



# GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE PILOTOS Y VALIDACIÓN DE TECNOLOGÍAS QUE UTILIZAN HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE EN MINERÍA.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

## CONTENIDO

---

04	1. Introducción
06	2. Objetivo de la Guía
07	3. Alcance de la Guía
08	4. Glosario de Conceptos
11	5. Documentos de un Plan de Gestión del Proyecto (PMP)
15	6. Consideraciones Adicionales
22	7. Criterios de Evaluación
29	8. Bibliografía
29	9. Anexos





## 1. INTRODUCCIÓN

---

De acuerdo al Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la ONU, nos encontramos en un momento decisivo para afrontar con éxito el mayor desafío de nuestro tiempo: el cambio climático. Ello requiere de un esfuerzo de todos los gobiernos que dentro del marco del Acuerdo de París del año 2015 deben establecer sus contribuciones determinadas a nivel nacional para lograr una reducción de las emisiones que generan el efecto invernadero con el fin de contener el aumento de la temperatura por debajo de los 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales al término de este siglo.

Dicho esfuerzo se traduce en un interés generalizado por el uso de hidrógeno como combustible ha generado gran movimiento en diversos sectores industriales. Específicamente, el sector minero ha comenzado a desarrollar, entre otras iniciativas, proyectos de movilidad y de procesos térmicos que utilizan hidrógeno debido a sus propiedades energéticas y por la nula emisión de gases de efecto invernadero durante su operación. Especialmente se están desarrollando diversas innovaciones para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub> en la minería, en donde el uso del hidrógeno como combustible y las tecnologías asociadas han destacado por su potencial.

Con ello, en atención que a esta fecha no se ha establecido una regulación específica respecto al uso del Hidrógeno en faenas mineras, que detalle las condiciones necesarias para su uso en operaciones mineras, el Servicio Nacional de Geología y Minería (en adelante, SERNAGEOMIN) ha decidido poner a disposición del ecosistema minero la presente guía para presentar proyectos piloto y la validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en faenas mineras.

El uso del H<sub>2</sub> como combustible está actualmente en etapa de prueba, desarrollo y demostración del sistema piloto integrado, para eliminar o al menos atenuar los riesgos y problemas que pudieran surgir en su implementación, que son necesarios para escalar a un uso masivo y permanente de dicha tecnología. Se entiende como una prueba de tecnología que utiliza hidrógeno como combustible, a aquellos proyectos para los cuales aún no se ha desarrollado una regulación nacional específica y se deben adoptar otras normas, códigos o prácticas en la evaluación de estos.

El fin de esta guía es establecer un marco de acción ante SERNAGEOMIN, como organismo fiscalizador en materia de seguridad minera, para que las empresas mineras utilicen sus faenas mineras para dar cabida al desarrollo de la tecnología para el uso de este combustible limpio de modo seguro en faenas mineras. Además, la implementación de esta guía le permitirá adquirir el *know how* necesario para desarrollar de mejor modo la regulación más ajustada a esta tecnología, para favorecer su uso pero de un modo seguro. Lo anterior, para efectos de asegurar el cumplimiento del Decreto Supremo N°132, de 2002, del Ministerio de Minería, que fija el texto refundido, sistematizado del Reglamento de Seguridad Minera (en adelante, RSM), que establece el marco regulatorio general al que deben someterse las faenas de la Industria Extractiva Minera Nacional para: "(...) a) Proteger la vida e integridad física de las personas que se desempeñan en dicha Industria y de aquellas que bajo circunstancias específicas y definidas están ligadas a ella y b) Proteger las instalaciones e infraestructura que hacen posible las operaciones mineras, y, por ende, la continuidad de sus procesos", y considerando el artículo 13 del mismo cuerpo normativo que dispone: "Corresponden al Servicio, en forma exclusiva, las siguientes funciones y atribuciones:



*a) Controlar y fiscalizar el cumplimiento de las normas y exigencias establecidas por el presente Reglamento y de aquellas dictadas por el propio Servicio, en el ejercicio de sus facultades (...).*

*(...) d) Proponer la dictación de normas, instructivos, circulares y desarrollar todo tipo de actividades de carácter preventivo, tendientes a optimizar los estándares de seguridad en la Industria Extractiva Minera.”*

La presente guía se realizó con el valioso apoyo del Centro Nacional de Pilotaje de Tecnologías para la Minería, en virtud de Convenio de Colaboración celebrado el 07 de septiembre de 2020, con el objeto de establecer un marco de cooperación con la finalidad de desarrollar lineamientos generales y estándares específicos para la implementación de nuevas tecnologías en los procesos de las actividades de la minería nacional.

Es relevante terminar agregando que SERNAGEOMIN tiene declarado en su objetivo estratégico número 2; mejorar el proceso de revisión de proyectos de explotación y/o plantas de tratamiento de minerales, depósitos de relaves, permisos sectoriales y de cierre de instalaciones/faenas mineras, mediante generación, actualización y difusión de guías metodológicas, para contribuir a la industria extractiva minera segura.

## 2. OBJETIVO DE LA GUÍA

---

### OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este documento es definir los requerimientos necesarios para la implementación de los proyectos pilotos en que se desarrollen pruebas, en donde se produzca, acondicione, transporte, distribuya, almacene y/o utilice Hidrógeno (H<sub>2</sub>) como combustible, en las faenas y operaciones mineras y que buscan validar un proceso que posteriormente se realizará de manera permanente; y estandarizar dentro del SERNAGEOMIN, los criterios de evaluación, aplicables a todos los proyectos que reúnan las mismas características.

La guía descrita a continuación busca reducir la probabilidad de incidentes y accidentes durante la prueba y cuidar la estabilidad fisicoquímica de las instalaciones.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Se distinguen tres objetivos específicos:

1. Comunicar los estándares establecidos por el SERNAGEOMIN para permitir al proponente presentar un proyecto piloto que utiliza hidrógeno como combustible en Minería con las medidas necesarias, para garantizar el cumplimiento de los requerimientos establecidos en el artículo 31 del DS 132: *“La Empresa minera debe adoptar las medidas necesarias para garantizar la vida e integridad de los trabajadores propios y de terceros, como asimismo de los equipos, maquinarias, e instalaciones, estén o no indicadas en este reglamento”.*
2. Establecer los dominios y criterios de evaluación que regule la seguridad para pruebas piloto de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería, en el marco del artículo 239 del Reglamento de Seguridad Minera, *“La empresa minera deberá presentar, para la aprobación del Servicio, los respectivos Reglamentos que definan estándares de trabajo, a lo menos de las siguientes operaciones: a). Tránsito de vehículos y personas en la mina. b). Perforación y tronaduras. c). Carguío y transporte de material. d). Sistemas de emergencias. El Servicio tendrá un plazo de treinta (30) días para responder la solicitud, desde la fecha de presentación de ella en la Oficina de Parte”.*
3. Facilitar la presentación de la solicitud de aprobación por parte del proponente.

