



Guía de apoyo para estudios de evaluación de **riesgos** en instalaciones y proyectos de hidrógeno en chile

AUTORES: ALVARO VIDELA, ANDRÉS RUIZ-TAGLE, ROBERTO SANTIAGO

Índice

1. Introducción	3
Objetivos	4
Alcance	4
Reglamento de Seguridad Instalaciones de Hidrógeno (DS 13)	5
Guía SEC Proyectos Especiales de Hidrógeno	6
Normativas Internacionales de Referencia	7
2. Fundamentos de Seguridad del Hidrógeno	9
Propiedades Físicoquímicas Relevantes para la Seguridad	9
Peligros Comunes en Instalaciones de Hidrógeno	9
Cinco Pilares de la Seguridad del Hidrógeno	12
3. Metodología de Evaluación Cualitativa de Riesgos	13
Etapas 1: Descripción del Sistema	13
Etapas 2: Identificación Sistemática de Peligros	14
Etapas 3: Clasificación de Riesgos	15
Etapas 4: Plan de Reducción de Riesgos	17
Etapas 5: Documentación y Seguimiento	18
4. Consideraciones Críticas de Seguridad Basadas en Evidencia Experimental	19
Escenario de explosión por nube de vapor (VCE)	19
Efecto Limitado de la Flotabilidad	19
Explosividad del Hidrógeno sin Confinamiento	20
5. Riesgos Específicos del Contexto Chileno	21
Riesgo Sísmico	21
Riesgos Geográficos y Climáticos	22
Contexto Regulatorio en Desarrollo	22
6. Gestión del Riesgo — Tan Bajo Como Sea Razonablemente Posible (ALARP)	23
7. Elementos Complementarios del Plan de Seguridad	24
Gestión de Cambios	24
Capacitación y Competencias	24
Respuesta ante Emergencias	24
Lecciones Aprendidas	24
8. Estructura Estándar de Informe de Evaluación Cualitativa de Riesgos	25
Referencias	27
Anexos	28
Ejemplo Aplicado - Evaluación Cualitativa de Planta Piloto de Generación y Almacenamiento H ₂ V	28
Herramientas y Recursos de Apoyo	32

1. Introducción

Chile cuenta con ventajas naturales excepcionales —abundantes recursos solares y una alta radiación en el norte, y fuertes y abundantes vientos en el extremo sur— que lo han posicionado como líder mundial en producción de energía a partir de fuentes renovables. En este contexto, se espera que en los próximos años el hidrógeno verde (H2V) se convierta en uno de los principales vectores energéticos limpios para ayudar a descarbonizar la matriz energética global. La alta disponibilidad de energía renovable a bajo costo para viabilizar técnico-económicamente su producción posiciona a Chile como un actor clave en esta industria emergente.

En atención a ello, en 2020 Chile publicó su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, para definir los pasos a seguir en la implementación de esta industria a nivel nacional. Posteriormente, durante 2023 se avanzó en la publicación del Plan de Acción de Hidrógeno Verde, que busca materializar de manera concreta compromisos de implementación de infraestructura y formación de capital humano, estableciendo cuatro pilares: (1) Promover tanto el mercado nacional como el de exportación, (2) Establecer estándares, evaluaciones de seguridad y pilotos de prueba, (3) Desarrollo social y local asociado a esta industria, y (4) Desarrollo de capacidades e innovación en H2V.

Específicamente respecto del pilar (2), la emisión de normativa para supervisar aspectos de seguridad a lo largo de la cadena de valor debe ir acompañada del desarrollo de conocimiento, procedimientos y herramientas de evaluación que permitan una gestión de riesgos adecuada. Entre las medidas contempladas, el Ministerio de Energía busca eliminar barreras para el desarrollo del mercado de hidrógeno verde, estableciendo tempranamente un marco regulatorio apropiado para resguardar la seguridad de las personas y la infraestructura.

Para dar continuidad a estas políticas, el Ministerio de Energía publicó formalmente la Actualización de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y Derivados 2026-2030 mediante la Resolución Exenta N° 20, de 27 de julio de 2026. Esta hoja de ruta ajusta los objetivos iniciales de 2020 hacia un enfoque más realista y pragmático, centrado en la demanda local y la seguridad energética, y pone énfasis en tres pilares fundamentales. (1) el fortalecimiento de la demanda interna, impulso a la exportación, gobernanza y desarrollo de valor local. Acelerando la aplicación de este nuevo energético en sectores de difícil electrificación, como la industria minera, química y la producción de combustibles sintéticos. (2) se reafirma la intención de posicionar estratégicamente a Chile como un proveedor global de hidrógeno y sus derivados hacia mercados con metas de descarbonización exigentes, como son Europa y Asia. Finalmente, (3) la consolidación de la gobernanza sectorial, institucionalizando procesos y reduciendo la incertidumbre regulatoria, además de fortalecer el contenido local y la formación de capital humano.

La presente guía se enmarca en este esfuerzo, ofreciendo orientación específica para la realización de evaluaciones cualitativas de riesgos en instalaciones y proyectos de hidrógeno. Este tipo de evaluación

resulta particularmente relevante en las etapas tempranas de diseño, en proyectos de menor escala, y como paso previo o complementario a un estudio cuantitativo, proporcionando un marco estructurado para la identificación sistemática de peligros y la clasificación de riesgos mediante métodos reconocidos internacionalmente.

La presente guía se enmarca en este esfuerzo, ofreciendo orientación específica para la realización de evaluaciones cualitativas de riesgos en instalaciones y proyectos de hidrógeno.

OBJETIVOS

Proveer una guía estandarizada para la evaluación cualitativa de riesgos: Esta guía ofrece un método estructurado sobre cómo llevar a cabo un estudio de evaluación cualitativa de riesgos en instalaciones de hidrógeno, considerando metodologías de Identificación Sistemática de Peligros (ISV), matrices de riesgo y planes de mitigación y reducción adecuados para analizar y gestionar los riesgos

asociados con la producción, acondicionamiento, almacenamiento, compresión, transporte, distribución y utilización del hidrógeno.

Promover la seguridad en proyectos de hidrógeno: El desarrollo de esta industria debe considerar altos estándares de seguridad, ya que el hidrógeno es un combustible que, por sus características físico-químicas puede presentar riesgos significativos que requieren una gestión sistemática y rigurosa. Cumplimiento temprano de normativas y regulaciones: Un objetivo importante de este documento es alinear de forma temprana los proyectos con las normativas y estándares, tanto nacionales (DS 13/2022, Procedimiento de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno) como internacionales (NFPA 2, ASME B31.12, ISO 19880), mediante una evaluación cualitativa transparente que facilite el cumplimiento regulatorio y las mejores prácticas de ingeniería.

Facilitar el acceso de información a los participantes en proyectos de hidrógeno: Se considera fundamental educar a los profesionales involucrados sobre la importancia de la gestión de riesgos y proporcionarles herramientas y recursos para realizar evaluaciones cualitativas adecuadas, con ejemplos prácticos aplicables al contexto chileno.

ALCANCE

En el marco de la ejecución del Plan de Acción del Hidrógeno Verde, y específicamente de su segundo pilar “Establecer estándares, evaluaciones de seguridad y pilotos de prueba”, este documento denominado “Guía de Apoyo para Estudios de Evaluación de Riesgos en Instalaciones y Proyectos de Hidrógeno en Chile” busca facilitar el desarrollo, incorporación y revisión de análisis de riesgos en proyectos de hidrógeno, proponiendo metodologías estandarizadas de identificación de peligros, criterios de clasificación de frecuencia y consecuencia, y una matriz de riesgo común para orientar la toma de decisiones.

Se incluyen ejemplos que permiten entender de manera práctica las principales medidas de seguridad que pueden implementarse en las distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno. Las recomendaciones e información técnica presentadas en esta guía no son únicas ni exclusivas como metodología para el desarrollo de una evaluación de riesgos. En caso de utilizar métodos, criterios o

antecedentes técnicos distintos, estos deberán encontrarse debidamente justificados, documentados y respaldados técnicamente, de manera de asegurar resultados con validez similar.

El alcance de esta guía cubre las siguientes etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde:

- Producción (electrólisis)
- Acondicionamiento (purificación, secado, compresión)
- Almacenamiento (gaseoso a alta presión, portadores químicos, otros)
- Transporte y distribución (tuberías, camiones, sistemas de carga)
- Consumo final (celdas de combustible, procesos industriales, inyección a red de gas, estaciones de servicio HRS)

Este documento se centra en el contexto específico de Chile, teniendo en cuenta la legislación, y regulación nacional aplicable, así como las particularidades del país en términos de sismicidad, condiciones geográficas y climáticas, infraestructura, y capacidades técnicas locales. La guía está dirigida a desarrolladores de proyectos, consultores especializados, autoridades regulatorias y profesionales involucrados en la evaluación y aprobación de instalaciones de hidrógeno.

