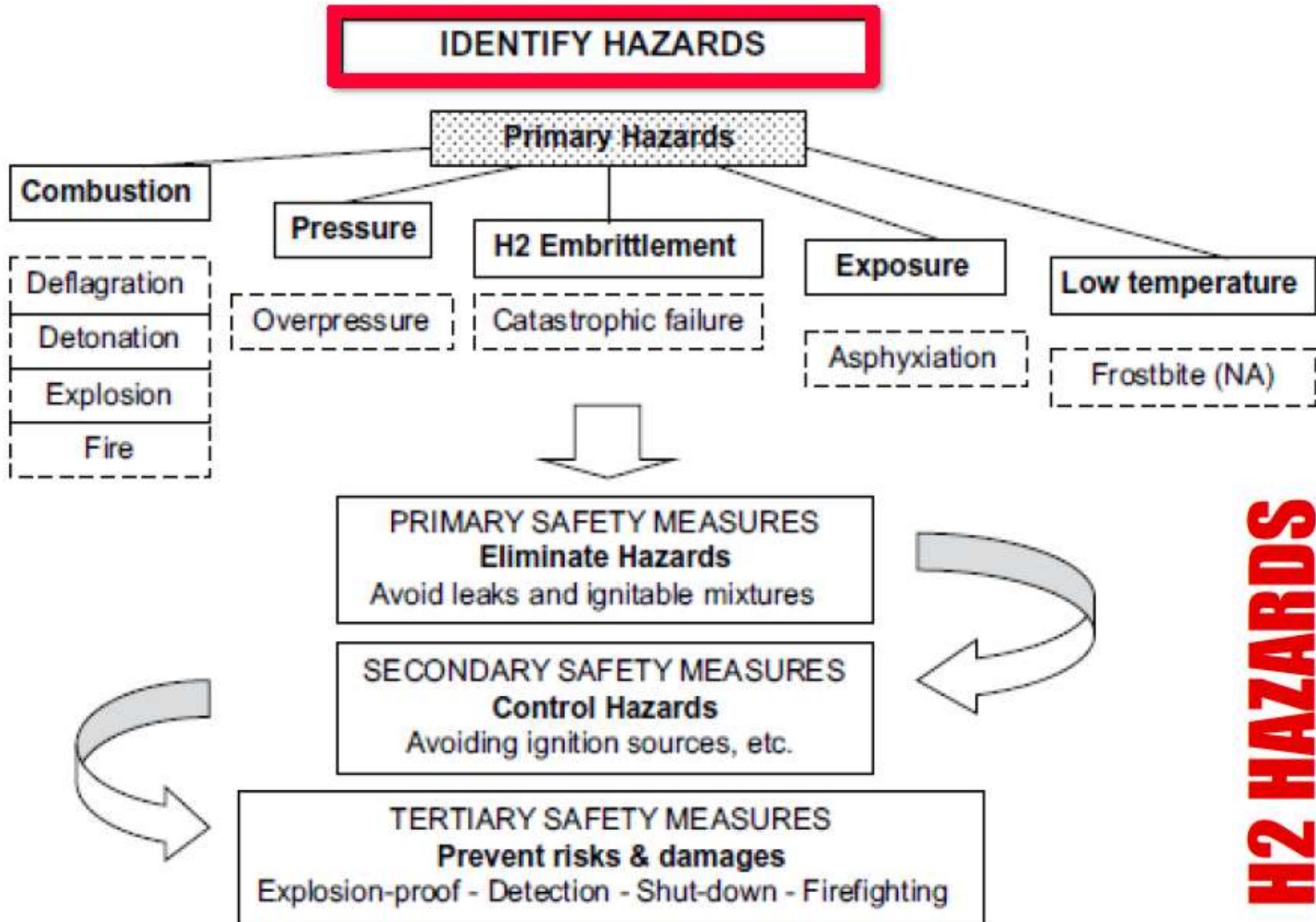
La asfixia puede sobrevenir repentinamente, sin síntomas previos.

ASFIXIA

Cualquier reducción en el contenido normal del oxígeno en la atmósfera de respiración debe ser considerado un peligro

| Nivel de O₂ | Síntomas de la asfixia para bajos niveles de oxígeno |
|-------------------------------|---|
| 18% - 19,5% | Puede afectar el rendimiento físico e intelectual sin el conocimiento de la persona |
| 15% - 18% | Disminución de la capacidad para trabajar. Puede perjudicar la coordinación y puede inducir síntomas en personas con problemas coronarios, pulmonares o circulatorios. |
| 12% - 15% | Respiración profunda, aumento de la frecuencia del pulso, y problemas de coordinación, percepción y juicio |
| 10% - 12% | Nuevo incremento de la frecuencia y profundidad de la respiración, mayor aumento de la frecuencia del pulso, falta de rendimiento, mareos, falta de juicio, labios azules |
| 8% - 10% | Insuficiencia mental, náuseas, vómitos, desmayo, cara pálida y labios azules |
| 6% - 8% | Pérdida de la conciencia en pocos minutos, la reanimación es posible sólo si se lleva a cabo de inmediato |
| 0% - 6% | Pérdida del conocimiento casi inmediato, sobreviene la muerte; daño cerebral aunque se rescate . Estado de coma en 40 segundos. |

Análisis de Riesgos



ESTRATEGIAS DE PROCESOS PARA LA SEGURIDAD

DISEÑO DE PLANTA

| | TIPO | EJEMPLOS |
|--|----------|------------------|
|  Generalmente más confiable | 1 | INHERENTE |
| | 2 | PASIVO |
| | 3 | ACTIVO |
| | 4 | PROCESAL |

| | | |
|----------|------------------|--|
| | TIPO | EJEMPLOS |
| 1 | INHERENTE | Elimina el peligro mediante el uso de materiales y condiciones de proceso no peligrosos Sustitución de un líquido inflamable como disolvente por agua |
| 2 | PASIVO | Características de diseño de procesos o equipos que reducen el riesgo sin el funcionamiento activo de ningún dispositivo Diseño robusto de recipientes a presión o construcción resistente a explosiones |
| 3 | ACTIVO | Controles de ingeniería Detención de una bomba mediante un interruptor de nivel alto cuando el tanque está lleno al 90% |
| 4 | PROCESAL | Controles administrativos a través de procedimientos Permisos de trabajo en caliente, acceso a áreas confinadas o planes de emergencia |

SEGURIDAD INHERENTE

DISEÑO DE PLANTA

SEGURIDAD

SAFETY

| | ACCIÓN | EJEMPLOS |
|----------|------------------------------|---|
| 1 | INTENSIFICACIÓN | Procesos continuos en lugar de batch |
| 2 | SUBSTITUCIÓN | Cambios de materias primas |
| 3 | ATENUACIÓN | Uso de Tecnologías alternativas |
| 4 | LIMITACIÓN DE EFECTOS | Minimización del volumen de almacenaje |
| 5 | SIMPLIFICACIÓN | Gravedad en lugar de bombeo |