### 3. ALCANCE DE LA GUÍA

En esta guía se definen los requerimientos que solicita SERNAGEOMIN a las personas o empresas interesadas en implementar pruebas de tecnología que usarán hidrógeno como combustible dentro de las operaciones mineras fiscalizadas por nuestro Servicio. Lo anterior, en el marco del artículo 239 del Reglamento, antes referido. Aplica para proyectos en instalaciones de rajo abierto, sin perjuicio que podrá aplicarse análogamente a otras instalaciones en caso que sea necesario. En caso que las pruebas pilotos pasen a un uso intensivo de la tecnología de modo permanente, se deberá realizar una modificación mayor al método de explotación, sobre la base del cambio tecnológico, esto conforme lo dispuesto en el artículo 22 del Reglamento de Seguridad Minera.

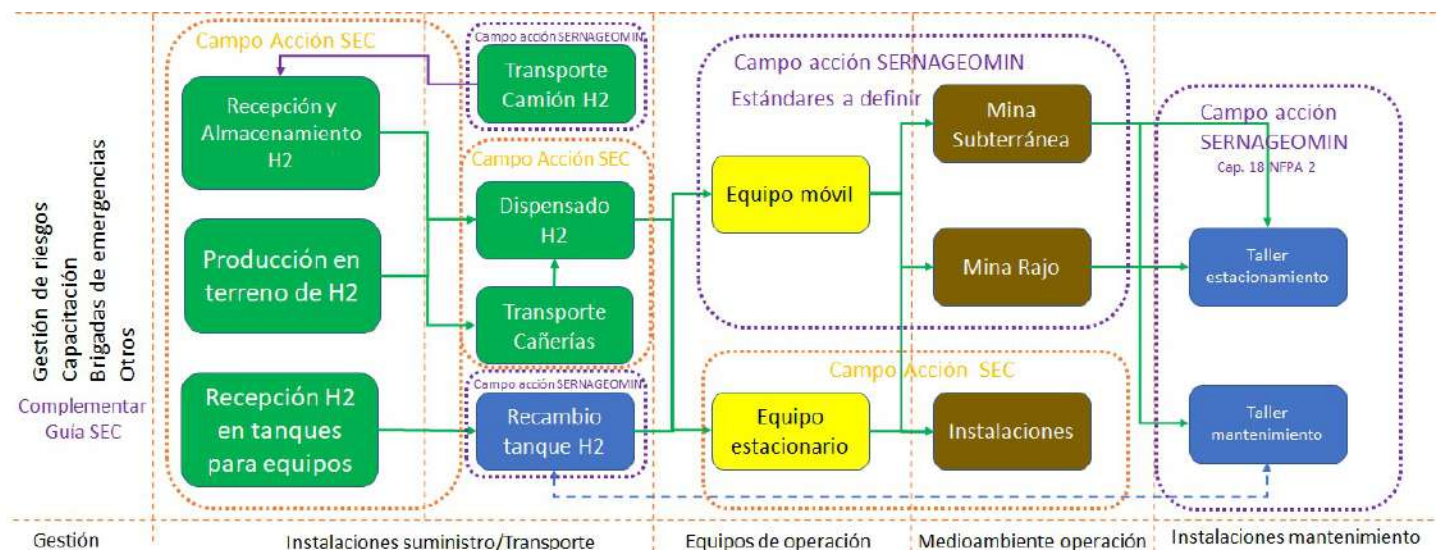
Junto con lo anterior, se señala que el alcance de esta guía coordina la acción con la SEC identificando aquellos campos de acción que son de responsabilidad de la SEC y del Sernageomin. Se identifican como campos de acción de la SEC:

1. La recepción y almacenamiento del H<sub>2</sub>
2. La producción en terreno del H<sub>2</sub>
3. La recepción de H<sub>2</sub> en tanques para equipos, el dispensado de H<sub>2</sub>
4. El transporte en Cañerías
5. El uso de H<sub>2</sub> en equipos estacionarios y en las instalaciones del sitio minero

Por otra parte, se identifican como campos de acción del Sernageomin:

1. El recambio de tanques de H<sub>2</sub>
2. El uso de H<sub>2</sub> como combustible en equipos móviles de uso tanto en minería subterránea como de rajo
3. El mantenimiento de estos equipos en el taller de mantenimiento de la mina y sus cuidados en el estacionamiento de los mismos equipos.

La figura muestra las áreas de cuidado y los campos de acción de cada servicio.



Se hace presente que esta este instrumento es una orientación o guía, y busca facilitar la entrega de antecedentes y su revisión y evaluación administrativa por parte del Servicio. Sin embargo, sus contenidos no son ni pueden ser considerados como obligatorios o normativos.

## 4. GLOSARIO DE CONCEPTOS

Debido a que esta guía trata de conceptos y procesos operacionales donde los términos específicos a menudo varían según las referencias, esta lista identifica términos que la guía aplica para describir estos conceptos y explicar términos que a menudo se usan indistintamente. Las definiciones corresponden al lenguaje utilizado en los estándares de seguridad, normativas y documentos de organismos con experiencia en hidrógeno utilizados en esta guía y listados en el apartado de referencias.

### NOMENCLATURA

<b>NFPA</b>	National Fire Protection Association	<b>SERNAGEOMIN</b>	Servicio Nacional de Geología y Minería
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization	<b>HAZOP/AFO</b>	Análisis Funcional de Operatividad
<b>DS</b>	Decreto supremo	<b>LH2</b>	Hidrógeno líquido
<b>SEC</b>	Superintendencia de Electricidad y Combustibles.	<b>GH2</b>	Hidrógeno gaseoso
<b>FMEA</b>	Failure Mode and Effects Analysis	<b>CHP</b>	Combined heat and power
<b>APR</b>	Análisis preliminar de riesgos	<b>PMP</b>	Plan management Project
<b>RCA</b>	Resolución de calificación ambiental	<b>H2</b>	Hidrógeno
<b>LOHC</b>	Liquid organic hydrogen Carrier	<b>RSM</b>	Reglamento de Seguridad Minera
<b>CCP</b>	Clasificación de Peligro	<b>IPER</b>	Identificación de peligros y evaluación de riesgos
<b>LOP</b>	Layer of Protection		

### TÉRMINOS

**Peligro:** Potencial fuente de daño. Es posible clasificarlo en base al origen que puede producir dicho daño en: Peligro material inflamable, peligro material tóxico, etc.

**Riesgo:** Resultado del daño producido por un accidente potencial y su probabilidad de ocurrencia.

**Emergencia:** Circunstancia no intencionada, con un claro riesgo al personal o instalaciones y que requieren respuesta inmediata.

**Explosión:** Combustión auto sustentada de una mezcla gaseosa que libera calor y productos de combustión calientes.



**Deflagración:** Proceso de combustión en el que una flama o una reacción química avanza a través de un medio o mezcla inflamable a una velocidad menor a la velocidad del sonido en la mezcla sin combustionar.

- **Nota1:** Deflagración rápida está caracterizada por velocidades de cientos de metros por segundo, y sus efectos no se diferencian mayormente de una detonación.
- **Nota2:** Ondas de deflagración laminares están caracterizadas por velocidades de varios metros por segundos y no causan mayores alzas de presión en el ambiente.