REGLAMENTO DE SEGURIDAD INSTALACIONES DE HIDRÓGENO (DS 13)

El Decreto Supremo N° 13/2022, publicado por el Ministerio de Energía y en vigor desde el 24 de junio de 2024, establece los requisitos mínimos de seguridad que deberán cumplir las instalaciones que utilizan hidrógeno como combustible, en las etapas de diseño, construcción, operación, mantenimiento, reparación, modificación, inspección y término definitivo de operaciones. El reglamento aplica a las actividades de producción, acondicionamiento, almacenamiento, transferencia y consumo de hidrógeno, referenciando las normativas técnicas nacionales e internacionales aplicables.

El documento establece las obligaciones y responsabilidades de las personas naturales y jurídicas que intervienen en dichas actividades, con el objetivo de desarrollarlas en forma segura y controlando el riesgo, de manera tal que no constituyan peligro para las personas o la infraestructura.

Respecto de la evaluación de riesgos, el DS 13 hace mención textual a

- “En materias de diseño, construcción, operación [...] la SEC podrá permitir el uso de tecnologías diferentes a las establecidas en el presente reglamento, siempre que acredite mantener el nivel de seguridad [...] un estudio de evaluación de riesgo, y cualquier otro antecedente que solicite la SEC destinado a acreditar el nivel de seguridad y el respaldo técnico de las tecnologías que se quieren implementar”.
- “Las Instalaciones de Hidrógeno con capacidad agregada de almacenamiento superior a 5.000 kg de Hidrógeno deberán contar con un Sistema de Gestión de Seguridad y Riesgos (SGSR), el que deberá contener al menos: [...] (2) Evaluación de Riesgos con identificación de peligros, árbol de eventos y sus consecuencias, como asimismo los valores umbrales de sobrepresión y radiación de calor”.

Es importante destacar que, si bien el DS 13 menciona explícitamente elementos cuantitativos (árbol de eventos, umbrales de sobrepresión y radiación), la evaluación cualitativa constituye un paso previo

indispensable para identificar los escenarios de riesgo que eventualmente requerirán cuantificación. Para instalaciones con almacenamiento menor a 5.000 kg o en etapas tempranas de diseño, una evaluación cualitativa rigurosa puede ser suficiente como base para la toma de decisiones y el diseño de medidas de reducción de riesgo.

PROCEDIMIENTO DE AUTORIZACIÓN DE PROYECTOS ESPECIALES DE HIDRÓGENO (SEC)

Mediante la Resolución Exenta N° 36.892, la Superintendencia de Electricidad y Combustibles aprobó el Procedimiento de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno y estableció una Plataforma Electrónica de tramitación obligatoria, en línea con la Ley N° 21.180 sobre Transformación Digital del Estado. Este procedimiento rige desde el 20 de febrero de 2026 y reemplaza a la anterior Guía de Apoyo para la Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno, vigente desde 2021 y actualizada en 2024. Toda referencia de esta guía al marco de proyectos especiales debe entenderse hecha al procedimiento vigente.

El procedimiento está dirigido a personas y empresas interesadas en implementar proyectos de hidrógeno que consideren tecnologías diferentes a las establecidas en el DS 13, así como a instalaciones de competencia de la SEC no contempladas en dicho reglamento. Estas tecnologías deben estar técnicamente respaldadas en normas, códigos o especificaciones nacionales o extranjeras —ANSI, ASME, ASTM, AWS, BS, EN, ISO, NFPA, UNE, entre otras— así como en prácticas recomendadas de ingeniería internacionalmente reconocidas.

El proceso de autorización consta de tres etapas —ingreso, evaluación técnica y elaboración de la resolución de autorización— y culmina con una Resolución Exenta que autoriza el proyecto especial. El registro de la instalación constituye un trámite posterior, previo a su entrada en operación. Existen además condiciones de tramitación con impacto directo en la planificación del estudio de riesgos: la solicitud solo puede ser ingresada por un instalador de gas con Licencia Clase 5 vigente, autenticado mediante Clave Única; los antecedentes se cargan en formato digital identificados mediante código TAG, con un máximo de 10 MB por archivo; el estudio de evaluación de riesgos se presenta consolidado junto con el resto de los antecedentes de seguridad, mientras que la matriz con medidas de mitigación se entrega como planilla independiente.

Respecto de la evaluación de riesgos, el procedimiento establece:

- **“El solicitante deberá seleccionar e informar la metodología a utilizar para la evaluación de los riesgos que estime pertinente, entre otros:** What if, Análisis Preliminar de Riesgos (APR), HAZOP/AFO (Análisis Funcional de Operatividad), HCRA (Hydrogen Combustion Risk Analysis), etc. Una vez seleccionada la metodología, se debe elaborar una matriz de riesgos en la que se contemplen las principales amenazas a las que pueda estar expuesta la instalación, ya sea de origen operacional, como natural”.
- **“Identificación del riesgo:** En esta columna se deben reconocer, según la metodología utilizada, las actividades o eventos de riesgo, su causa y además las consecuencias que puedan tener sobre la instalación de hidrógeno”.
- **“Clasificación del riesgo:** Una vez identificados y evaluados los riesgos, éstos se clasifican en diferentes categorías según su importancia y prioridad. Por lo general, se utilizan categorías como riesgos altos, medios y bajos”.

NORMATIVAS INTERNACIONALES DE REFERENCIA

A continuación, se presenta un listado de normativas internacionales de referencia para proyectos de hidrógeno que es importante tener en consideración para la evaluación de riesgos:

Tabla 1: Listado de normativas internacionales de referencia para proyectos de hidrógeno.

Normativa	Descripción / Alcance
NFPA 2:2023	Código de Tecnologías de Hidrógeno. Establece requisitos fundamentales para producción, almacenamiento, transferencia y uso de hidrógeno.
ISO 19880-1:2020	Estaciones de servicio de hidrógeno gaseoso — Requisitos generales de seguridad.
ASME B31.12:2023	Tuberías de hidrógeno y sistemas de tuberías. Diseño, materiales, fabricación, inspección y pruebas.
ISO/TR 15916:2015	Consideraciones básicas para la seguridad de sistemas de hidrógeno. Marco general de evaluación de riesgos.
IEC 60079-10-1:2020	Clasificación de áreas peligrosas para atmósferas explosivas de gases.
IEC 61511 / IEC 61508	Seguridad funcional de sistemas instrumentados de seguridad (SIS) en la industria de procesos.
SAE J2601	Protocolo de carga de hidrógeno para vehículos ligeros.
EN 17127:2020	Puntos de suministro de hidrógeno al aire libre — Requisitos de seguridad.
NCh 2369:2025	Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. Estándar chileno de referencia obligatoria.
IEC 31010:2019	Gestión del riesgo — Técnicas de apreciación del riesgo. Guía sobre métodos de identificación y evaluación.

La identificación de peligros exige distinguir con precisión entre categorías que en la práctica suelen confundirse. Siguiendo el vocabulario de gestión del riesgo de ISO 31000 e ISO Guide 73, y las técnicas descritas en IEC 31010, esta guía adopta la siguiente cadena causal como estructura de referencia para todo el análisis:

- **Peligro:** fuente intrínseca con potencial de causar daño. El peligro existe con independencia de que ocurra o no un incidente.
- **Causa o mecanismo iniciador:** falla, desviación o condición que puede conducir a la materialización del peligro.

- **Evento no deseado:** suceso que materializa la liberación del peligro y que constituye el nodo central del análisis. Corresponde al evento tope de un Árbol de Fallas y al evento iniciador de un Árbol de Eventos.
- **Escenario de consecuencia:** secuencia que sigue al evento no deseado según ocurra o no la ignición, según el retardo de ésta y según las condiciones de confinamiento, congestión y ventilación del entorno.
- **Receptor y severidad:** persona, infraestructura o componente ambiental afectado, y magnitud del daño resultante.
- **Salvaguarda o barrera:** medida que actúa sobre el lado izquierdo de la cadena, reduciendo la frecuencia del evento (preventiva), o sobre el lado derecho, reduciendo la severidad de la consecuencia (mitigadora).
- **Riesgo:** combinación de la frecuencia estimada del evento y de la severidad de sus consecuencias, evaluada antes (riesgo inherente) y después (riesgo residual) de considerar las salvaguardas existentes.



2. Fundamentos de Seguridad del Hidrógeno

PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS RELEVANTES PARA LA SEGURIDAD

El hidrógeno posee un conjunto de propiedades fisicoquímicas que lo diferencian de otros combustibles y que deben ser comprendidas a cabalidad para desarrollar una evaluación de riesgos consistente y definir medidas de seguridad adecuadas. A continuación, se resumen las más relevantes:

Tabla 2: Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno relevantes para la seguridad.