SEGURIDAD

SECURITY

HAZARDS PROTECTION SCHEMES

| CONDICIÓN | ACCIONES - ESQUEMA DE PROTECCIÓN |
|--|---|
| Hidrógeno actuando como asfixiante simple como resultado de una liberación en un espacio cerrado | <ol style="list-style-type: none">1. Limite el almacenamiento de hidrógeno en interiores2. Utilice detectores para identificar emisiones3. Use ventilación para asegurarse de que la liberación no se acumule4. Apague el sistema si se detecta una liberación y active la alarma visual y audible5. Evacue el espacio en caso de condición de alarma |
| Evento de sobrepresión de hidrógeno sin ignición | <ol style="list-style-type: none">1. PRDS para prevenir eventos de sobrepresión catastróficos2. Separar al personal de posibles situaciones de sobrepresión3. Pruebas y mantenimiento para garantizar que los sistemas de alivio de presión funcionen4. Zonas de clasificación eléctrica |
| Liberación de hidrógeno con ignición y fuego | <ol style="list-style-type: none">1. Ventilación de hidrógeno a un lugar seguro2. No hay materiales inflamables en el área de ignición de llama |
| Liberación de hidrógeno con ignición en un espacio cerrado o parcialmente cerrado que resulta en una explosión | <ol style="list-style-type: none">1. Limite el almacenamiento de hidrógeno en interiores a cantidades tales que cualquier liberación no tenga energía suficiente para explotar2. No se permite el almacenamiento de hidrógeno en espacios confinados sin ventilación |

HYDROGEN SAFETY CHECK LIST

OPERACIÓN - MANTENIMIENTO

A lo largo de la vida útil de un sistema de hidrógeno, las listas de verificación son un enfoque recomendado para que los trabajadores garanticen y documenten que se cumplen los requisitos de personal, transferencia y almacenamiento, y de examen e inspección del sistema.

La lista de verificación debe:

- Incluir equipos específicos utilizados en el sistema o en la instalación.
 - Los elementos de la lista de verificación pueden incluir, por ejemplo, la posición de la válvula (abierta o cerrada) durante una operación de transferencia y el EPP usado por el personal.
 - las listas de verificación también deben confirmar que los sistemas de detección de fugas y alarma contra incendios estén en buen estado de funcionamiento y que los registros de mantenimiento estén actualizados.
- Requerir que se completen operaciones específicas relacionadas con la seguridad y que los parámetros estén dentro de límites seguros por ejemplo,
 - Las cantidades de materiales utilizados en el sistema deben revisarse y documentarse en la lista de verificación

HYDROGEN SAFETY CHECK LIST

OPERACIÓN - MANTENIMIENTO

| FACILITY NAME | | | FACILITY ID NUMBER | | | DATE | | | |
|---------------|--|------|--------------------|------|----------|---|------|-----|------|
| SECTION | ITEM | CODE | VIO | PASS | SECTION | ITEM | CODE | VIO | PASS |
| 2-12 | DISPENSER VIOLATION | H37 | | | 3-5, 5-1 | BREAKAWAY ON HOSE | H44 | | |
| 3-4, 7-2 | DISPENSER LOCATION | H36 | | | 5-5, 5-4 | BONDING | H52 | | |
| 3-4, 7-2.3 | DISPENSER PROTECTED; DAMAGE/SECURED | H35 | | | 4-6.1 | EMERGENCY SHUTDOWN INSTALLED | H45 | | |
| 7-2 | NO SMOKING, STOP MOTOR, CONTAINER | H55 | | | 7-2.14 | AUTOMATIC STOP FLOW NOZZLE | H46 | | |
| 7-2.13 | REMAIN OUT OF VEHICLE IN VIEW OF NOZZLE (LIQUID ONLY) | H38 | | | 7-2 | HAZARD ANALYSIS | H47 | | |
| 7-5.3 | SIGNAGE FOR EMERGENCIES | H39 | | | 7-6 | EMERGENCY SHUTOFF DEVICE, 10 FEET TO 100 FEET | H48 | | |
| 7-4.4 | OPERATING INSTRUCTIONS POSTED | H42 | | | | | | | |

INSPECTOR NAME

Department of Licensing and Regulatory Affairs, Bureau of Fire Services

HYDROGEN SAFETY CHECKLIST

| Reconocer peligros y definir medidas de mitigación | | |
|--|---|---|
| 1 | Identificar riesgos como inflamabilidad, toxicidad, asfixias, materiales reactivos, etc. | ✓ |
| 2 | Identificar peligros potenciales de instalaciones adyacentes y actividades cercanas. | ✓ |
| 3 | Abordar fallas comunes de componentes como fugas en accesorios, posiciones de falla de válvulas (abiertas, cerradas o últimas), fugas de válvulas (a través del asiento o externas), desviaciones o fallas de instrumentación, fallas de hardware y software de control y cortes de energía | ✓ |
| 4 | Considere fallas poco comunes, como una válvula de retención que no controla, una válvula de alivio atascada en posición abierta, una válvula de bloqueo atascada en posición abierta o cerrada y rotura de tuberías o equipos | ✓ |
| 5 | Considere válvulas/estranguladores de exceso de flujo del tamaño de las fugas de hidrógeno. | ✓ |
| 6 | Definir contramedidas para proteger a las personas y los bienes | ✓ |
| 7 | Siga los códigos y estándares aplicables | ✓ |

HYDROGEN SAFETY CHECKLIST

| Approach | Examples of Actions |
|---|---|
| Recognize hazards and define mitigation measures | <input type="checkbox"/> Identify risks such as flammability, toxicity, asphyxiates, reactive materials, etc. |
| | <input type="checkbox"/> Identify potential hazards from adjacent facilities and nearby activities |
| | <input type="checkbox"/> Address common failures of components such as fitting leaks, valve failure positions (open, closed or last), valves leakage (through seat or external), instrumentation drifts or failures, control hardware and software failures and power outages |
| | <input type="checkbox"/> Consider uncommon failures such as a check valve that does not check, relief valve stuck open, block valve stuck open or closed and piping or equipment rupture |
| | <input type="checkbox"/> Consider excess flow valves/chokes to size of hydrogen leaks |
| | <input type="checkbox"/> Define countermeasures to protect people and property |
| | <input type="checkbox"/> Follow applicable codes and standards |
| Isolate hazards | <input type="checkbox"/> Store hydrogen outdoors as the preferred approach; store only small quantities indoors in well-ventilated areas |
| | <input type="checkbox"/> Provide horizontal separation to prevent spreading hazards to/from other systems (especially safety systems that may be disabled), structures and combustible materials |
| | <input type="checkbox"/> Avoid hazards caused by overhead trees, piping, power and control wiring, etc. |
| Provide adequate access and lighting | Provide adequate access for activities including: |
| | <input type="checkbox"/> Operation, including deliveries |
| | <input type="checkbox"/> Maintenance |
| | <input type="checkbox"/> Emergency exit and response |