**Detonación:** Proceso de combustión caracterizado por un choque controlado que resulta en un fenómeno de combustión que se propaga más rápido que el sonido.

- **Nota1:** Una detonación es una explosión, pero una explosión no es una detonación.
- **Nota2:** La energía térmica de la reacción sustenta la onda de choque y esta onda comprime el material no reactante, produciendo las altas temperaturas necesarias para iniciar la reacción.

**Combustión:** Reacción en la cual una sustancia inflamable es oxidada, produciendo un gas producto caliente, calor, radiación, y posibles ondas de presión.

**Inflamabilidad:** Grado en el cual un material o sustancia puede entrar en ignición en una atmósfera oxidada, es decir, con presencia de oxígeno.

**Prueba Piloto:** Es la disposición de un escenario real de pruebas del funcionamiento de sistemas con uso de hidrógeno.

## NIVELES DE CLASIFICACIÓN EN PROYECTO

**Piloto:** Prueba de un producto que tiene las características técnicas y de funcionamiento del producto final. Sirve de modelo para testear su comportamiento operacional y funcional bajo condiciones reales en una muestra representativa a escala masiva, y buscar la aceptación de sus atributos por parte de los usuarios. Existe un ciclo de retroalimentación para evaluarlos si no son satisfactorios.

**Sistema de hidrógeno:** Una combinación de elementos, subsistemas, componentes y equipos que integrados permiten cumplir un objetivo operacional asociado a tecnologías de hidrógeno. Los elementos incluyen productos (hardware, software, firmware), procesos, personas, información, técnicas, instalaciones, servicios y todo otro elemento de apoyo (ISO/IEC/IEEE 15288).

**Subsistemas:** Un conjunto de elementos o componentes que permiten cumplir una función determinada y que forman parte de un sistema de tecnologías de hidrógeno.

**Componente:** Conjunto de partes o partes, que permite que un subsistema de tecnologías de hidrógeno cumpla con su función.

**Equipo de hidrógeno:** Equipo estacionario o móvil o vehículo que consume hidrógeno para cumplir con la misión para la cual fue diseñado.

**Proceso:** Un grupo de actividades interrelacionadas o interactuantes que transforma un insumo (input) en un producto (output) (ISO 9001:2008).

## ESPECÍFICOS TECNOLOGÍA DE H<sub>2</sub>

**Electrólisis:** Producción de H<sub>2</sub> utilizando agua y un diferencial de potencia, el cual separa las moléculas del agua.

**Electrolizador:** Equipo para generar hidrógeno mediante el proceso de electrólisis.

**Celdas de combustible:** Equipo que permite generar electricidad mediante un proceso químico sobre un combustible, en el caso de la guía se centrará en el uso de hidrógeno.

**Fragilidad por H<sub>2</sub>:** Proceso que da como resultado una disminución de la ductilidad de un metal, agrietándose y volviéndose quebradizo después de la exposición y absorción de hidrógeno.

**Combustión dual:** Reacción en la cual dos sustancias inflamables, en este caso Diesel e hidrógeno, son oxidadas produciendo un gas producto caliente, calor, radiación, y posibles ondas de presión.

**Almacenamiento de H<sub>2</sub>:** Almacenamiento físico basado en compresión o licuefacción, enfriamiento o una combinación de ambos (almacenamiento híbrido). Existen otras tecnologías de almacenamiento en investigación, aunque aún no son suficientemente maduras a nivel comercial.

## 5. DOCUMENTOS DE UN PLAN DE GESTIÓN DEL PROYECTO (PMP)

Para solicitar la autorización de un proyecto minero de implementación de piloto y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería, los antecedentes del proyecto deberán ser ingresados a través de la Oficina de Partes virtual en la página web del Sernageomin, acompañando todos los antecedentes mediante archivos digitales, en formatos entre otros .doc, .xls, .pdf, JPEG, etc.

El siguiente listado de documentos, cubre el plan de gestión del proyecto (PMP) para un proyecto de implementación de piloto y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería. El plan debe dejar claro los objetivos, indicando qué se hará, cómo se hará y el cronograma propuesto para hacerlo.

DOCUMENTO N°1 - DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO PILOTO		
N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN
1.1	<b>Propuesta de proyecto</b>	Se requiere una descripción general del proyecto, un resumen de las principales etapas de su ciclo de vida, el número de personas empleadas, la ubicación y el acceso, historial previo, gestión de contratistas, etc.
1.2	<b>Organización y Roles clave</b>	Organigrama gerencial para la prueba donde las responsabilidades deben estar claramente definidas y asignadas.
1.3	<b>Cronograma de trabajo</b>	Cronograma detallado de trabajo, considerando: Carta Gantt detallada completa del proyecto, cuadro con los Hitos importantes de la prueba y en los que se deba realizar un informe de avance para Sernageomin y programa de evaluación de los resultados de las pruebas y sus modificaciones si corresponde.
1.4	<b>Empresas que dan respaldo y/o habilitación de los equipos de hidrógeno</b>	El titular del proyecto debe acompañar los antecedentes que permitan asegurar que los componentes que se relacionan directamente con la cadena de valor del proyecto de hidrógeno y/o la cadena de producción minera y que son indispensables en el funcionamiento del sistema posean un nivel de conformidad emitido por el fabricante, o en su defecto indique como lo efectuará <sup>1</sup> .
1.5	<b>Gestión de contratos</b>	
1.6	<b>Proceso de implementación</b>	Detallar diferentes fases de la prueba, en campo abierto o de diseño particular, considerando la gradualidad de la implementación y que represente un escalamiento para posterior uso en mina real.
1.7	<b>Ubicación y accesos</b>	Describir la ubicación donde se llevará a cabo la implementación indicando, mencionando ciudades de referencia y sus coordenadas según sistema WGS84. Adjuntando planos y mostrando su relación con el resto de la operación, detalle de ruta o rutas de acceso al sitio donde se implementará la tecnología, niveles de seguridad, señalética blanda y dura, etc. Finalmente, en este punto es relevante que el proponente describa cualquier condición climática que implique un mayor riesgo de seguridad en la operación del pilotaje. Por ejemplo, minería de alta montaña o de mar.

<sup>1</sup> Se hace presente que la SEC está elaborando un protocolo o norma de certificación de este tipo de instalaciones y equipos. Cuando sea aprobado y difundido, se espera que las instalaciones y equipos sean sometidas a este sistema.