Propiedad	Valor	Significado para la Seguridad
Rango de inflamabilidad	4% – 75% (vol. en aire)	Mucho más amplio que gas natural (5-15%) o gasolina (1-7,6%). Implica que mezclas H ₂ -aire son inflamables en un rango muy extenso.
Energía mínima de ignición	0,017 mJ	Aproximadamente 10 veces menor que la del gas natural. Descargas electrostáticas comunes pueden iniciar la combustión.
Velocidad de llama laminar	~2,9 m/s	Aproximadamente 8 veces mayor que la del gas natural. Las llamas de hidrógeno se propagan rápidamente.
Temperatura de autoignición	~585 °C	Superior a la del gas natural (~540 °C), pero la baja energía de ignición compensa esta ventaja.
Densidad relativa (aire=1)	0,07	El hidrógeno es 14 veces más liviano que el aire, por lo que se dispersa rápidamente hacia arriba en espacios abiertos.
Coefficiente de difusión	0,61 cm ² /s	Aproximadamente 4 veces mayor que el gas natural. Facilita la dispersión, pero también incrementa la capacidad de penetración en materiales.
Llama invisible	Emisión UV	La llama de hidrógeno es prácticamente invisible a la luz del día, dificultando su detección visual.
Fragilización por hidrógeno	Difusión en metales	El H ₂ puede penetrar en aceros y aleaciones, causando pérdida de ductilidad y fallas frágiles.

PELIGROS COMUNES EN INSTALACIONES DE HIDRÓGENO

A partir de la experiencia acumulada en la industria del hidrógeno y del análisis de incidentes registrados en bases de datos internacionales (H2Tools, ARIA, HIAD), los peligros más relevantes en instalaciones de hidrógeno y su desarrollo a lo largo de la cadena causal se resumen a continuación:

Tabla 3: Métodos de Identificación Sistemática de Peligros aplicables a instalaciones de hidrógeno.

Peligro	Causas típicas	Evento no deseado	Escenarios de consecuencia
Inventario de H ₂ gaseoso a presión	Fragilización por hidrógeno; corrosión acelerada; fatiga y vibración; bridas, sellos o conexiones defectuosas; sobrepresión; daño por impacto; sismo.	Pérdida de contención, desde fuga menor hasta ruptura del componente.	Ignición inmediata: jet fire. Ignición retardada: VCE o flash fire. Sin ignición: dispersión de nube de gas inflamable.
Inventario de H ₂ en recinto total o parcialmente confinado	Fuga menor sostenida combinada con tasa de ventilación insuficiente; venteo mal dirigido; estratificación.	Acumulación de atmósfera inflamable (≥ 4 % vol.).	Deflagración confinada, con potencial escalamiento a detonación (DDT) en presencia de obstáculos y congestión; colapso estructural y proyección de fragmentos.
Desplazamiento de oxígeno	Fuga o venteo hacia espacios confinados o con ventilación inadecuada.	Atmósfera deficiente en oxígeno.	Asfixia, agravada por el carácter inodoro e incoloro del hidrógeno.

A continuación, se desarrollan los elementos de la tabla anterior, agrupados según su posición en la cadena causal.

Causas y mecanismos iniciadores

- **Fragilización por hidrógeno:** el H₂ puede difundirse en ciertos materiales metálicos, especialmente en aceros al carbono y aleaciones susceptibles, provocando degradación progresiva que puede conducir a fallas frágiles sin señales previas de deformación.
- **Degradación mecánica y de la hermeticidad:** bridas mal apretadas, juntas deterioradas, conexiones defectuosas, grietas en tuberías por vibraciones excesivas, válvulas defectuosas, corrosión acelerada, daño por impacto, fatiga de materiales y fallo de instrumentación.
- **Sobrepresión:** fallas en compresores, sobrellenado de sistemas, fallo en sistemas de control o de alivio de presión, fallo en procedimientos operativos y ruptura de membranas de electrolizadores.
- **Errores operacionales y fuentes de ignición:** contaminación cruzada H₂/O₂, purgas inadecuadas, apertura prematura de sistemas, uso de herramientas inadecuadas, sobrecalentamiento de equipos y descargas electrostáticas, favorecidas por la muy baja energía mínima de ignición del hidrógeno.

- **Amenazas externas:** sismo, impacto vehicular, condiciones climáticas extremas y demás eventos de origen natural o antrópico, desarrollados en el capítulo de riesgos específicos del contexto chileno.

Eventos no deseados

- **Pérdida de contención (fuga):** constituye el evento no deseado más frecuente, favorecido por el reducido tamaño molecular del hidrógeno y su alta capacidad de difusión. Su caracterización debe abarcar el rango completo de tamaños de orificio, dado que las consecuencias posteriores dependen fuertemente del caudal másico liberado y de la presión de operación.
- **Acumulación de atmósfera inflamable:** en espacios confinados o parcialmente confinados, una fuga de bajo caudal puede generar rápidamente una mezcla dentro del rango de inflamabilidad (4 %–75 % vol.), en particular cuando la ventilación es insuficiente o su disposición no corresponde al patrón real de dispersión del chorro.

Escenarios de consecuencia

- **Jet fire:** resultado de la ignición inmediata de un chorro a presión. Determina la radiación térmica sobre personas, equipos y estructuras vecinas, y es el escenario en que se fundamentan las distancias de separación prescriptivas de NFPA 2.
- **Explosión de nube de gas inflamable (VCE):** resultado de la ignición retardada de una nube inflamable formada tras la liberación. Genera sobrepresiones que pueden alcanzar distancias superiores a las del jet fire; este escenario se desarrolla en detalle en el capítulo “Consideraciones Críticas de Seguridad Basadas en Evidencia Experimental”.
- **Deflagración confinada y transición a detonación (DDT):** la deflagración y la detonación no constituyen escenarios independientes, sino regímenes de propagación de la combustión. La alta velocidad de llama y reactividad del hidrógeno hacen que, en presencia de confinamiento, obstáculos y congestión, una deflagración pueda acelerarse hasta transitar a detonación, con un aumento abrupto de la sobrepresión resultante.
- **Flash fire y dispersión sin ignición:** la nube inflamable puede quemarse sin generar sobrepresión significativa, o bien dispersarse sin ignición; ambos desenlaces deben documentarse como ramas del árbol de eventos, aun cuando su severidad sea menor.
- **Asfixia:** aunque el hidrógeno no es tóxico, puede desplazar el oxígeno en espacios confinados o con ventilación inadecuada, situación agravada por su carácter inodoro e incoloro, que dificulta la detección sin instrumentación adecuada.

CINCO PILARES DE LA SEGURIDAD DEL HIDRÓGENO

El Hydrogen Safety Panel del Departamento de Energía de EE.UU. (DOE) ha establecido cinco pilares fundamentales que deben guiar toda actividad relacionada con hidrógeno. Estos pilares constituyen la base conceptual sobre la cual se construye una evaluación de riesgos eficaz:

Tabla 4: Cadena causal de los peligros comunes en instalaciones de hidrógeno.

Nº	Pilar	Descripción
1	Planificar	Conocer las propiedades del H ₂ , los códigos y estándares aplicables, y desarrollar un plan de seguridad completo antes de iniciar operaciones.
2	Contener	Diseñar, construir y mantener sistemas que prevengan la liberación no controlada de hidrógeno, usando materiales compatibles y diseño resistente a fragilización.
3	Gestionar descargas	Reconocer que bajo condiciones normales de operación pueden ocurrir liberaciones de hidrógeno, por lo que deben implementarse sistemas de venteo, alivio y purga seguros, dirigidos y controlados.
4	Detectar y mitigar	Implementar sistemas de detección de fugas (sensores H ₂ , UV/IR para llama), alarmas, sistemas de extinción y protocolos de emergencia.
5	Gestionar operaciones	Mantener capacitación continua del personal, procedimientos actualizados, gestionar cambios y realizar inspecciones/auditorías periódicas.

3. Metodología de Evaluación

• Cualitativa de Riesgos

La evaluación cualitativa de riesgos es un enfoque sistemático que permite identificar, analizar y clasificar los riesgos asociados a una instalación o proceso sin requerir la cuantificación numérica precisa de frecuencias y consecuencias. A diferencia de la Evaluación Cuantitativa de Riesgos (QRA), que utiliza modelos fenomenológicos y datos estadísticos para calcular valores numéricos de riesgo, la evaluación cualitativa se basa en el juicio experto, categorías descriptivas y matrices de clasificación para priorizar los riesgos y orientar la toma de decisiones.

Esta guía propone un proceso de cinco etapas para la evaluación cualitativa:

Tabla 5: Proceso de cinco etapas para la evaluación cualitativa de riesgos.