HYDROGEN SAFETY CHECKLIST

| Approach | Examples of Actions |
|---|--|
| Design systems to withstand worst-case conditions | <input type="checkbox"/> Determine maximum credible pressure considering abnormal operation, mistakes made by operators, etc., then design the system to contain or relieve the pressure |
| | <input type="checkbox"/> Contain: Design or select equipment, piping and instrumentation that are capable of maximum credible pressure using materials compatible with hydrogen service |
| | <input type="checkbox"/> Relieve: Provide relief devices that safely vent the hydrogen to prevent damaging overpressure conditions |
| | <input type="checkbox"/> Perform system pressure tests to verify integrity after initial construction, after maintenance, after bottle replacements and before deliveries through transfer connections |
| Protect systems | <input type="checkbox"/> Design systems to safely contain maximum expected pressure or provide pressure relief devices to protect against burst |
| | <input type="checkbox"/> Mount vessels and bottled gas cylinders securely |
| | <input type="checkbox"/> Consider that systems must operate and be maintained in severe weather and may experience earthquakes and floodwater exposures |
| | <input type="checkbox"/> Demobilize vehicles and carts before delivery transfers or operation |
| | <input type="checkbox"/> Protect against vehicle or accidental impact and vandalism |
| | <input type="checkbox"/> Post warning signs |

HYDROGEN SAFETY CHECKLIST

| Approach | Examples of Actions |
|--|--|
| Size the storage appropriately for the service | <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Avoid excess number of deliveries/change-outs if too small<input type="checkbox"/> Avoid unnecessary risk of a large release from an oversized system |
| Provide hydrogen shutoff(s) for isolation | <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Locate automatic fail-closed shutoff valves at critical points in the system (such as storage exit, entry to buildings, inlets to test cells, etc.) to put the system in a safe state when a failure occurs<input type="checkbox"/> Consider redundant or backup controls<input type="checkbox"/> Install manual valves for maintenance and emergencies |
| Prevent cross-contamination | <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Prevent backflow to other gas systems with check valves, pressure differential, etc. |



ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS

Conceptos y enseñanzas

□ CLAVES

- El factor humano es clave en la seguridad
- El conocimiento es clave para la seguridad
- La experiencia es fuente de conocimiento
- La labor profesional es indelegable
- La documentación puede ser imprescindible
- La cultura de seguridad se crea día a día



ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS

Factores que contribuyen

▣ INCIDENTES

- Equipos dimensionados incorrectamente
- Aplicación inapropiada de equipos
- Falta o pérdida de seguridad en los equipos
- Conexión inadecuada de equipos, falla ajuste
- Falla de equipos inducida por el medioambiente
- Falla de equipos inducida químicamente
- Selección incorrecta de material p/ la aplicación
- Control inadecuado de materiales y proveedores



ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS

El Factor Humano

- **Falta de capacitación del personal en equipos o sistemas específicos o escenarios de operación**
- **Personal entrenado inadecuadamente sobre propiedades del hidrógeno o sus consecuencias**
- **Acciones complacientes o falta de atención por parte del personal sobre sistemas de hidrógeno**
- **Personal que no sigue procedimientos escritos o no cumple con normas y reglamentos**

Equipamiento involucrado

- Fallas en discos de ruptura de sistemas de almacenaje de hidrógeno
- Fallas en las válvulas de alivio de tanques o en los transductores de presión
- Fallas en la aislación de recipientes de almacenaje con camisa al vacío
- Sobrepresurización de tanques de almacenaje de hidrógeno por los operadores
- Infiltración de oxígeno/aire en recipientes que contienen hidrógeno provocando condiciones de rango inflamable y potencial para explosiones

ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS



Ventilación

Para evitar acumulación de hidrógeno se debe proveer suficiente ventilación

Siempre se preferirán las instalaciones al aire libre

Las aberturas de salida se localizarán en techos o parte superior de paredes. Las entradas se ubican en la parte baja de paredes exteriores, puertas o portones.

Cuando se concluye que pueden existir pérdidas de H₂ se recomienda usar extracción ó ventilación forzada.

Se debe asegurar con renovación del aire que las concentraciones de hidrógeno no permanezcan en rangos peligrosos bajo ninguna circunstancia.

EXPLOSIONES

Cualquier mezcla inflamable que se ignicione en un espacio confinado puede traer consecuencias dramáticas

| Sobrepresión PSI (kPa) | Efecto sobre la persona |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 (7) | La voltea al suelo |
| 5 (35) | Puede dañar los tímpanos |
| 15 (100) | Puede dañar los pulmones |
| 35 (240) | Umbral para las fatalidades |
| 50 (345) | 50 % de casos fatales |
| 65 (450) | 99 % de casos fatales |

La combustión del hidrógeno es más rápida que la combustión de otros combustibles, pero produce poca sobrepresión en un entorno abierto. En espacios cerrados la ignición del hidrógeno puede dar lugar a la aceleración de la llama y generación de altas presiones capaces de explotar construcciones y expulsar esquirlas

Diseño de procesos

Selección de materiales apropiada para evitar fragilización por hidrógeno.

Diseño de cañerías y recipientes de acuerdo a normas ANSI y ASME.

Calificación y estricto control de calidad de todos los materiales y proveedores.

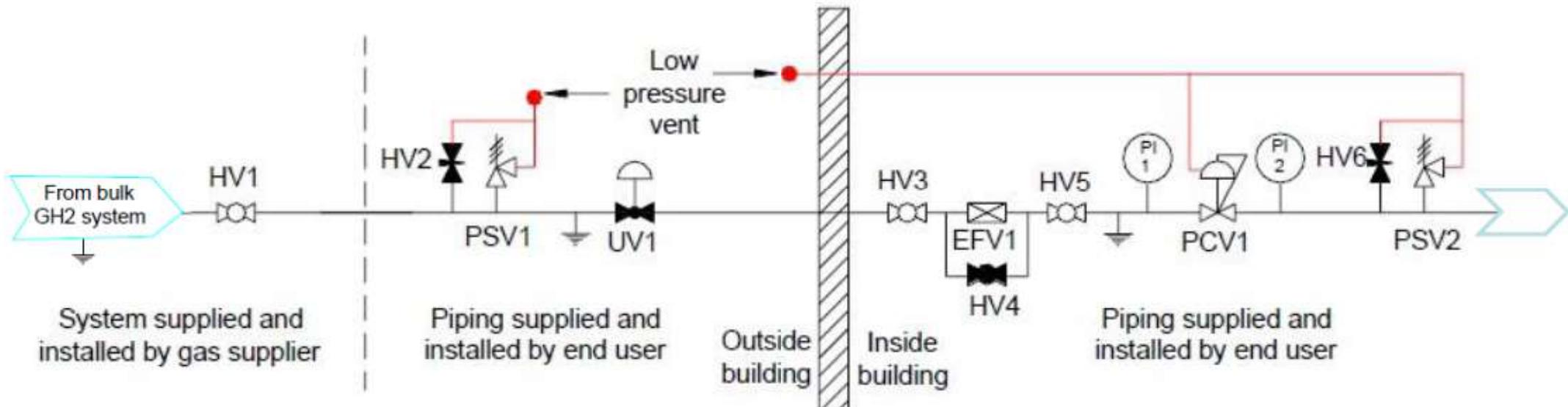
Es fundamental proveer adecuado Control de Calidad en el montaje y commissioning.