1.8	<b>Objetivo General y específicos</b>	Mostrar a una escala reducida la interacción de los equipos que consumen H2 en una implementación de madurez operativa que permita testear su comportamiento operacional y funcional en una muestra representativa, y buscar la aceptación de sus atributos de seguridad por parte de los usuarios.
1.9	<b>Diseño de experimento y validación</b>	
1.10	<b>Resultados esperados de las actividades</b>	

## DOCUMENTO N°2 - TECNOLOGÍA Y FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA

N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN
2.1	<b>Composición y equipamiento del sistema de hidrógeno</b>	<p>Descripción detallada de la tecnología, considerando su estrategia de funcionamiento (Filosofía de operación). Se debe presentar un diagrama descriptivo del proceso general y de aquellos específicos. En caso de existir diferentes procesos se deberá realizar un diagrama del proceso general y uno para cada proceso particular o específico. Los diagramas de procesos del ámbito de acción del Sernageomin se pueden resumir en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Diagrama de procesos de equipos móviles</li> <li>▸ Diagrama de procesos de estacionamiento y patios de estacionamiento de equipos móviles</li> <li>▸ Diagrama de procesos en talleres de mantenimiento de equipos móviles</li> </ul> <p>En los diagramas de procesos que se presenten, se deberán mencionar las normas de seguridad técnicas que apliquen y que son sugeridas en Anexo D. Además, se deberán describir las producciones o consumos de electricidad en el proceso, resumen del tamaño y tipo de unidades que se desplegarán en la operación minera propuesta. En caso de Retrofitting, se debe especificar las actividades necesarias para el retrofitting que expongan la seguridad del personal y/o las instalaciones mineras.</p>
2.2	<b>Instalaciones dentro del área de operación de sistemas de hidrógeno</b>	Detallar y describir las instalaciones con todos los sistemas y subsistemas partícipes del proceso de consumo de H2 en equipos móviles y mantenimiento de equipos de hidrógeno del proyecto presentado. Se debe asegurar coherencia entre la información presentada y el plano del proceso.
2.3	<b>Diagramas de flujo de Sistemas de seguridad y sistemas de control</b>	
2.4	<b>Redundancia del sistema</b>	Explicar los respaldos del sistema.
2.5	<b>Nivel de integridad de seguridad</b>	Interoperabilidad (varios proveedores) de sistemas y detalle de interacción que tendrán entre ellos (niveles de seguridad).

2.6	<b>Cumplimiento de estándares nacionales/ internacionales</b>	<p>Señalar las normativas técnicas y estándares de seguridad nacionales o internacionales que se utilizarán en el diseño, la aplicación, la operación y cierre del proyecto presentado. Como orientación para los proponentes, en Anexo D, se ofrece como sugerencia un listado de normativas técnicas para las diferentes etapas de la cadena de valor del hidrógeno. Además, se puede incluir información técnica de proyectos similares a modo de corroborar experiencia en el desarrollo de proyectos de hidrógeno.</p> <p>En específico se pide que lo descrito responda las siguientes preguntas: ¿Por qué la elección de esos estándares? ¿Cómo van a cumplirse? La respuesta a las preguntas anteriores permitirá completar la matriz de consideraciones normativas que se señala en el Anexo E.</p> <p>Las normas o estándares técnicos incorporados en la matriz de consideraciones normativas (contenido relevante y aplicación) del proyecto deben estar en español.</p>
2.7	<b>Limitaciones del sistema</b>	Levantamiento de las limitaciones especificadas por el proveedor de el o los equipos.

## DOCUMENTO N°3 – PLAN GENERAL DE SEGURIDAD Y CONTROL DE EQUIPOS

N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN (no todos los ítems tienen una descripción)
3.1	<b>Estrategia de gestión de riesgos</b>	<p>Se requiere una estrategia de gestión de riesgos que considere entre otros: una matriz de riesgos completa, análisis de capas de protección y seguridad, análisis de seguridad funcional, gestión del cambio, procedimientos de identificación y notificación de peligros para los empleados, inspecciones del lugar de trabajo, monitoreo del ambiente de trabajo, investigaciones de incidentes y alertas de seguridad del regulador. Incluyendo una declaración del compromiso de la empresa con la seguridad y el proceso de identificación, gestión y evaluación de riesgos.</p> <p>Nota: La fase de identificación de riesgos es el paso más importante en el proceso, si no se identifica un riesgo, el proceso de gestión de riesgos es ciego a ese riesgo.</p>
3.2	<b>Capas de protección</b>	Presentar un análisis de capas de protección (LOP, por sus siglas en inglés) para los riesgos principales, describiendo qué capas de protección se tienen consideradas de manera de prevenir los impactos. Dentro de las capas se incluyen herramientas de diseño de proceso y control, instrumentos de seguridad y alarmas, entre otros. Se sugiere incluir 5 capas de seguridad.
3.3	<b>Cálculo del Criterio de Clasificación de Peligro (CCP)</b>	Se debe describir la metodología utilizada y presentar el desarrollo de las memorias de cálculo utilizadas para lograr la estimación del nivel de peligro del proyecto.
3.4	<b>Matriz de riesgos convencional IPER</b>	Describir de manera precisa de qué se trata y evitar el uso de abreviaciones para cada una de las operaciones unitarias y plan de control de intolerables.
3.5	<b>Competencias del equipo de implementación</b>	Se debe respaldar las competencias de todo el personal asignado, tanto gerencial, supervisores, operadores, controladores, etc. Demostrando la formación, experiencia, habilidades y conocimiento necesarios por parte del equipo de trabajo.

<b>3.6</b>	<b>Entrenamiento y supervisión</b>	Presentación del programa para asegurar que todo el personal afectado por la implementación de la tecnología sea consultado, entrenado, supervisado y/o guiado según sea necesario.
<b>3.7</b>	<b>Medios de investigación de fallas</b>	

## DOCUMENTO N°4 - COMISIONAMIENTO, MANTENIMIENTO E INSPECCIONES

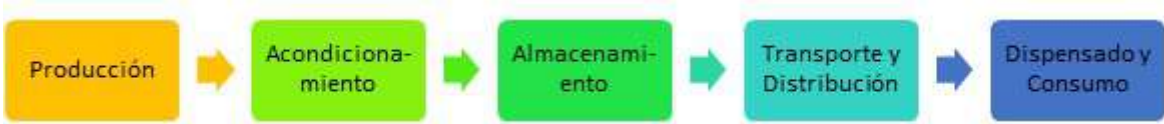
N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN (no todos los ítems tienen una descripción)
<b>4.1</b>	<b>Proceso de Comisionamiento</b>	Detallar y describir los equipos manuales y sus niveles de autonomía, funcionalidades.
<b>4.2</b>	<b>Plan de mantenimiento e inspección de los equipos que utilizan hidrógeno.</b>	Conjunto y descripción de tareas a los equipos con el fin de cumplir evitar fallas y accidentes, sin poner en riesgo la seguridad de las personas.
<b>4.3</b>	<b>Mantenimiento e inspección de equipos auxiliares</b>	
<b>4.4</b>	<b>Mantenimiento e inspección sistema de control</b>	

## DOCUMENTO N°5 - APÉNDICES

N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN
	<b>Apéndice A</b>	Planos
	<b>Apéndice B</b>	Detalle de evaluación de riesgos
	<b>Apéndice C</b>	Plan de respuesta a emergencias
	<b>Apéndice D</b>	Protocolos de inspección
	<b>Apéndice E</b>	Protocolo de pruebas