Etapa	Nombre	Descripción
1	Descripción del Sistema	Caracterización completa de la instalación, equipos, procesos, condiciones de operación y entorno.
2	Identificación Sistemática de Peligros	Aplicación de uno o más métodos estructurados para identificar todos los peligros potenciales.
3	Clasificación de Riesgos	Asignación de categorías de frecuencia y consecuencia a cada escenario, y ubicación en la matriz de riesgo.
4	Plan de Reducción de Riesgos	Definición de medidas de prevención y mitigación para reducir el riesgo a niveles aceptables.
5	Documentación y Seguimiento	Registro completo de resultados, plan de implementación, y mecanismos de actualización periódica.

ETAPA 1: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En esta etapa se detallan las características de la instalación o proceso que se está evaluando, con el fin de entender su estructura, funcionamiento y los posibles riesgos asociados a cada componente. Esto incluye:

- Descripción física de equipos y componentes principales
- Condiciones de operación y proceso (presión, temperatura, caudales, composición)
- Diagramas y planos (P&IDs, layout de planta, diagrama de flujo de proceso)
- Sistemas de control y seguridad (SIS, sensores, alarmas, válvulas de alivio)

- Materiales y sustancias involucradas (compatibilidad con H₂)
- Fronteras físicas del sistema y límites operacionales
- Interfaces con otros sistemas y servicios auxiliares
- Condiciones ambientales relevantes (temperatura ambiente, viento, sismicidad, altitud)
- Información sobre el entorno: distancias a poblaciones, vías de tránsito, instalaciones vecinas.

ETAPA 2: IDENTIFICACIÓN SISTEMÁTICA DE PELIGROS

La Identificación Sistemática de Peligros constituye el paso más crítico de la evaluación cualitativa. Consiste en aplicar uno o más métodos estructurados para detectar todos los posibles eventos, condiciones o situaciones que podrían generar un riesgo. El Procedimiento de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno de la SEC enumera varios de estos métodos como aplicables a instalaciones de hidrógeno. A continuación, se describen los principales:

Tabla 6: Métodos de Identificación Sistemática de Peligros aplicables a instalaciones de hidrógeno.

Método	Descripción	Aplicabilidad	Complejidad
HAZID (Hazard Identification)	Reunión estructurada con equipo multidisciplinario que identifica peligros de forma amplia usando palabras guía y categorías predefinidas.	Todas las etapas, especialmente útil en fases tempranas de diseño.	Baja a Media
What-If	Análisis basado en preguntas del tipo “¿Qué pasaría si...?” aplicadas sistemáticamente a cada sección del proceso.	Procesos conocidos, complemento de otros métodos.	Baja
HAZOP/AFO (Hazard and Operability / Análisis Funcional de Operatividad)	Análisis sistemático de desviaciones de las condiciones de diseño usando palabras guía (más, menos, ninguno, inverso, etc.) aplicadas a parámetros del proceso.	Procesos con P&ID disponible, instalaciones en fase de ingeniería de detalle.	Alta
HCRA (Hydrogen Combustion Risk Analysis)	Método desarrollado por WHA International sobre la base de protocolos de evaluación de peligros de hidrógeno de la NASA. Analiza sistemáticamente los tres componentes del triángulo de fuego —combustible, oxidante y fuente de ignición—, identificando las condiciones de operación y los modos de falla que pueden conducir a la formación de mezclas combustibles y a eventos de ignición, con desenlace de incendio, deflagración o detonación. Incorpora la evaluación de compatibilidad de materiales y de fragilización por hidrógeno.	Materiales, componentes y sistemas de hidrógeno, con niveles de detalle graduables. Complemento de un PHA o HAZOP, al que aporta especificidad sobre el comportamiento del hidrógeno.	Media a Alta

FMEA (Failure Mode and Effects)	Análisis de cada componente/equipo para identificar sus modos de falla, causas, efectos y criticidad.	Equipos mecánicos, sistemas de seguridad, nuevas tecnologías.	Media a Alta
PHA (Preliminary Hazard Analysis)	Identificación inicial de peligros y riesgos en etapas conceptuales del proyecto, cuando la información de diseño es limitada.	Proyectos nuevos, fase conceptual o de prefactibilidad.	Baja
Checklist	Verificación sistemática del cumplimiento de requisitos predefinidos basados en normas, códigos y lecciones aprendidas.	Complemento de cualquier método, auditorías, verificación de diseño.	Baja
Fault Tree Analysis	Análisis deductivo que parte de un evento no deseado (evento tope) y desciende lógicamente hasta las causas raíces.	Análisis de eventos específicos de alta consecuencia, complemento del HAZOP.	Alta
Event Tree Analysis	Análisis inductivo que parte de un evento iniciador y sigue las ramificaciones según el éxito o falla de las barreras de protección.	Análisis de escenarios de fuga/incendio, secuencias accidentales.	Media a Alta

Se recomienda utilizar al menos dos métodos complementarios. Por ejemplo, un HAZID o PHA en la fase conceptual, seguido de un HAZOP detallado cuando se disponga de P&IDs, complementado siempre con un Checklist basado en las normativas aplicables (NFPA 2, DS 13). Para equipos críticos o tecnologías nuevas, el FMEA aporta un nivel de detalle adicional a nivel de componentes. Cuando el proyecto se someta a autorización como proyecto especial, la metodología seleccionada debe además informarse expresamente a la SEC.

ETAPA 3: CLASIFICACIÓN DE RIESGOS

Una vez identificados los peligros y escenarios de riesgo, se procede a clasificar cada uno según dos dimensiones: la frecuencia estimada de ocurrencia y la severidad de las consecuencias potenciales. La combinación de ambas dimensiones en una matriz permite priorizar los riesgos y orientar la asignación de recursos para su reducción.

Criterios de Frecuencia

Tabla 7: Criterios de clasificación de frecuencia.

Denominación	Descripción
Frecuente	Se espera que ocurra al menos una vez durante la vida útil del proyecto. Evento con antecedentes en la industria.
Poco frecuente	Posible pero no esperado. Podrían existir antecedentes en la industria global del hidrógeno.
Improbable	Requiere fallas múltiples simultáneas e independientes. Muy pocos antecedentes a nivel global.

Criterios de Consecuencia

Tabla 8: Criterios de clasificación de consecuencias.

Nivel	Personas	Infraestructura Operación	/ Medio Ambiente
Alta	Una o más fatalidades, lesiones irreversibles fuera del límite de propiedad.	Daños superiores a \$100.000.000, destrucción de equipos mayores.	Daño ambiental extenso y/o irreversible, contaminación de cuerpos de agua.
Moderada	Hospitalización de trabajadores o terceros, lesiones graves reversibles.	Daños entre \$10.000.000 y \$100.000.000, interrupción prolongada.	Daño ambiental significativo pero reversible con remediación.
Baja	Lesiones menores tratables en sitio, atención médica sin hospitalización.	Daños menores a \$10.000.000, interrupción breve de operaciones.	Impacto ambiental menor, contenido dentro del sitio.

Matriz de Riesgo

La matriz de riesgo combina las categorías de frecuencia y consecuencia para asignar un nivel de prioridad a cada escenario identificado. Los colores indican la urgencia de las acciones requeridas:

Tabla 9: Matriz de clasificación de riesgos.

Frecuencia / Consecuencia	Alta	Moderada	Baja
Frecuente	INACEPTABLE	CRÍTICO	SIGNIFICATIVO
Poco frecuente	CRÍTICO	SIGNIFICATIVO	BAJO
Improbable	SIGNIFICATIVO	BAJO	ACEPTABLE

Acciones Requeridas según Nivel de Riesgo

Tabla 10: Acciones requeridas según nivel de riesgo.

Clasificación	Acción Requerida
INACEPTABLE	El escenario debe ser eliminado o reducido mediante rediseño. No se permite continuar con la operación bajo estas condiciones. Requiere medidas inmediatas.
CRÍTICO	Se requieren medidas de reducción de riesgo prioritarias. El riesgo debe reducirse al menos a nivel SIGNIFICATIVO antes de la operación. Requiere plan de acción con plazos definidos.
SIGNIFICATIVO	Se deben implementar medidas de reducción de riesgo adicionales conforme al principio ALARP. Requiere seguimiento y verificación de eficacia de las medidas.
BAJO	Riesgo gestionable con controles estándar. Se recomienda monitoreo periódico y revisión ante cambios. Documentar controles existentes.
ACEPTABLE	Riesgo dentro de niveles aceptables. Mantener controles existentes y monitorear. No se requieren medidas adicionales, salvo verificación periódica.