Protección por sobrepresión según ASME, mandatoria.



Sistema de Piping Típico

SUMINISTRO DE HIDRÓGENO



ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS

Ventdeo de gases

- 1. Si se produce on-site, el hidrógeno y el oxígeno jamás deben ser venteados en lugares cercanos.**
- 2. Si se emplea N₂ o CO₂ para inertizar debe tenerse presente al ventearlo que es muy peligroso por el riesgo de asfixia y no se lo debe dejar acumular**
- 3. Lo que es estanco para el aire o para el nitrógeno no lo es para el hidrógeno**
- 4. Jamás se debe ventear sobre escaleras, pasillos o lugares donde pueda haber personal ocasionalmente**
- 5. Siempre es preferible hacer las maniobras o tareas de a pares respetando indicaciones del fabricante.**

ASOCIACIÓN ARGENTINA DEL HIDRÓGENO
HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

MSDS
HIDRÓGENO COMPRIMIDO

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN DE INGREDIENTES

3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS – RIESGOS A LA SALUD

4. PRIMEROS AUXILIOS

5. MEDIOS PARA COMBATIR INCENDIOS

6. MEDIDAS EN CASO DE FUGAS Y DERRAMES ACCIDENTALES

7. ALMACENAMIENTO Y MANEJO

8. CONTROL DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

13. COMO ELIMINAR RESIDUOS

14. INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE

15. INFORMACIÓN DE REGLAMENTOS

Manual de Seguridad

1. Listado de riesgos potenciales, prevención y características de seguridad del Hidrógeno.
Carteles de advertencia
2. Áreas de libre ocupación.
Instrucciones de operación remota
3. Necesidades de ventilación sin obstrucción. Start-up / Shut-down
4. Instrucciones de limpieza, cambios de filtros. Inundaciones
5. Verificación de venteos, drenajes y conductos de ventilación

Hojas de datos de seguridad - MSDS

RECOMENDACIONES

ASEGURAR QUE EL HIDRÓGENO JAMÁS ALCANCE LA ZONA INFLAMABLE

DISEÑO

- a** Minimizar las cantidades de hidrógeno en el laboratorio o la planta
- b** Minimizar el equipamiento eléctrico cerca de los lugares donde pueda ocurrir una pérdida
- c** Asegurar que el equipamiento esté correctamente ensamblado y conectado a tierra
- d** Asegurar que todas las líneas y accesorios sean de material para hidrógeno (cobre o acero inoxidable)
- e** Emplear detectores de hidrógeno apropiados cuando sea lo indicado

GUÍA PARA DISEÑO DE INSTALACIONES

Diseño de experimentos

- Conciba el experimento como un todo.
- Establezca el trazado de líneas usando, en lo posible tubos metálicos o de otro material autorizado para H₂, con un mínimo número de conexiones y la más corta longitud compatible con la seguridad.
- Establezca válvulas de corte en lugares que aún ante un accidente, sea posible acceder sin riesgos para detener el flujo
- Asegúrese de que el sistema experimental quede protegido contra sobrepresiones.
- Verifique hasta estar seguro la estanqueidad del sistema. Aplique solo métodos permitidos

FASE DE DESARROLLO DEL DISEÑO

ELECTROLIZADORES

Determinar cómo se minimizará o eliminarán los peligros a través de:
a.- Implementar soluciones a partir de Normas técnicas publicadas, y
b) Llevar a cabo un proceso de Evaluación de riesgos (RISK ASSESSMENT)

a.- Implementar soluciones a partir de Normas técnicas publicadas (STANDARDS)
Identificar riesgos que puedan ser eliminados por aplicación de soluciones /guías a partir de estándares existentes en caso de ser relevantes

b) Llevar a cabo un proceso de Evaluación de riesgos (RISK ASSESSMENT) para aquellos riesgos que no poseen soluciones adecuadas en las normas técnicas ya publicadas o que existe escasa experiencia de seguridad con tal tipo de peligros

Diseño de Controles de riesgo

Ensayar, probar o evaluar el diseño.
Determinar la información necesaria para la seguridad durante el ciclo de vida

Rediseñar para minimizar los riesgos dentro del control de los diseñadores

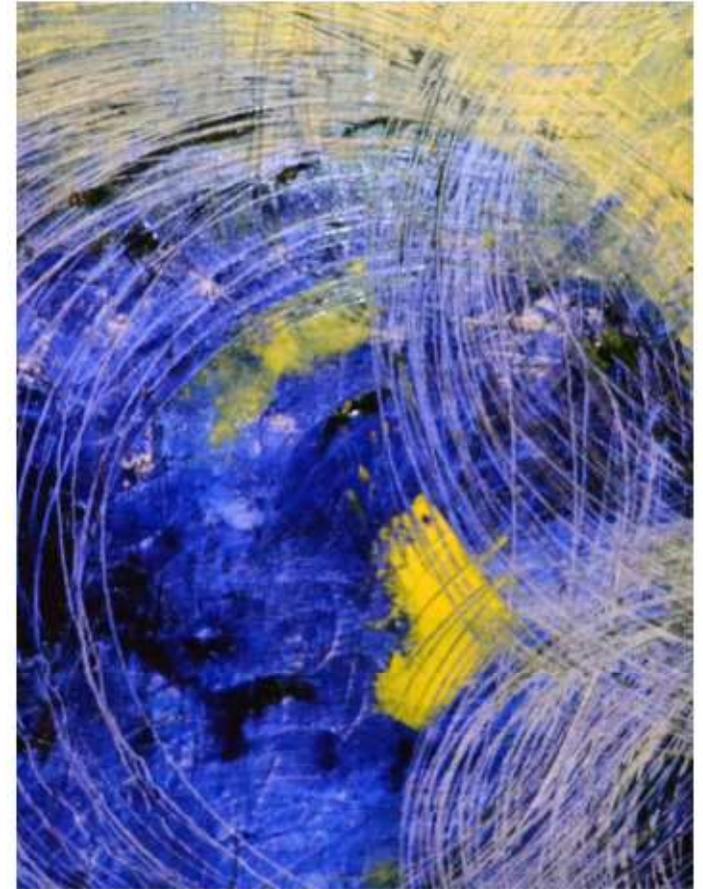
¿Han sido eliminados o minimizados los riesgos de manera razonable?