## 6. CONSIDERACIONES ADICIONALES

N°	DESCRIPCIÓN
1	<p><b>Hidrógeno, cadena de valor:</b> En esta sección se verán los principales sistemas que componen las etapas de la cadena de valor del hidrógeno enfocada en la industria minera. Se recomendará una forma de clasificación para los diferentes tipos de proyectos de hidrógeno y finalmente, se verán los principales escenarios de operación previstos de proyecto de pilotaje de tecnologías que usan hidrógeno como combustible en la minería.</p> <p><b>Cadena de Valor y Componentes del sistema de hidrógeno para minería</b></p> <p>Los sistemas de hidrógeno son clasificados en base a la función que estos desarrollan a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno. La cadena de valor consta de cinco principales etapas, como se muestra en figura 1, y va desde sistemas de producción de H2 hasta el consumidor o aplicación final de H2 o sus derivados. (Ref 5)</p>  <pre> graph LR     A[Producción] --&gt; B[Acondicionamiento]     B --&gt; C[Almacenamiento]     C --&gt; D[Transporte y Distribución]     D --&gt; E[Dispensado y Consumo]     </pre> <p>Figura 1: Cadena de valor del H2 de referencia.</p> <p><b>1. Producción</b> Es la etapa en donde están los procedimientos, instalaciones y equipos necesarios para la generación de hidrógeno y su transferencia a una siguiente etapa.</p> <p><b>2. Acondicionamiento [1]</b> Es la etapa en la cual el hidrógeno sufre un cambio físico o químico necesario para almacenarlo, transportarlo o consumirlo. Se considera como una etapa intermedia.</p> <p><b>3. Almacenamiento</b> Es la etapa donde se guarda el hidrógeno en cualquier estado y por cualquier periodo dependiendo del tipo de proyecto. Incluye los procedimientos, instalaciones y equipos necesarios para recibir y guardar cantidades determinadas y despachar en los momentos y cantidades requeridos.</p> <p><b>4. Transporte y Distribución</b> Es la etapa que considera los procedimientos, instalaciones y equipos necesarios para llevar el hidrógeno desde donde se produce/acondiciona/almacena hasta el inicio de otra etapa de la cadena de valor donde se requiera. Esta etapa excluye el dispensado de hidrógeno.</p> <p><b>5. Uso final o Consumo</b> Es la etapa final de la cadena y considera los procedimientos, instalaciones y equipos necesarios para convertir el hidrógeno en formas de energía térmica, mecánica o eléctrica, o en productos derivados para uso energético. Esta etapa incluye el dispensado público o privado y comienza con el transporte de hidrógeno desde el sistema de dispensado donde se conecta la tobera con el equipo móvil y termina cuando la molécula de hidrógeno es utilizada y transformada químicamente.</p>

Las etapas de acondicionamiento, almacenamiento y transporte y distribución en la cadena de valor pueden tener diferentes destinos, no necesariamente continuar hacia consumo, dependiendo de las necesidades de cada proyecto. A modo de ejemplo, puede existir el caso en donde se produzca el hidrógeno y se consuma dentro de la misma instalación o que se necesite acondicionar más de una vez el hidrógeno durante el proceso antes de su uso final.

[1] En norma ISO 15916 no se plantea esta etapa.

Áreas de trabajo previstas en Minería En el contexto de la minería, y como se muestra en la figura 2, las etapas de la cadena de valor se componen de tres grandes áreas.

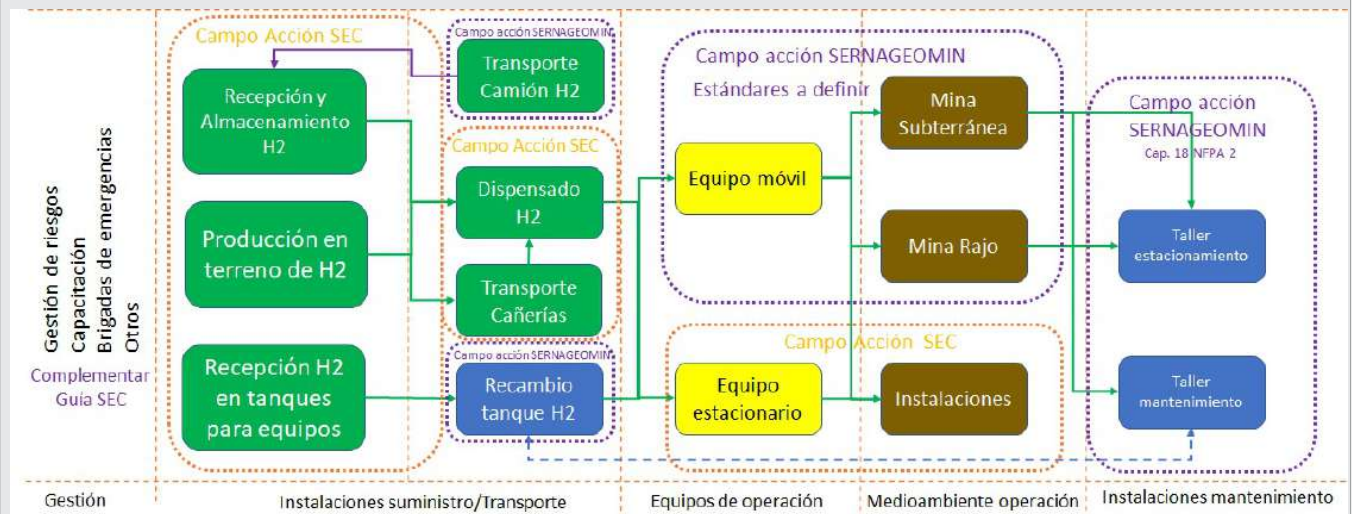


Figura 2: Componentes y flujos en sistemas mineros que usan hidrógeno

## 2 1. Instalaciones de suministro:

En esta categoría se encuentran las etapas de producción, almacenamiento, acondicionamiento y distribución de hidrógeno las cuales serán configuradas y diseñadas en función de los equipos de operación al cual vaya dirigido el suministro, véase figura 1. El objetivo principal de esta instalación es suministrar el hidrógeno de forma segura, limpia y continua de tal modo de no interrumpir los ciclos de operación. El órgano encargado de revisar y autorizar estos sistemas de hidrógeno es la SEC, con la excepción del sistema de recambio de tanques de H2 el cual es realizado en las instalaciones de mantenimiento y que es parte de la línea de acción de SERNAGEOMIN. Para más detalle de los tipos de sistemas para cada una de las etapas de la cadena de valor véase Anexo A.

## 2. Equipos de operación:

En esta categoría se encuentra la etapa de consumo o uso final del hidrógeno. El objetivo principal es realizar algún tipo de trabajo dentro del proceso minero por medio de la energía suministrada por el hidrógeno. Dentro de los equipos de operación se encuentran dos clasificaciones:

**Equipo móvil:** Representa cualquier equipo utilizado en la minería que consume hidrógeno directamente mediante su combustión, o en una mezcla de este con otro combustible, o indirectamente a través de electricidad producida por hidrógeno, y tiene la capacidad de desplazarse para funcionar en distintas ubicaciones, como así también cualquier vehículo que contiene hidrógeno mientras realiza su desplazamiento. Estos pueden ser empleados para operar en minas subterráneas o minas a rajo, además de utilizarse en carretera o fuera de ella. El organismo encargado de revisar y autorizar las pruebas piloto

en estos equipos es Sernageomin. Algunos ejemplos de equipos móviles en minería para transporte en carretera son: camiones de transporte, camionetas, buses, automóviles, otros vehículos livianos; Y de equipos móviles fuera de carretera son: containers móviles, camiones de carga, camionetas, vehículos pesados, grúas, otros equipos.