ETAPA 4: PLAN DE REDUCCIÓN DE RIESGOS

Para cada escenario clasificado en las categorías INACEPTABLE, CRÍTICO o SIGNIFICATIVO de la matriz de riesgo, se debe elaborar un plan de reducción que defina medidas específicas de prevención y mitigación. Las medidas deben seguir la jerarquía de controles, priorizando en el siguiente orden:

- 1. Eliminación:** Eliminar completamente el peligro removiendo el componente, sustancia o proceso que lo genera.
- 2. Sustitución:** Reemplazar un componente, material o proceso por uno de menor riesgo.
- 3. Controles de ingeniería:** Incorporar barreras físicas, sistemas de seguridad instrumentados, ventilación, contención, materiales compatibles.
- 4. Controles administrativos:** Procedimientos operativos, permisos de trabajo, capacitación, señalización, gestión de cambios.
- 5. Equipos de protección personal (EPP):** Como última línea de defensa cuando los controles anteriores no son suficientes por sí solos.

Tabla 11: Medidas de prevención y mitigación por escenario de riesgo.

Escenario de Riesgo	Medidas de Prevención	Medidas de Mitigación
Fuga de H ₂	Selección de materiales compatibles, diseño con mínimas conexiones bridadas, pruebas de hermeticidad, doble sello en conexiones críticas.	Detección de H ₂ (10% LEL alerta, 25% LEL alarma), ventilación forzada en recintos, cierre automático de válvulas, plan de evacuación.
Incendio / Jet fire	Separación de fuentes de ignición, clasificación de áreas (IEC 60079), puesta a tierra y protección antiestática, distancias de seguridad NFPA 2.	Detección UV/IR de llama, sistemas de extinción, cortinas de agua, muros cortafuego RF-120, plan de respuesta a emergencias.
Explosión / Deflagración / VCE	Prevención de acumulación de mezcla inflamable, ventilación diseñada para dilución, eliminación de espacios confinados.	Paneles de alivio de explosión, diseño resistente a sobrepresión, sistemas de supresión, zonas de exclusión.
Sobrepresión de equipos	Válvulas de alivio certificadas, diseño con factor de seguridad, instrumentación redundante (presión, temperatura).	Sistemas de parada de emergencia (ESD), venteo dirigido seguro, interlocks de proceso.
Evento sísmico	Diseño conforme NCh 2369:2025, juntas flexibles, fundaciones reforzadas.	Protocolos post-sísmicos de inspección y reinicio, detección de fugas post-evento, parada automática por aceleración.
Pérdida de suministro eléctrico	Sistemas UPS para instrumentación de seguridad, generador de emergencia, diseño fail-safe.	Posición segura de válvulas ante falla de energía, iluminación de emergencia, comunicaciones de respaldo.
Condiciones climáticas extremas	Protección contra radiación UV, sistemas de enfriamiento, anclajes para viento extremo, protección contra arena/salinidad.	Monitoreo meteorológico, procedimientos de operación reducida, protección contra inundación (aluviones).

ETAPA 5: DOCUMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO

El proceso de evaluación de riesgos debe quedar completamente documentado, generando un registro que permita su revisión, actualización y presentación ante la autoridad regulatoria. La documentación debe ser trazable, reproducible y accesible para todos los interesados.

La documentación debe incluir mecanismos de seguimiento y actualización, tales como:

- Revisión periódica de la evaluación de riesgos (al menos anualmente o ante cambios significativos)
- Procedimiento de Gestión de Cambios (MOC) que active una reevaluación cuando se modifiquen equipos, procesos o condiciones del entorno
- Registro de incidentes y cuasi-incidentes con actualización de la evaluación de riesgos según lecciones aprendidas
- Indicadores de desempeño de seguridad (KPIs) vinculados a los escenarios de riesgo identificados

4. Consideraciones Críticas de Seguridad

• Basadas en Evidencia Experimental

Investigación experimental reciente ha revelado un conjunto de aspectos críticos que desafían supuestos convencionales y que, si no se abordan adecuadamente, pueden conducir a una subestimación significativa del riesgo. Este capítulo desarrolla tres hallazgos respaldados por programas experimentales de instituciones de referencia internacional.

ESCENARIO DE EXPLOSIÓN DE NUBE DE GAS INFLAMABLE (VCE, POR SU SIGLA EN INGLÉS)

Las distancias de separación en las ediciones recientes de NFPA 2 están fundamentadas en el análisis de escenarios de jet fire y en la radiación térmica asociada, lo cual es técnicamente sólido. Sin embargo, las liberaciones de hidrógeno a alta presión pueden generar un escenario adicional, la explosión de nube de gas inflamable (VCE) producto de una ignición retardada de una nube inflamable, incluso sin confinamiento ni congestión. Este escenario puede producir sobrepresiones significativas a distancias considerables del punto de liberación, con consecuencias significativas a largas distancias, incluso mayores a las del jet fire.

Para sistemas a alta presión, se recomienda complementar el cumplimiento prescriptivo con un análisis mediante QRA que evalúe específicamente los escenarios de VCE y determine distancias seguras frente a sobrepresión. En una evaluación cualitativa, este aspecto debe documentarse como una consideración que requiere verificación cuantitativa posterior.

EFFECTO LIMITADO DE LA FLOTABILIDAD

Si bien el hidrógeno es 14 veces más liviano que el aire, en la práctica industrial esta propiedad tiene un impacto limitado en el comportamiento inicial de las fugas. El hidrógeno se maneja frecuentemente a altas presiones (≥ 350 bar), y bajo estas condiciones la dispersión está dominada por el momentum del chorro, no por la flotabilidad.

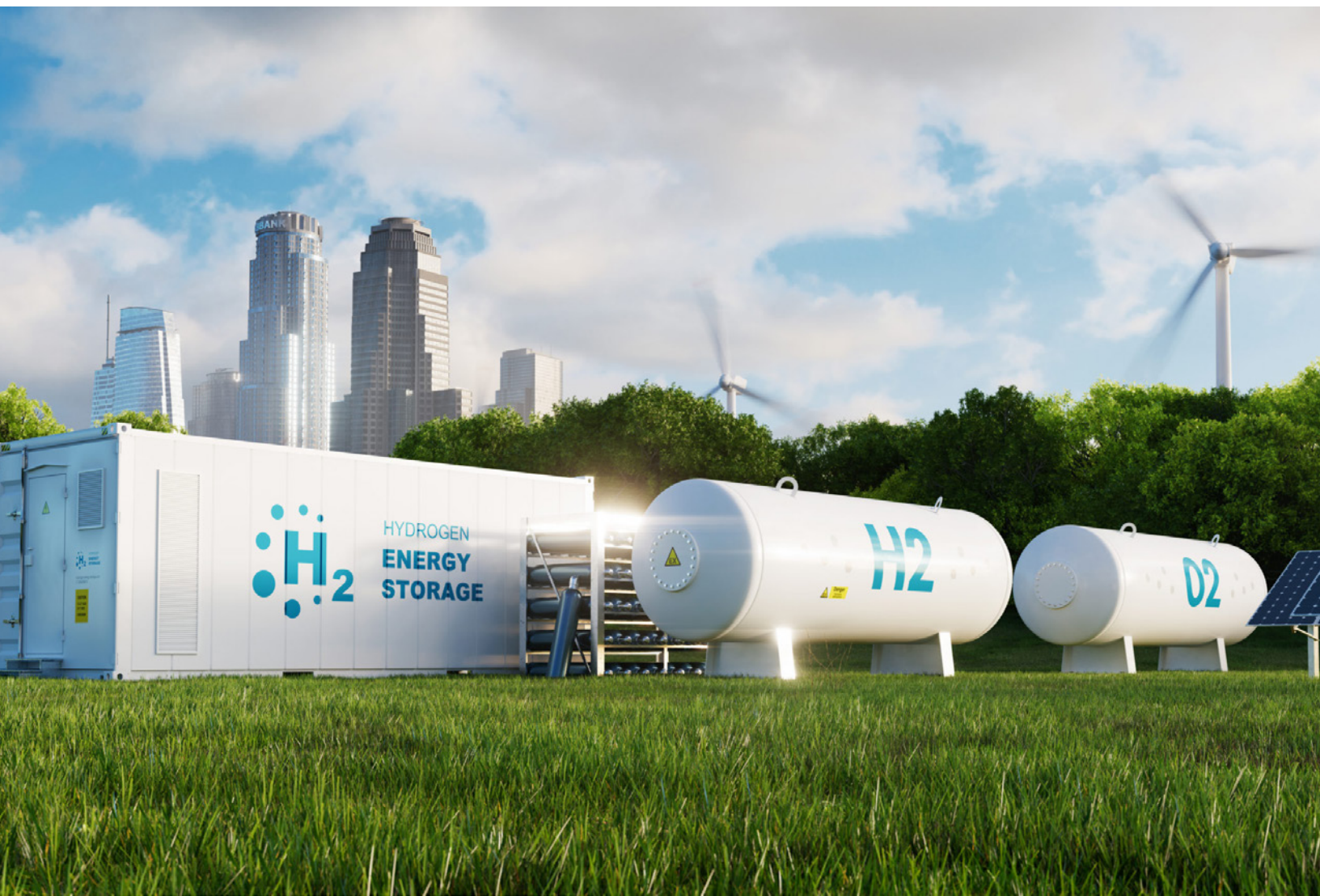
Investigaciones establecieron regímenes de dispersión según el número de Froude densimétrico (Fr). Para $Fr > 268$ el flujo es completamente dominado por momentum, $99 \leq Fr \leq 268$ es una zona de transición con efectos combinados y solo para $Fr < 99$ la flotabilidad controla la dispersión. En liberaciones a alta presión, el número de Froude es extremadamente alto, lo que significa que el chorro puede extenderse decenas de metros antes de que la flotabilidad afecte su trayectoria.