Diseño Final

SÍ

NO

ALGUNAS CONCLUSIONES



Las estadísticas muestran que el factor humano es un factor clave en la mayoría de los incidentes

Las normas y procedimientos deben respetarse

HYDROGEN INCIDENT DATABASE

| Database Name | Name | Web Address | Administered by |
|--|---------|---|---|
| HIRD (Hydrogen Incident Reporting Database) | HIRD | http://www.h2incidents.org/ | Pacific Northwest National Laboratory, USA. |
| HIAD (Hydrogen Incident and Accident Database) | HIAD | https://odin.jrc.ec.europa.eu/hiad/global_view.hiad | European Commission's Joint Research Center (JRC), Petten, Netherlands. |
| ACUsafe (US Chemical Safety Board monitored database) | ACUsafe | http://www.acusafe.com/Incidents/frame-incident.htm | US Chemical Safety Board, USA. |
| eMARS (Major Accident Reporting System) | eMARS | http://mahb-srv.jrc.it/typo3/?id%44 | Major Accident Hazards Bureau, JRC (EC), Italy |
| FACTS (Failure Accidents Technical Information System) | FACTS | http://www.factsonline.nl/ | TNO Industrial and External Safety Department, Netherlands |
| ERNS (Emergency Response Notification System) | ERNS | http://www.rtknet.org/db/erns/substance | OMB Watch (A non-profit organization), USA. |
| ARIA (Analysis, Research Information on Accidents) | ARIA | http://www.aria.developpement-durable.gov.fr/barpi_stats.gnc | French Ministry of Ecology and Sustainable Development, France. |
| ARIP (Accident Release Information Program) | ARIP | http://www.epa.gov/oem/tools.htm#arip | Environmental Protection Agency, USA |

H2 TOOLS

H2 Tools is intended for public use. It was built, and is maintained, by the Pacific Northwest National Laboratory with funding from the DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy's Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office

<http://www.h2tools.org/>

Base de datos de incidentes y accidentes de hidrógeno (HIAD)

<https://odin.jrc.ec.europa.eu/>

HIAD registra eventos accidentales relacionados con la tecnología del hidrógeno para ayudar a todas las partes interesadas a comprender mejor los eventos relacionados con el hidrógeno y ser una plataforma internacional de notificación de accidentes e incidentes de hidrógeno. Esta base de datos fue desarrollada por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea (CE).

Herramientas de Hidrógeno (Herramientas H2)

<https://h2tools.org/>

H2 Tools captura registros de incidentes relacionados con el hidrógeno y cuasi accidentes, así como las lecciones de seguridad aprendidas de esos eventos. H2 Tools fue desarrollado por el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico.

Kouatsu-Gas Hoan Kyoukai (KHK)

<http://www.khk.or.jp/>

La base de datos KHK registra información sobre incidentes relacionados con gases a alta presión y sustancias peligrosas en Japón para ayudar a prevenir accidentes relacionados con gases a alta presión. Esta base de datos fue desarrollada y actualizada por el Instituto de Seguridad del Gas a Alta Presión de Japón (Kouatsu-Gas Hoan Kyoukai) a solicitud del Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón.

Sistema de notificación de accidentes graves (eMARS)

<https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/emars/>

eMARS contiene informes de accidentes químicos y cuasi accidentes proporcionados a la Oficina de Riesgos de Accidentes Mayores (MAHB) del JRC de la CE. Este sistema fue establecido por la Directiva Seveso de la UE y se ha mantenido vigente con revisiones posteriores para mejorar la prevención de accidentes químicos y mitigar sus posibles consecuencias.

Situaciones plantas reales

ASPECTOS DE SEGURIDAD RELEVANTES



Propiedades del Hidrógeno Valor y unidades



| | |
|--|--|
| Número atómico | 1 |
| Peso atómico | 1,0079 |
| Peso Molecular | 2,0158 g/mol |
| Presión Crítica | 12,8 Atmósferas |
| Temperatura Crítica | - 239,91 °C |
| Punto de ebullición normal | -252,766 °C = 20,390 ° K (a 0,1013 MPa) |
| Punto de fusión | -259,2 °C = 13,95 °K (a 0,1013 MPa) |
| Calor específico a presión constante | 3,4 cal/ gr. a 0 °C |
| Calor de disociación | 104,2 Kcal./mol a 25° C |
| Coeficiente de difusión | 0,61 cm²/s |
| Temperatura de Autoignición | 585 °C (Otras fuentes: 520 °C) |
| Límites de inflamabilidad en aire | 4 - 75 % en Volumen |
| Límites de detonación en el aire | 18,3 – 59% en Volumen |
| Potencial explosivo | 24 gr TNT / gr H ₂ ó 2 gr TNT / Nm ³ H ₂ |
| Isótopos | Protio H ¹ ₁ , Deuterio H ² ₁ , Tritio H ³ ₁ |
| Densidad del gas (GH) | 0,08987 kg/ Nm³ (0 °C y 1 Atmósfera) |
| Densidad del líquido (LH ₂) | 70,973 kg/m ³ (-252 °C) |
| Energía Mínima de Ignición | 0,017 mJ |