**Equipo estacionario:** Representa cualquier equipo que utiliza hidrógeno para realizar parcial o totalmente su trabajo en operación. Estos pueden encontrarse en instalaciones abiertas o cerradas y el organismo encargado de revisar y autorizar estos equipos es la SEC. Algunos ejemplos de equipos estacionarios para minería son calderas, motores duales, turbinas, celdas de combustible estacionarias, sistemas de calor y potencia combinados o CHP (por sus siglas en inglés), entre otros.

### 3. Instalación de mantenimiento:

En esta categoría se encuentran el personal, la maquinaria y equipos necesarios para mantener, reemplazar y reparar los diferentes sistemas y componentes de hidrógeno presentes en las otras dos categorías. Esta etapa tiene como objetivos principales: el aumentar los tiempos de disponibilidad de equipos y componentes de hidrógeno y verificar el correcto funcionamiento de los equipos según los estándares técnicos de operación y seguridad. Por esta razón se considera como una etapa fundamental en la cadena de valor de hidrógeno para la minería. Las instalaciones de mantención pueden ser separadas en dos grandes áreas:

**Taller o lugar de estacionamiento:** Estará enfocado principalmente en estacionar y guardar los vehículos de hidrógeno en periodos en que no se encuentren operando. El lugar debe tener todas las medidas de seguridad y dispositivos de control de emergencias correspondientes.

**Taller de mantenimiento:** Estará enfocado principalmente en verificar, revisar, reparar y mantener los sistemas, componentes, maquinarias y equipos de hidrógeno de la instalación minera.

**Clasificación de proyectos:** Con el fin de facilitar, tanto la recopilación de antecedentes a presentar como la revisión de dichos antecedentes, se clasificarán los proyectos según su tipo. Los tipos de proyectos [1] de hidrógeno para la minería serán determinados según la función que desempeñen dentro de un proyecto en la cadena de valor como por el nivel de peligro que representan a trabajadores e instalaciones.

3

#### Clasificación en base a Cadena de valor

Para el caso de la clasificación según su función en la cadena de valor y en base a la sección anterior, se presenta la siguiente clasificación:

- **Suministro de hidrógeno**  
Producción , Acondicionamiento , Almacenamiento, Distribución
- **Consumo de hidrógeno (Equipos de operación)**
- **Mantención de equipos de hidrógeno (Instalación de mantenimiento)**



<b>4</b>	<b>Tipos de sistemas y subsistemas de hidrógeno para cada etapa de la cadena de valor</b>	
	<b>Producción</b>	
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reformado de hidrocarburo (Metano)</li> <li>2. Electrólisis del agua</li> <li>3. Gasificación de biomasa</li> <li>4. Otro (Ej: Termólisis de agua, Fermentación oscura)</li> </ol>	
	<b>Almacenamiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contenedor a presión: Cilindros (Tipo I,II,III,IV), Isotubos, Tanques fijos</li> <li>2. Contenedores térmicamente aislados</li> <li>3. Contenedores de hidruros</li> <li>4. Contenedores de líquidos orgánicos</li> <li>5. Contenedores de nanomateriales</li> <li>6. Cavernas</li> <li>7. Otro.</li> </ol>		
<b>Transporte</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cilindros en camión</li> <li>2. Isotubos en camión</li> <li>3. Gas a presión en camión tanque</li> <li>4. Líquido en camión tanque</li> <li>5. Líquido orgánico en camión tanque</li> <li>6. Gasoducto</li> <li>7. Líquido por cañerías</li> <li>8. Marítimo, hidrógeno líquido en barco tanques</li> <li>9. Otro.</li> </ol>		
<b>Consumo</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Uso de 100% Hidrógeno directamente: Motor de Combustión, Motor de Combustión, Otros</li> <li>2. Sistema Dual Hidrógeno + Combustible (Diesel o GN): Motor de Combustión, Otros</li> </ol>		

<b>5</b>	<b>Listado de normas técnicas sugeridas</b>	
	<p>En esta sección se presentan las normas técnicas nacionales o internacionales en las que se puede basar el diseño, construcción y operación de las instalaciones del proyecto y que serán utilizadas para respaldar los estándares de seguridad del proyecto. A continuación, a modo de orientar a los proponentes, se ofrece un listado de normativa técnica de gran aceptación para las diferentes etapas de la cadena de valor del hidrógeno. A continuación, se proporcionan estándares de seguridad comúnmente usados en los proyectos de hidrógeno de acuerdo a la cadena de valor [1]:</p>	
	<b>1. General a la cadena de valor:</b>	
	1. ASME B31.12 Hydrogen piping and pipelines	2. ASME STP-PT- 006 Design Guidelines for Hydrogen Piping and Pipelines
	3. CSA B51 Boiler, Pressure Vessel, and Pressure Piping Code	4. ISO 15916 Basic consideration for the safety of hydrogen systems
5. ISO 14687 Hydrogen fuel quality - Product specification	6. NFPA 2 caps. 1 a 8 General, CH2 y LH2	
7. NFPA 55 Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code		

5	<b>2. Producción de H<sub>2</sub>:</b>	
	8. NFPA 2 capítulo 13 Hydrogen Generation Systems	9. ISO 16110 Hydrogen generators using fuel processing technologies
	10. ISO 22734 Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial, commercial, and residential applications.	
	<b>3. Acondicionamiento:</b>	
	11. ANSI/CSA HGV 4.8-2012 (R2018) Hydrogen gas vehicle fueling station compressor guidelines	
	<b>4. Almacenamiento:</b>	
	12. ASME (BPVC) Boiler and Pressure Vessel Code	13. ISO 11114-1:2020 Compatibility of cylinder gas and valve materials with gas contents
	14. EIGA 100/11 Hydrogen Cylinders and Transport Vessels	15. EIGA 171/12 Storage of Hydrogen in Systems Located Underground
	16. NFPA 2 cap. 7-8 Gaseous Hydrogen / Liquefied Hydrogen	17. CGA H-2 Guideline for Classification and Labeling of Hydrogen Storage Systems with Hydrogen Absorbed in Reversible Metal Hydrides
	18. NFPA 55 Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code	19. ISO 16111 Transportable gas storage devices – Hydrogen absorbed in reversible metal hydride
	<b>5. Transporte y distribución:</b>	
	20. ASME B31.12 Hydrogen piping and pipelines	21. EIGA 121/14 (CGA G-5.6) Hydrogen Pipeline Systems
	22. EIGA 15/06 Gaseous Hydrogen Stations Directiva 2008/68/CE, 49 C.F.R. §171 a 180	23. EIGA 06/19 Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen
	<b>6. Calidad del H<sub>2</sub>:</b>	
	24. ISO 14687 Hydrogen fuel quality - Product specification	
	<b>7. Producción de H<sub>2</sub>:</b>	
	25. IEC 62282 Fuel cell technologies	26. NFPA 2 capítulo 12 Hydrogen Fuel Cell Power Systems
	<b>8. Estaciones de dispensado público de hidrógeno:</b>	
	27. ISO 19880-1 Gaseous hydrogen – Fuelling stations-General Requirements	28. NFPA 2 capítulo 10 GH <sub>2</sub> Vehicle Fueling Facilities
	29. ISO 17268 Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices.	30. SAE J2601 Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles
	31. ASME B31.12 Hydrogen piping and pipelines	32. SAE J2601/3_2013 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks
	33. SAE J2601/2_2014 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles	