Las consecuencias prácticas son relevantes:

- Un chorro dirigido hacia abajo impacta contra el suelo, pierde momentum y se extiende lateralmente, generando una nube inflamable a nivel del piso.
- La ubicación de las ventilaciones es importante: la extracción solo arriba puede ser ineficaz si el chorro se dispersa lateralmente.
- Modelos simplificados que asumen solo dispersión por flotabilidad pueden subestimar significativamente la extensión de la nube inflamable.

EXPLOSIVIDAD DEL HIDRÓGENO SIN CONFINAMIENTO

Una fuga de hidrógeno a presión puede generar escenarios explosivos significativos incluso en entornos no confinados o congestionados. El principal mecanismo es la turbulencia inducida por el chorro, suficiente para acelerar la llama y producir sobrepresiones relevantes. Por lo tanto, el jet fire no es el único escenario posible, y un VCE por ignición retardada no debe descartarse, aun en instalaciones al aire libre, ya que puede producir consecuencias comparables e incluso superiores.



5. Riesgos Específicos del Contexto Chileno

Chile presenta un conjunto de condiciones geográficas, climáticas y regulatorias que impactan directamente en la evaluación de riesgos de proyectos de hidrógeno y que deben ser consideradas de manera explícita en cualquier estudio. El Procedimiento de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno requiere que la matriz de riesgos contemple las principales amenazas a las que pueda estar expuesta la instalación, tanto de origen operacional como natural. En el contexto chileno, ello obliga a considerar de manera explícita al menos las siguientes: sismo, tsunami, aluviones, deslizamientos de tierra, nevadas, actividad volcánica y eventos antrópicos.

RIESGO SÍSMICO

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo, situado en el Cinturón de Fuego del Pacífico. La normativa de referencia obligatoria para instalaciones industriales es la NCh 2369:2025 — Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales, actualizada en mayo de 2025 con un enfoque basado en desempeño alineado con ASCE 7 y Eurocode 8.

Aspectos clave que deben incorporarse en la evaluación cualitativa:

- **Zonificación sísmica:** NCh 2369 define tres zonas sísmicas (Zona 1 a Zona 3, siendo Zona 3 la de mayor demanda). La mayor parte de las regiones con potencial para proyectos de H₂V (Antofagasta, Atacama, Magallanes) se encuentran en zonas de alta sismicidad.
- **Clasificación de importancia:** Las instalaciones que manejan sustancias peligrosas reciben factores de importancia incrementados, lo que eleva los requisitos de diseño sísmico.
- **Estanques y recipientes a presión:** NCh 2369 establece requisitos específicos para el diseño sísmico de estanques de almacenamiento, considerando efectos de oleaje (sloshing), fuerzas dinámicas y flexibilidad de conexiones de tuberías.
- **Sistemas de seguridad:** Los sistemas instrumentados de seguridad (SIS), incluyendo detectores de H₂, válvulas de cierre de emergencia y sistemas de control, deben mantener su funcionalidad durante y después de un sismo.
- **Protocolos post-sísmicos:** Se deben definir criterios claros de inspección y verificación antes de reiniciar operaciones después de un evento sísmico significativo, incluyendo pruebas de hermeticidad y verificación de instrumentación.

RIESGOS GEOGRÁFICOS Y CLIMÁTICOS

- **Tsunami (instalaciones costeras):** Las instalaciones ubicadas en zonas costeras deben considerar el riesgo de tsunami, particularmente en las regiones del norte. Se recomienda evaluar las cartas de inundación de SHOA y ubicar equipos críticos fuera de zonas de inundación.
- **Radiación solar extrema (norte de Chile):** La zona norte presenta niveles de radiación UV entre los más altos del mundo. Esto afecta la degradación de materiales poliméricos, juntas y sellos, y puede provocar sobrecalentamiento de equipos.
- **Amplitud térmica diaria:** En el desierto de Atacama, las diferencias de temperatura entre día y noche pueden superar los 30 °C, generando fatiga térmica en tuberías, conexiones y recipientes a presión.
- **Viento, salinidad y abrasión:** Vientos intensos (especialmente en Patagonia), ambiente salino costero y partículas en suspensión aceleran la corrosión y el desgaste de componentes.
- **Aluviones e inundaciones:** Fenómenos de remoción en masa y lluvias extremas puntuales (especialmente en quebradas del norte) pueden afectar infraestructura y vías de acceso.
- **Volcanismo:** Chile cuenta con numerosos volcanes activos. Proyectos cercanos a zonas volcánicas deben evaluar riesgos de ceniza, lahares y flujos piroclásticos.
- **Altitud:** Proyectos sobre 3.000 m.s.n.m. deben considerar la menor densidad del aire (que afecta ventilación y dispersión), limitaciones operacionales para personal, y condiciones de presión atmosférica reducida.

CONTEXTO REGULATORIO EN DESARROLLO

La evaluación de riesgos debe considerar que el marco regulatorio chileno para hidrógeno se encuentra en etapa de consolidación. Esto implica:

- El DS 13/2022 establece el marco principal, pero las tecnologías no contempladas requieren tramitar un proyecto especial ante la SEC, conforme al Procedimiento de Autorización, cuyo ingreso es íntegramente electrónico y solo puede efectuarlo un instalador de gas con Licencia Clase 5 vigente.
- La experiencia regulatoria local en hidrógeno es aún limitada, lo que puede generar tiempos de tramitación variables.
- Se requiere coordinación con múltiples entidades (SEC, MINVU, SEREMI de Salud, SEA) según la naturaleza y ubicación del proyecto.
- La disponibilidad de profesionales certificados en evaluación de riesgos de hidrógeno es limitada en Chile, lo que debe considerarse en la planificación de recursos.
- Se recomienda mantener comunicación temprana y proactiva con la SEC durante el proceso de diseño del proyecto.

6. Gestión del Riesgo — Tan Bajo Como Sea Razonablemente Posible (ALARP)

Se recomienda utilizar una metodología para la gestión de riesgos donde el riesgo sea reducido a un nivel que sea tan bajo como sea razonablemente posible (ALARP, por sus siglas en inglés). Para la industria minera y energética en Chile, el riesgo residual aceptable es del orden de 10^{-4} a 10^{-6} para incidentes de gran escala como explosiones o accidentes graves.

El principio ALARP implica que, aunque no se puede eliminar el riesgo completamente —ya sea por dificultades técnicas o costos demasiado elevados—, el riesgo debe ser minimizado hasta un nivel que sea considerado razonable, tomando en cuenta factores como el costo, la tecnología disponible, el tiempo y los beneficios. Si el riesgo está por encima de un nivel aceptable, se deben implementar medidas adicionales de control.

En el contexto de la evaluación cualitativa, el principio ALARP se aplica de la siguiente manera:

- **Riesgos clasificados como INACEPTABLE o CRÍTICO:** Se encuentran por encima del umbral ALARP y requieren reducción obligatoria antes de la operación.
- **Riesgos clasificados como SIGNIFICATIVO:** Se encuentran en la región ALARP. Se deben implementar medidas de reducción siempre que el costo sea razonable en relación al beneficio de seguridad obtenido.
- **Riesgos clasificados como BAJO o ACEPTABLE:** Se encuentran por debajo del umbral ALARP. Se mantienen los controles existentes con monitoreo periódico.

Es importante documentar las decisiones de gestión de riesgos, incluyendo:

- (1) Resúmenes ejecutivos,
- (2) Reportes técnicos detallados,
- (3) La justificación de los criterios utilizados,
- (4) El análisis costo-beneficio de las medidas propuestas, y
- (5) Un plan de implementación, seguimiento y actualización.