Situaciones plantas reales

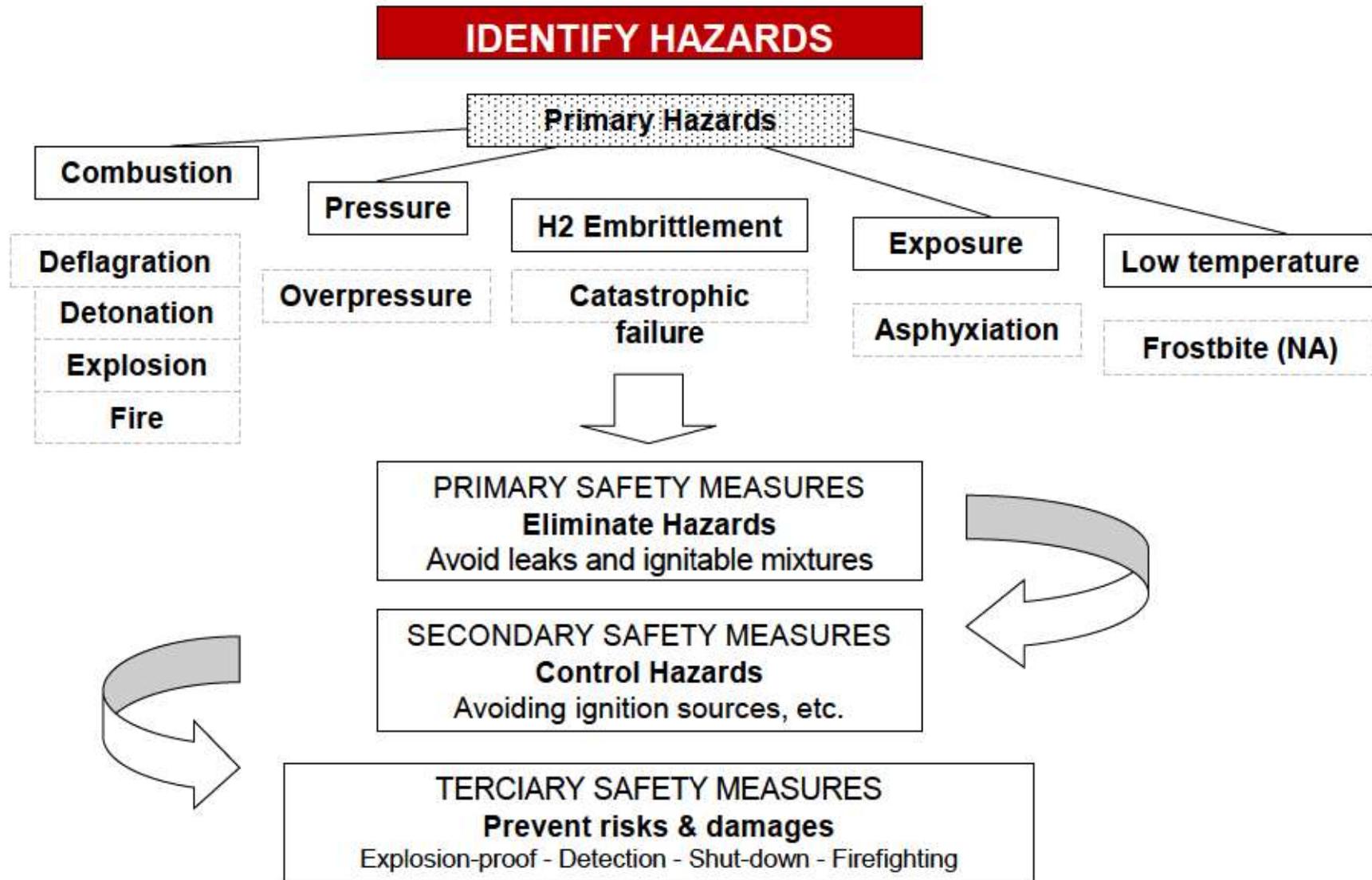
ASPECTOS DE SEGURIDAD RELEVANTES



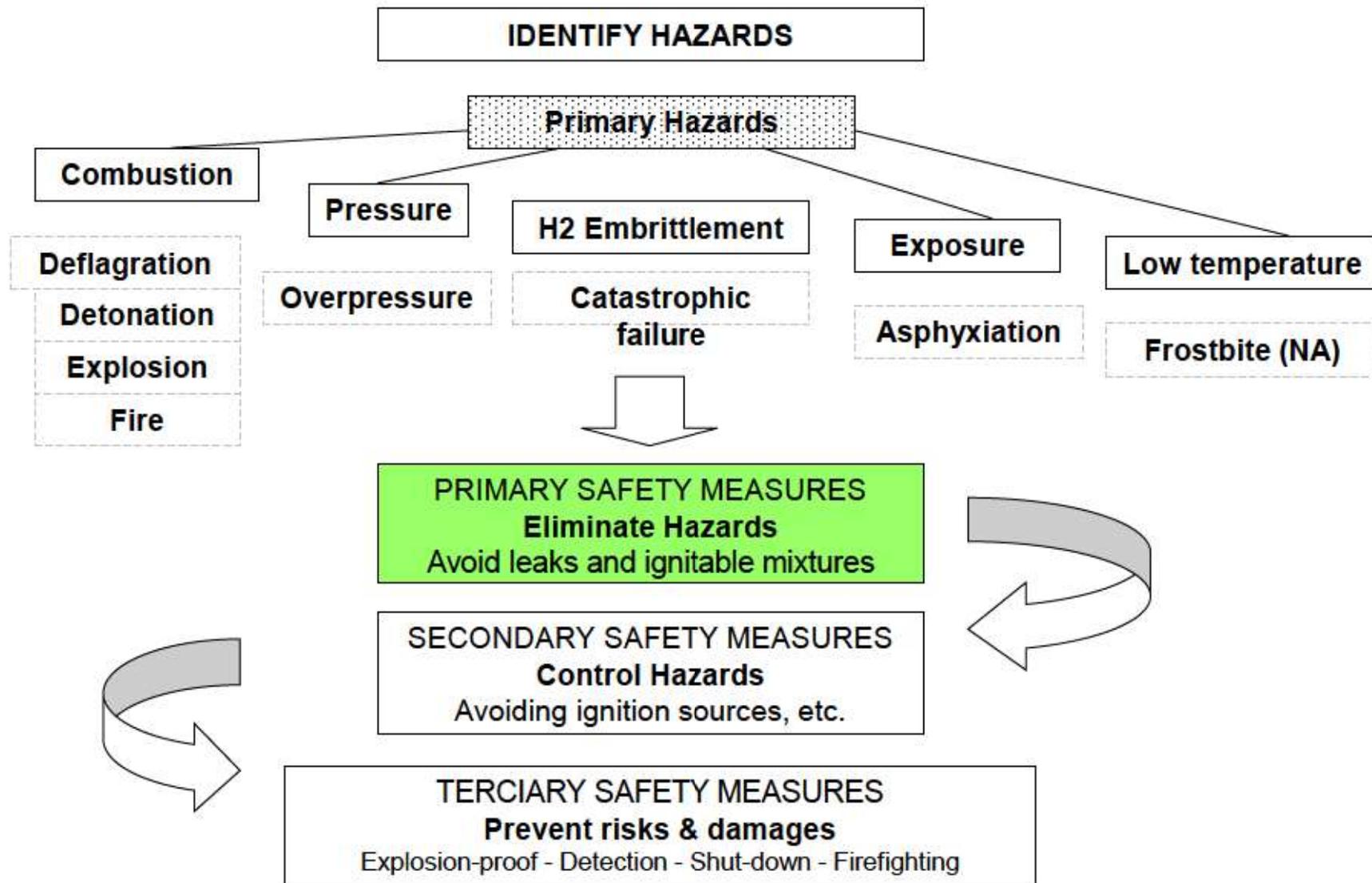
CRÉDITOS: LINDE Tech

SMR Reforming Plant

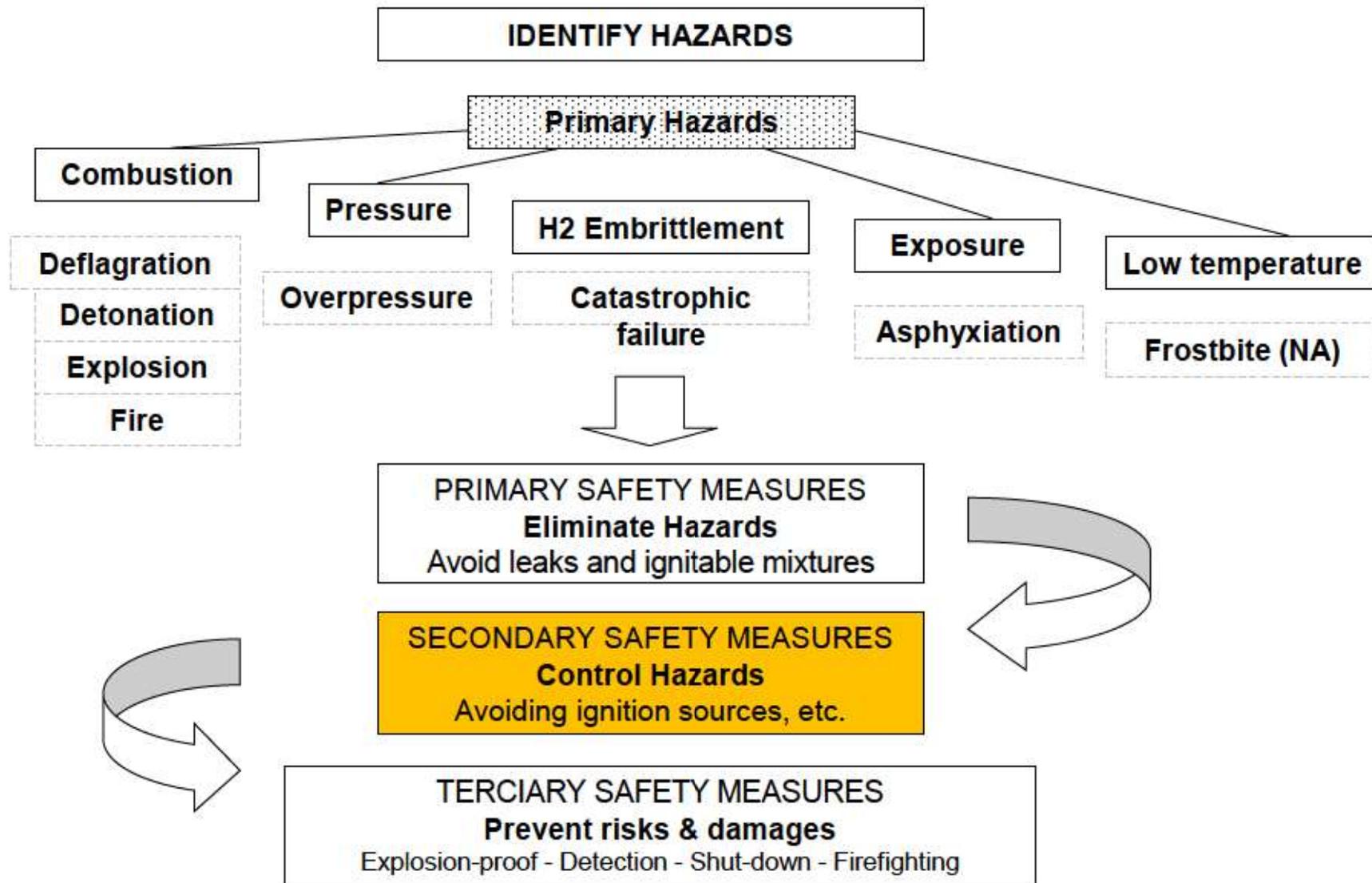
Análisis de Riesgos



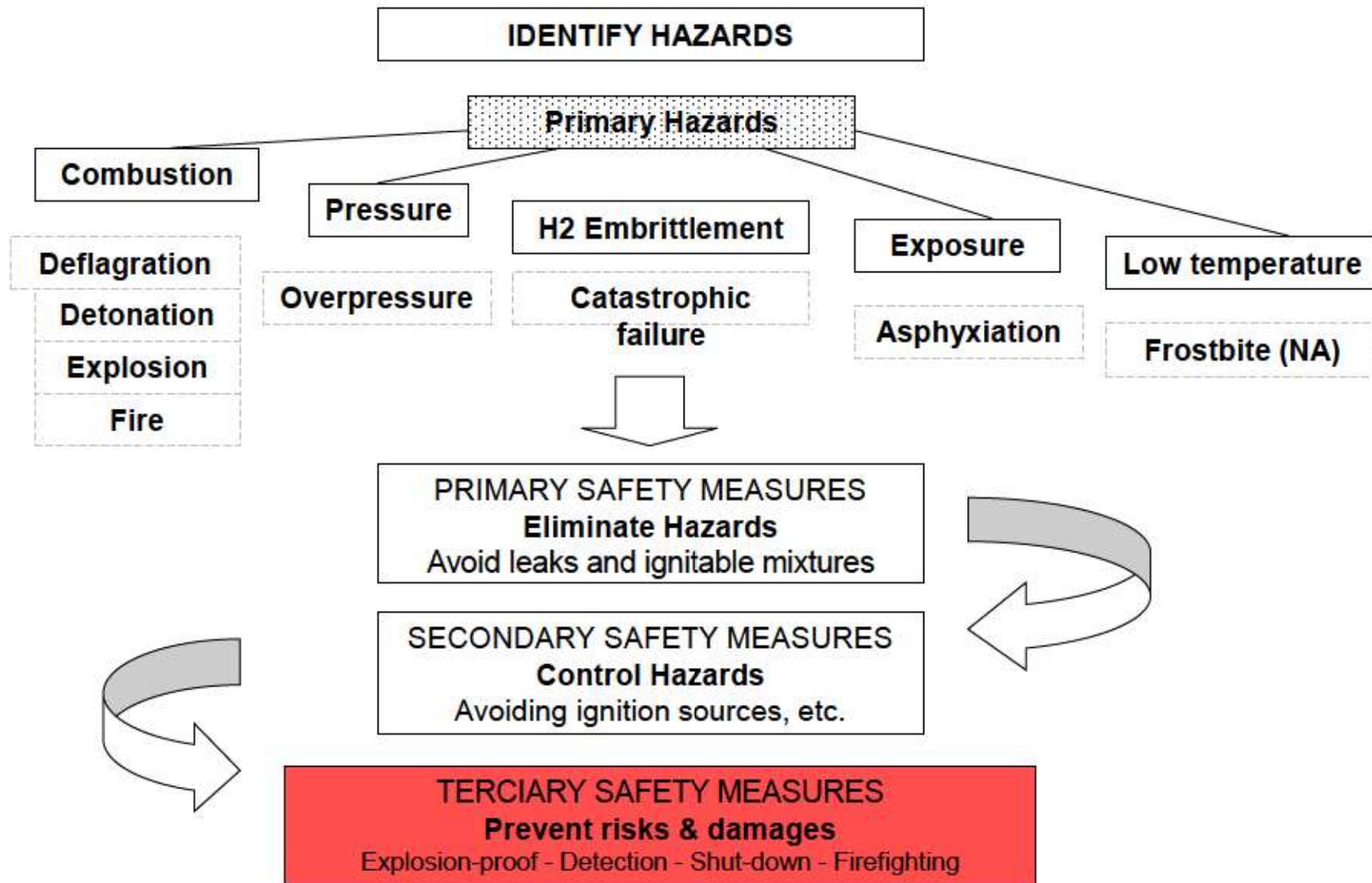
Análisis de Riesgos



Análisis de Riesgos



Análisis de Riesgos





Fallas en electrolizadores

1. Alta tensión, cortocircuitos o descargas eléctricas
2. Corrosión causada por electrolito ácido/cáustico y electroquímica
3. Congelamiento del agua de refrigeración en el stack
4. Fractura de tubería presurizada, compartimento
5. Esfuerzos térmicos excesivos que causan la degradación del material.
6. Fuga de hidrógeno del stack
7. Contaminación cruzada de oxígeno en hidrógeno y viceversa
8. Rotura de membrana de placas bipolares
9. Acumulación de mezclas explosivas de hidrógeno/oxígeno en el separador de fases o en el almacenamiento de gas