<b>5</b>	<b>9. Consumo (vehículos y generación de calor):</b>	
	34. Reglamento (CE) 79/2009	35. Reglamento CEPE 134
	36. GTR13-ECE/TRANS/180/Add.13/ 2013	37. EIGA 15/06 Gaseous Hydrogen Stations
	38. IEC 62282 Fuel cell technologies	39. ISO 13984 Liquid hydrogen – Land vehicle fueling system interface
	40. ISO 17268 Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices	41. ISO 19880-1 Gaseous hydrogen – Fuelling stations- General Requirements
	42. ISO 21266 Road vehicles – Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blends fuel systems	43. ISO 23273 Fuel cell road vehicles - Safety specifications - Protection against H2 hazards for vehicles fuelled with compressed H2
	44. NFPA 2 cap. 7-8 Gaseous Hydrogen / Liquefied Hydrogen	45. NFPA 2 cap. 10-11-12 GH2 Vehicle Fueling Facilities / H2 Fueling Facilities / Hydrogen Fuel Cell Power Systems
	46. NFPA 2 cap. 14-15-16-17-18 Combustion Applications / Special Atmosphere Applications / Laboratory Operations / Parking Garages / Repair Garage	47. SAE AIR6464 Hydrogen Fuel Cells Aircraft Fuel Cell Safety Guidelines
	48. SAE AS6858 Installation of Fuel Cell Systems in Large Civil Aircraft	49. SAE J2578 Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety
	50. SAE J2579 Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehi-cles	51. SAE J2601 Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehi-cles
	52. SAE J2601/2 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles	53. SAE J2601/3 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks
	54. SAE J2799 Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software	55. SAE J2990/1 Gaseous Hydrogen and Fuel Cell Vehicle First and Second Responder Recommended Practice
	<b>10. Estándares informativos:</b>	
	56. CGA G-5- 2017 Hydrogen	57. CGA G-5.3 Commodity Specification for Hydrogen
	58. CGA H-4 Terminology Associated with Hydrogen Fuel Technologies	59. CGA P-28 OSHA Process Safety Management and EPA Risk Management Plan Guidance Document for Bulk Liquid Hydrogen Systems
	60. EIGA 122/18 Environmental impacts of hydrogen plants	61. EIGA 155/09/E Best available techniques for hydrogen production by steam methane reforming
	62. EIGA Doc 183/13/E Best Available Techniques for the Co-Production of Hydrogen, Carbon Monoxide & their mixtures by Steam Reforming	63. EIGA 220/19 Environmental Guidelines for Permitting Hydrogen Plants Producing Less Than 2 Tonnes per Day
	64. EN 16942 Fuels - Identification of vehicle compatibility - Graphical expression for consumer information	65. ISO/TR 15916 Basic considerations for the safety of hydrogen systems

### Matriz de Consideraciones Normativas

En esta matriz deben detallarse todos los aspectos de seguridad considerados y aplicados para las distintas instalaciones y equipos del proyecto que no hayan sido abordadas en la autorización de la SEC. La matriz por sí sola es suficiente como informe.

1. La matriz comparativa tiene por objeto levantar cada uno de los requisitos de seguridad mínimos a cumplir de acuerdo con las normas técnicas seleccionadas por el proponente, indicando el punto de la norma donde figura el requisito y de qué forma el diseño del proyecto da cumplimiento a tales requisitos (distancias de seguridad, áreas clasificadas, otros.).
2. El nivel de detalle de la matriz dependerá del contenido de las normas técnicas que utilice el titular del proyecto para justificar el diseño.
3. Todos los artículos o puntos extraídos de las normativas seleccionadas por el proponente, que se desarrollen en la matriz señalada, deben ser traducidos al español en caso de que los códigos se encuentren en inglés u en otro idioma.
4. La Matriz de Consideraciones Normativas consta de tres columnas: la primera para indicar los códigos y estándares de la normativa de referencia que será usada como base para alguna aplicación específica del proyecto; la segunda para señalar específicamente el contenido relevante de la norma de referencia que se usará; y, la tercera columna para indicar en qué parte del proyecto se aplicará la normativa relevante. A continuación, se presenta un ejemplo de su aplicación.

Ejemplo:

Códigos/Estándar	Contenido relevante	Aplicación en el proyecto
NFPA 2: Código de Tecnologías de Hidrógeno.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Requisito de seguridad contra incendios en lo que respecta a posibles riesgos de hidrógeno</li> <li>2. Control de fuentes de ignición y señales de identificación de peligro</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distancias mínimas de sistemas al aire libre a exposiciones</li> </ul>
ISO/TR 15916:2015: Consideraciones básicas de tecnologías de hidrógeno.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Producción, almacenamiento, transporte y uso</li> <li>2. Propiedades básicas de combustión, explosiones, deflagración, detonación.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selección de mangueras a utilizar para transportar H2</li> <li>- Válvulas de alivio de presión</li> <li>- Detectores de incendio</li> </ul>
NFPA 55- Código de gases comprimidos y fluidos criogénicos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Permisos y planes</li> <li>2. Gases comprimidos y riesgos asociados</li> <li>3. Sistemas de hidrógeno: componentes involucrados, mantenimiento de distancias/separación.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de material no inflamable</li> <li>Referencia a CGA 5,5 ASME31</li> <li>- Especificaciones del compresor</li> <li>Distancias de seguridad</li> <li>- Distancias mínimas</li> </ul>