7. Elementos Complementarios del Plan de Seguridad

La evaluación cualitativa de riesgos no es un ejercicio aislado, sino que forma parte de un sistema integral de gestión de seguridad. Los siguientes elementos complementarios son esenciales para la eficacia del plan:

GESTIÓN DE CAMBIOS

Todo cambio en el diseño, operación, personal, procedimientos o condiciones del entorno que pueda afectar la seguridad debe ser evaluado mediante un procedimiento formal de Gestión de Cambios (Management of Change). El MOC debe incluir una reevaluación de los riesgos afectados, actualización de la documentación y comunicación a todo el personal involucrado.

CAPACITACIÓN Y COMPETENCIAS

Todo el personal que trabaje con hidrógeno debe contar con capacitación específica sobre las propiedades del hidrógeno, los riesgos asociados, los procedimientos de seguridad y la respuesta ante emergencias. Se deben definir competencias mínimas y realizar evaluaciones periódicas. Se recomienda utilizar los recursos de capacitación disponibles en h2tools.org.

RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS

La instalación deberá contar con un plan de respuesta ante emergencias que incluya: procedimientos específicos para cada escenario de riesgo identificado, roles y responsabilidades del personal, recursos disponibles, coordinación con servicios de emergencia locales (Bomberos, ONEMI/SENA-PRED), rutas de evacuación, y simulacros periódicos. En Chile, se debe incluir un protocolo específico post-sísmico que defina criterios de inspección y reinicio seguro.

LECCIONES APRENDIDAS

Se recomienda mantener un registro activo de incidentes, cuasi-incidentes y lecciones aprendidas, tanto propias como de la industria global. La base de datos H2Tools Lessons Learned (h2tools.org/lessons) del Pacific Northwest National Laboratory contiene un amplio registro de incidentes con hidrógeno que debe consultarse regularmente para actualizar las evaluaciones de riesgo.

8. Estructura Estándar de Informe de Evaluación Cualitativa de Riesgos

A continuación, se presenta la estructura recomendada para la elaboración y documentación formal de un estudio de evaluación cualitativa de riesgos aplicables a proyectos e instalaciones de hidrógeno en Chile, considerando los requerimientos del DS 13, del Procedimiento de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno de la SEC y las buenas prácticas internacionales:

Tabla 12: Estructura estándar de informe de evaluación cualitativa de riesgos.

Sección	Contenido Mínimo
1. RESUMEN EJECUTIVO	Descripción general del proyecto Metodología utilizada Principales riesgos identificados Conclusiones Recomendaciones clave
2. INFORMACIÓN DEL PROYECTO	Ubicación y entorno Capacidad de producción/almacenamiento Diagrama de flujo de proceso (PFD) Diagrama de instrumentación del proceso (P&ID) Diagrama de instrumentación del proceso (P&ID) Layout de planta con distancias de seguridad
3. MARCO NORMATIVO	Cumplimiento DS 13/2022 Normativas internacionales aplicadas Criterios de aceptabilidad de riesgo Requisitos SEC
4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	Equipos y componentes principales Condiciones de operación Sistemas de control y seguridad Materiales y compatibilidad con H ₂ Condiciones ambientales y del entorno
5. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	Métodos ISV utilizados (HAZOP, What-If, FMEA, etc.) Registro de sesiones de identificación Equipo participante y competencias Listado completo de peligros identificados
6. CLASIFICACIÓN DE RIESGOS	Criterios de frecuencia y consecuencia utilizados Matriz de riesgo Resultados por escenario Priorización de riesgos

7. PLAN DE REDUCCIÓN DE RIESGOS	Medidas de prevención por escenario Medidas de mitigación por escenario Jerarquía de controles aplicada Riesgo residual esperado
8. RIESGOS ESPECÍFICOS DE CHILE	Evaluación de riesgo sísmico (NCh 2369:2025) Riesgos geográficos y climáticos Protocolos post-sísmicos Coordinación con autoridades
9. ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS	Programa de integridad mecánica Plan de gestión de cambios (MOC) Plan de capacitación Plan de respuesta a emergencias Sistema de lecciones aprendidas
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	Nivel de riesgo global del proyecto Cumplimiento de criterios de aceptabilidad Recomendaciones prioritarias Plan de seguimiento
11. ANEXOS	Registros de sesiones HAZOP/What-If Hojas de trabajo FMEA Checklists completados Planos y diagramas detallados Certificaciones de equipos

Referencias

1. Ministerio de Energía (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.
2. Ministerio de Energía (2023). Plan de Acción de Hidrógeno Verde.
3. GIZ / Ministerio de Energía (2023). Elementos clave del Plan de Acción H2V Chile.
4. Decreto Supremo N° 13/2022, Ministerio de Energía. Reglamento de Seguridad para Instalaciones de Hidrógeno. En vigor desde 24 de junio de 2024.
5. Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). Guía para Proyectos Especiales de Hidrógeno.
6. DFL N° 1/1978, Ministerio de Minería. Ley de la SEC — Registro obligatorio de instalaciones de hidrógeno.
7. NCh 2369:2025. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales. INN Chile.
8. DDU 470/2022, MINVU. Clasificación de uso de suelo para instalaciones de hidrógeno.
9. Ley 19.300. Bases Generales del Medio Ambiente. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).
10. NFPA 2:2023. Hydrogen Technologies Code. National Fire Protection Association.
11. ISO 19880-1:2020. Gaseous hydrogen — Fuelling stations — General requirements.
12. ASME B31.12:2023. Hydrogen Piping and Pipelines.
13. ISO/TR 15916:2015. Basic considerations for the safety of hydrogen systems.
14. IEC 60079-10-1:2020. Explosive atmospheres — Classification of areas.
15. IEC 61511:2016. Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector.
16. IEC 31010:2019. Risk management — Risk assessment techniques.
17. Weiner, S.C. y Fassbender, L.L. (2017). Safety Planning for Hydrogen and Fuel Cell Projects. PNNL-25279-1.
18. Weiner, S.C. et al. (2020). Example Hydrogen Safety Plan. PNNL-30457.
19. Weiner, S.C. y McQueen, S. (2021). Simplified Safety Planning for Low-Volume Hydrogen and Fuel Cell Projects. PNNL-31037.
20. Vysus Group / DSB Norway (2021). QRA Guidelines for Hydrogen Applications. Project No. 11100262033.
21. Sandia National Laboratories. HyRAM+ — Hydrogen Risk Assessment Models. hyram.sandia.gov.
22. Pacific Northwest National Laboratory. H2Tools — Safety, Codes and Standards. h2tools.org.
23. Ministerio de Energía (2026). Actualización de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y Derivados 2026-2030.
24. WHA International, Inc. Hydrogen Combustion Risk Analysis (HCRA). Método propietario de análisis de riesgos de combustión de hidrógeno. wha-international.com.

Anexos

EJEMPLO APLICADO- EVALUACIÓN CUALITATIVA DE PLANTA PILOTO DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO H₂V

A continuación, se presenta un ejemplo de evaluación cualitativa de riesgos para una planta piloto de generación y almacenamiento de hidrógeno verde, desarrollado como un registro HAZOP/PHA. El propósito es ilustrar no solo la mecánica del método, sino el nivel de detalle que distingue a un registro de alta calidad.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

- Electrolizadores AEM con capacidad de generación de 50 Nm³/h de H₂.
- Secador y purificador de H₂ (pureza 99,999%).
- Almacenamiento en tanques tipo II a 35 bar, capacidad total 850 litros.
- Válvula de alivio PSV-2101 y transmisor de presión PT-2102 en almacenamiento.
- Presostato de muy alta presión.
- Sensor H₂ con alerta 10% LEL y alarma 25% LEL en zona de generación.
- Muro cortafuego RF-120 entre zona de generación y almacenamiento.
- Ventilación forzada del recinto de generación.
- Distancias de seguridad según NFPA 2.
- Ubicación: Región de Antofagasta (Zona Sísmica 3, alta radiación solar).
- Operación continua 24/7.

REGISTRO HAZOP/PHA

Se presentan tres escenarios desarrollados de manera parcial, a modo ilustrativo. En un informe completo, cada nodo del sistema se documenta en detalle.

Tabla 13: Escenario 1, sobrepresión en el sistema de almacenamiento.