Tipos de accidentes y sus consecuencias

| Consequences | Cases | % |
|--|--------------|-----------|
| Deaths | 25 | 12 |
| Serious injuries | 28 | 13 |
| Injuries (including serious ones) | 70 | 33 |
| External material damage | 183 | 86 |
| Internal material damage | 17 | 8 |
| Internal operating losses | 89 | 42 |
| Evacuated population | 8 | 4 |

On a sample comprising 213 cases with known consequences

NO SE DEBEN EXTINGUIR LAS LLAMAS SIN HABER DETENIDO EL FLUJO QUE ORIGINA LA FUGA



Arbol de eventos; consecuencias en escapes de HIDRÓGENO

MEDIOS PARA COMBATIR INCENDIOS

Consultar FDS Hidrógeno

COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA: 580 °C (Depende de la fuente)

LÍMITES DE INFLAMABILIDAD EN AIRE POR VOLUMEN: 4% - 75%

MEDIOS DE EXTINCIÓN: CO₂, polvo químico, rociar con agua ó agua pulverizada alrededor del área. No extinguir hasta que el suministro de Hidrógeno esté INTERRUMPIDO.

INSTRUCCIONES ESPECIALES PARA COMBATIR INCENDIOS:

Evacuar a todo el personal de la zona de peligro. Inmediatamente enfriar los cilindros ó tanques de almacenaje, rociándolos con agua desde lo más lejos posible.

¡Cuidado de no extinguir las llamas!

¡Si las llamas se extinguen accidentalmente, puede re-ocurrir una explosión!

Si es posible y si no hay peligro, cerrar el suministro del gas Hidrógeno mientras se continúa rociando los cilindros con agua.

MEDIOS PARA COMBATIR INCENDIOS

Consultar FDS Hidrógeno

RIESGOS EN CASO DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES POCO COMUNES:

El gas Hidrógeno quema con una llama celeste, casi invisible.

También se enciende fácilmente con energía de ignición MUY BAJA.

Puede formar bolas de fuego si se incendia una nube de gas.

El Hidrógeno es más ligero que el aire y se puede acumular en las partes altas de lugares cerrados.

La presión en el cilindro puede aumentar debido al calentamiento y puede romperse si los reguladores de descarga de la presión (alivio) llegan a fallar.

RIESGOS DE PRODUCTOS COMBUSTIBLES: Ninguno

SENSIBILIDAD A DESCARGA ESTÁTICA: Ignición por descargas electrostáticas

1

MEDIDAS PRIMARIAS DE SEGURIDAD

**Eliminar causas de riesgos
Evitar fugas y mezclas inflamables - Diseño**

2

MEDIDAS SECUNDARIAS

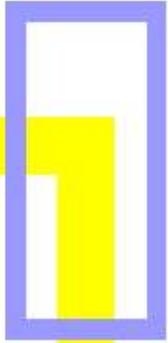
**Controlar Peligros
Eliminar fuentes de ignición**

3

MEDIDAS Terciarias de Seguridad

**Prevenir riesgos y daños
Detección - Explosion-proof - Shut-down - Firefighting**

ALGUNAS CONCLUSIONES



Si se permite acumular, el hidrógeno forma mezclas explosivas con poder altamente destructivo para personas e instalaciones

DISTANCIA DE SEGURIDAD



"Es la distancia mínima de separación entre una fuente de peligro y un objetivo (persona, equipo o ambiente) que mitigará el efecto de un probable incidente previsible y evitará que un incidente menor se convierta en un gran incidente"



DISTANCIA DE SEGURIDAD

De acuerdo con ISO TC197 WG24, la distancia de peligro es una distancia desde la fuente de peligro hasta un valor de efecto físico determinado (por modelado físico o numérico, o por una regulación) (normalmente, térmico o de presión) que puede conducir a una condición de daño (que va desde “ningún daño” hasta “daño máximo”) a personas, equipos o al ambiente.

El cálculo de las distancias de peligro suele ser determinista lo que significa que las distancias peligrosas no consideran la probabilidad de que ocurra un evento peligroso. Por lo tanto, el uso directo de distancias peligrosas puede conducir a la restricción de actividades en áreas extensas.

Por lo tanto, para aplicaciones prácticas, las distancias de peligro deben usarse como entrada para distancias de seguridad informadas sobre riesgos que emplean componentes tanto deterministas como probabilísticos de la metodología QRA.



VOLUMENES



"Es una muy buena práctica corriente disminuir los volúmenes operativos y el stock de hidrógeno al mínimo posible"



IRAM – ISO / TR 15916 (ISO TR 15916)**Consideraciones básicas para la seguridad en los sistemas de hidrógeno**

Instituto IRAM, Perú 550, Buenos Aires. ARGENTINA. – 2004 / (2015)

ISO TR 15916:2015**Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems****ISO 14687:2019****Gaseous Hydrogen - Fuel Product Specification****MSDS Hidrógeno comprimido**

Hoja de datos de seguridad del material

AAH - 2015

MSDS Hydrogen Compressed Gas

Hoja de datos de seguridad del material

Air Products

FDS Hidrogeno-2020 - Linde Uruguay

HDSP P-4604 – Rev. 5.0

Linde Montevideo - Uruguay

Global Hydrogen Review

International Energy Agency

2023

Green Hydrogen Roadmap in Uruguay

MIEM 2022 - INTERINSTITUTIONAL GROUP

BID Support

CONCLUSIONES

Con las medidas de prevención adecuadas y cumpliendo estrictamente las normas de seguridad y procedimientos aprobados, la realización de experimentos de laboratorio y la operación de plantas de hidrógeno bien diseñadas es una actividad segura que permite aumentar el conocimiento y logra diseminar tecnologías nuevas y más limpias para beneficio de todos



El Hidrógeno verde y otras tecnologías limpias presentan un futuro prometedor



Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

Curso Postgrado
URUGUAY

FIN

4CAP-2024

4

H2 HAZARDS

aprea.infovia@gmail.com

Safety
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

José Luis APREA

FEBRERO 2024



Comisión Nacional
de Energía Atómica

Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

FIN

SEGURIDAD

CAP-2024

aprea.infovia@gmail.com

Safety
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

José Luis APREA

FEBRERO 2024

NOTAS

N