Nodo / Subsistema	Sistema de almacenamiento de H ₂ (tanques tipo II, 35 bar, 850 L)
Desviación (palabra guía + parámetro)	MÁS + PRESIÓN
Causa	Falla del lazo de control de presión durante el llenado (el regulador aguas arriba no cierra), con la válvula de alivio principal eventualmente indisponible por bloqueo o desajuste.
Consecuencia (sin salvaguardas)	La presión en el tanque supera la presión de diseño de forma sostenida, con potencial fluencia del material compuesto y degradación de empaques y uniones bridadas; potencial pérdida de contención con fuga de H ₂ a alto momentum; potencial formación de una nube inflamable que, por la baja densidad y alta difusividad del H ₂ , se extiende antes de dispersarse, ante una fuente de ignición, potencial incendio tipo chorro (jet fire) con radiación térmica intensa y/o deflagración de la nube; potencial proyección de fragmentos y daño dominó a equipos adyacentes; en el caso extremo, potencial ruptura catastrófica del tanque por sobrepresión y potenciales múltiples fatalidades en el área de operación.
Riesgo inherente	Severidad Alta × Probabilidad Frecuente → INACEPTABLE
Salvaguardas existentes	• PSV-2101, válvula de alivio en el cabezal del almacenamiento, con base de diseño dimensionada para el caso de sobrepresión por falla del regulador de llenado; descarga conducida a punto seguro de venteo en altura. • PT-2102, transmisor de presión con alarma de alta. • PSHH-2103, presostato independiente de muy alta presión que cierra la válvula de llenado. • Programa de integridad mecánica — inspección y certificación periódica de las válvulas.
Riesgo residual	Severidad Alta × Probabilidad Improbable → SIGNIFICATIVO
Recomendaciones	R1. Instalar una válvula de alivio redundante (PSV-2101B) en el sistema de almacenamiento, para proteger frente a sobrepresión ante falla o indisponibilidad de la PSV-2101 principal, eliminando el modo de falla común de válvula única. R2. Verificar que la base de diseño de la capacidad de alivio considere también el escenario de fuego externo, para confirmar que el dimensionamiento cubre el caso más exigente.

Tabla 14: Escenario 2, acumulación de H_2 en el recinto de generación.

Nodo / Subsistema	Sistema de generación (electrolizadores AEM).
Desviación (palabra guía + parámetro)	MÁS + CONCENTRACIÓN DE H_2 (acumulación en recinto cerrado)
Causa	Fuga menor en conexiones, sellos o instrumentación del electrolizador, combinada con una tasa de ventilación insuficiente para diluir el H_2 por debajo del límite inferior de inflamabilidad.
Consecuencia (sin salvaguardas)	El H_2 liberado se acumula progresivamente en la zona alta del recinto, con potencial formación de una capa de atmósfera inflamable ($\geq 4\%$ vol) de volumen creciente; dada la muy baja energía de ignición del H_2 (0,017 mJ), potencial ignición por una fuente trivial (electricidad estática, contacto eléctrico, fricción); potencial deflagración en el recinto; por la alta velocidad de llama y reactividad del H_2 , potencial escalamiento a sobrepresiones, con potencial transición a detonación en presencia de obstáculos y congestión; potencial colapso estructural del recinto y proyección de fragmentos, con potenciales múltiples fatalidades.
Riesgo inherente	Severidad Alta × Probabilidad Poco frecuente → CRÍTICO
Salvaguardas existentes	• AT-1301, detector de H_2 en zona alta del recinto, alerta 10% LEL y alarma 25% LEL; base de diseño: detección temprana de acumulación. • Ventilación forzada del recinto • Clasificación de áreas, equipo eléctrico conforme a IEC 60079 para reducir fuentes de ignición. • Muro RF-120, limita la propagación hacia el almacenamiento.
Riesgo residual	Severidad Alta × Probabilidad Improbable → SIGNIFICATIVO
Recomendaciones	R3. Incorporar paneles de alivio de deflagración dimensionados específicamente para hidrógeno en el recinto de generación, para limitar la sobrepresión máxima ante la ignición de una nube acumulada y proteger la integridad estructural y a las personas del entorno, dado que la ventilación no garantiza por sí sola evitar la acumulación inflamable. R4. Instalar un segundo detector de H_2 independiente (AT-1302) en una ubicación complementaria del recinto, para evitar el modo de falla común de detector único ante estratificación o ubicación desfavorable de la fuga.

Tabla 15: Escenario 3, pérdida de suministro eléctrico.

Nodo / Subsistema	Sistema de suministro eléctrico y control.
Desviación (palabra guía + parámetro)	NO + ENERGÍA ELÉCTRICA
Causa	Corte del suministro eléctrico externo o falla de la alimentación principal durante la operación continua.
Consecuencia (sin salvaguardas)	La pérdida súbita de alimentación produce potencial parada no controlada de los electrolizadores; potencial pérdida simultánea del monitoreo y la detección (sensores); potencial bloqueo de válvulas en posición insegura; potencial liberación o acumulación de H ₂ no detectada por ausencia de instrumentación activa; potencial evolución hacia una atmósfera inflamable sin alarma, con escalamiento hacia los escenarios de deflagración o incendio ya descritos. La consecuencia se agrava por la pérdida de la capacidad de respuesta automática.
Riesgo inherente	Severidad Moderada × Probabilidad Frecuente → CRÍTICO
Salvaguardas existentes	• UPS dedicado, alimentación ininterrumpida de la instrumentación de seguridad; base de diseño: mantener monitoreo y lógica activos durante el corte. • Válvulas fail-close, cierre seguro ante pérdida de señal o energía. • Lógica de parada segura programada en el controlador de seguridad.
Riesgo residual	Severidad Moderada × Probabilidad Improbable → BAJO
Recomendaciones	R5. Documentar y verificar mediante prueba la posición segura de todas las válvulas críticas ante pérdida de energía, para confirmar que el estado de parada conduce el sistema a una condición intrínsecamente segura. R6. Verificar la autonomía del UPS frente al peor tiempo esperado de restablecimiento del suministro en la Región de Antofagasta, para asegurar que el monitoreo permanezca operativo durante toda la contingencia.

RESUMEN DEL REGISTRO DE RIESGOS DEL EJEMPLO

Tabla 16: Resumen del registro de riesgos.

Escenario (desviación)	Riesgo inherente	Salvaguardas clave	Riesgo residual
1. MÁS + Presión (almacenamiento)	INACEPTABLE	PSV-2101, PT-2102, PSHH-2103	SIGNIFICATIVO
2. MÁS + Concentración H ₂ (recinto)	CRÍTICO	AT-1301, ESD, RF-120, ventilación	SIGNIFICATIVO
3. NO + Energía eléctrica	CRÍTICO	UPS, válvulas fail-close	BAJO

El ejemplo ilustra cómo un registro HAZOP/PHA bien desarrollado hace trazable cada escenario, desde la desviación hasta el peor desenlace posible. Justifica el riesgo inherente y residual con la matriz, y deriva recomendaciones autosuficientes. La diferencia entre el riesgo inherente y el residual evidencia el aporte de las salvaguardas existentes, mientras que las recomendaciones apuntan a cerrar las brechas remanentes.

HERRAMIENTAS Y RECURSOS DE APOYO

A continuación, se presentan herramientas y recursos de acceso libre que pueden apoyar la realización de evaluaciones cualitativas de riesgos en proyectos de hidrógeno:

Tabla 17: Herramientas y recursos de apoyo para evaluación de riesgos en proyectos de hidrógeno.

Herramienta / Recurso	Organización	Descripción y Utilidad
H2Tools (h2tools.org)	Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)	Portal integral de seguridad del hidrógeno con base de datos de lecciones aprendidas, herramienta de comparación de propiedades, calculadora de distancias de seguridad, y recursos educativos.
Lessons Learned (h2tools.org/lessons)	PNNL / DOE	Base de datos de incidentes y cuasi-incidentes con hidrógeno. Permite búsqueda por tipo de evento, componente, fase de la cadena de valor.
HyRAM+ (hyram.sandia.gov)	Sandia National Laboratories / DOE	Herramienta de análisis de riesgo de hidrógeno. Aunque enfocada en QRA, su base de datos de frecuencias de falla y modelos de consecuencias puede informar la evaluación cualitativa.
Safety Planning Documents	PNNL (PNNL-25279, PNNL-30457, PNNL-31037)	Guías de planificación de seguridad del DOE Hydrogen Safety Panel con metodologías de ISV, matrices de riesgo y ejemplos de planes de seguridad.
SEC Chile (sec.cl)	Superintendencia de Electricidad y Combustibles	Portal regulatorio con acceso al DS 13, Guía de Proyectos Especiales, formularios y requisitos de autorización.

SOBRE LOS AUTORES

- **Alvaro Videla**, director Alterno Centro de Energía UC, Profesor Departamento de Ingeniería de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- **Andrés Ruiz-Tagle, Ph.D.**, Senior Associate Engineer, Quantitative Risk Services, AcuTech Group Inc., 1750 Tysons Blvd. Suite 200, McLean, VA 22102 USA.
- **Roberto Antonio Santiago Olmedo**, Estudiante del programa de doctorado en Ingeniería y Ciencias con la Industria (DICI), Pontificia Universidad Católica de Chile, Jefe de proyectos, Centro Nacional de Pilotaje (CNP).