## 7. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Nº	DESCRIPCIÓN
1	<p>La prueba piloto debe permitir mostrar el funcionamiento de equipos con uso de hidrógeno de forma segura y en cumplimiento con los estándares de seguridad, considerando su aislación de la operación de producción, para no afectar los permisos vigentes. La prueba piloto se debe planificar y diseñar con equipos de personal multidisciplinarios. La prueba piloto debe mostrar la verificación a todo nivel de sistemas, subsistemas y componentes de los equipos de hidrógeno. Debe mostrar en funcionamiento niveles de seguridad y operación en escenarios de fallas. La prueba piloto debe informar el inicio de la prueba, informes de avance en hitos importantes asociados a la tecnología, incidentes graves o de alto potencial relacionados a la tecnología y/o que afecten a la seguridad y el término de la prueba (informe de resultados). En general, el objetivo principal es adquirir experiencia y obtener datos técnicos o de otro tipo para su potencial escalamiento a tamaño industrial o de periodo indefinido.</p>
2	<p><b>Escenarios de operación previstos:</b> Para proyectos piloto de tecnologías de hidrógeno en minería se considera como principal factor el entorno físico en el cual se verán involucradas las maquinarias e instalaciones que utilicen hidrógeno dentro de sus operaciones en los procesos mineros. Por otro lado, otros factores a considerar son la cantidad de hidrógeno a ser utilizado en la operación del proyecto y los procesos de operación y ciclos de mantenimiento a lo largo de la vida útil del proyecto.</p> <p>En el caso del entorno físico operacional se encuentran las siguientes consideraciones:</p> <p><b>Ubicación:</b> Este factor involucra lo que es altura relativa al mar, cercanías con centro de suministro para el personal y para los procesos productivos, cercanía con centros de emergencias, entre otros factores donde se encontrarán las instalaciones y equipos de hidrógeno. Cabe destacar que una instalación minera puede tener ubicación en diferentes puntos geográficos, no tener conexión directa y ser parte de una misma organización.</p> <p><b>Condiciones climáticas:</b> Este factor involucra presión, temperatura y humedad ambiental, entre otros, que pueden estar presente y afectar a equipos y componentes.</p> <p><b>Tipo de planta minera:</b> Este factor depende del tipo de mina en que el proyecto será diseñado. En este contexto los tipos de minas pueden ser minas de superficie o a cielo abierto y minas subterráneas, principalmente. Esto afectará directamente a los componentes y consideraciones realizadas en el diseño del proyecto.</p> <p>A modo de ejemplo, se puede considerar un centro de generación, almacenamiento y dispensado de hidrógeno en superficie ubicada en X lugar y el transporte en camión a otra instalación de la misma organización localizada en la ubicación Y fuera del sector X sea en superficie o subterránea.</p> <p>Además, dentro de los principales procesos y ciclos de operación de los equipos de hidrógeno se debe considerar las medidas de seguridad para los diferentes periodos de operación como lo son: Operación a plena carga, puestas en marcha o en Stand by. Así como para los períodos de detención producto de un mantenimiento preventivo, correctivo o por un accidente. Para estos últimos se debe tener definido los procedimientos de emergencia que protejan al personal y las instalaciones.</p>



3	<p><b>Roles y funciones:</b> La gestión eficaz de los riesgos asociados a operar un sistema de prueba con tecnologías de hidrógeno para la minería requiere información de diversos grupos operativos: investigadores, ingenieros de diseño, jefes de proyecto, jefes de equipo y control, operadores de sala, encargados de seguridad y salud, personal de respuesta a emergencias y otros trabajadores involucrados en las tareas. Como parte del proceso de validación de la prueba piloto, las responsabilidades deben estar claramente definidas y asignadas, existiendo <b>dos grupos</b> principales involucrados:</p> <p><b>Titular (Operadores):</b> Desarrollar la propuesta y requisitos para la introducción de tecnologías de hidrógeno en la minería, realizar una evaluación inicial de riesgos del sitio, comprender los riesgos asociados con el sistema incluyendo cualquier riesgo residual, utilizar el sistema de acuerdo con las especificaciones, desarrollar procedimientos de trabajo seguros para integrar sistemas de hidrógeno en el contexto minero, establecer procesos de gestión del cambio, capacitar al personal de la mina en relación con operaciones, auditar cualquier componente suministrado para confirmar su compatibilidad con la seguridad de los sistemas, presentar el Plan de gestión del proyecto (en adelante PMP) para el sitio, registrar/informar/ investigar incidentes y tomar acciones para prevenir nuevos incidentes en colaboración con el proveedor.</p> <p><b>Proveedores:</b> Determinar la idoneidad y compatibilidad de los componentes del sistema, participar en la evaluación inicial de riesgos, establecer estándares que la máquina y el sistema cumplirá, establecer especificaciones de desempeño, proporcionar información e instrucciones sobre el uso del sistema, establecer seguridad en las comunicaciones, etc.</p>
4	<p><b>Comunicación y consulta:</b> Es importante que aquellos profesionales con conocimiento del diseño, ingeniería, puesta en servicio, operación y mantenimiento de los sistemas de hidrógeno participen en la evaluación, durante la vida operativa, minimizando los riesgos asociados.</p>
5	<p><b>Información para la gestión de riesgos:</b> Las operaciones mineras deben poder demostrar que los peligros asociados con los sistemas de hidrógeno están siendo controlados considerando cuestiones como: cualquier evento o información anterior, confiabilidad, madurez y características de seguridad disponibles de equipos y sistemas, provisión y frecuencia de los procesos de validación, idoneidad de los procedimientos de trabajo establecidos, identificación de riesgos específicos y provisión para la revisión de controles, suficiencia de los procedimientos de emergencia establecidos, capas de seguridad, barreras de seguridad y sistemas de control y sensores específicos para hidrógeno.</p>
6	<p><b>Clasificación de peligro (CCP):</b> Se debe evaluar la naturaleza y determinar el nivel de peligro del proyecto. Considerando factores tales como: probabilidad de un incidente, severidad potencial de cualquier lesión o daño al personal y/o daño a instalaciones. Es importante que quienes realizan una evaluación de peligro dispongan de la información, formación, conocimientos y experiencia de: entorno operativo, procesos operativos y sistemas de hidrógeno. El titular del proyecto es libre de seleccionar la metodología a utilizar para la evaluación de los riesgos que estime pertinente, mientras logre analizar tanto las instalaciones como las operaciones. Algunas de las metodologías que se pueden utilizar son: What if, Análisis preliminar de riesgos (APR), 5 porqués, FMEA (Failure Mode and Effective Analysis), HAZOP/AFO (Análisis Funcional de Operatividad), etc.</p> <p>Recordando que la evaluación debe ser sobre los riesgos relacionados a los equipos móviles y sus respectivas estaciones de mantenimiento y estacionamiento. En caso de incluir otros componentes de la cadena de valor de H2 estos deben ser autorizados previamente por la SEC.</p> <p>Se recomienda utilizar el criterio de clasificación de peligro (CCP) basado en el modelo "Fire and Explosion index" (FEI) el cual determina el peligro potencial utilizando factores ambientales y de operación principalmente. La metodología de este modelo de clasificación es descrita en Anexo F.</p>

<p>7</p>	<p><b>Identificación de peligros:</b> El uso de tecnología que utilicen hidrógeno en el entorno operativo de la mina, cambiará los sistemas de seguridad establecidos. Es importante identificar estos cambios y los riesgos asociados. Sistemas de identificación de peligros que se pueden implementar para asegurar que se evalúen los riesgos de la minería con sistemas de hidrógeno incluyen: una matriz de riesgos completa, análisis de capas de protección y seguridad, análisis de seguridad funcional, gestión del cambio, procedimientos de identificación y notificación de peligros para los empleados, inspecciones del lugar de trabajo, monitoreo del ambiente de trabajo, investigaciones de incidentes, alertas de seguridad del regulador.</p> <p>Algunos de los principales peligros que se pueden identificar en proyectos con tecnologías de hidrógeno en entornos mineros son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· H<sub>2</sub> gaseoso</li> <li>· Incendio</li> <li>· Polvo en suspensión</li> <li>· Presión</li> <li>· Desplazamiento de O<sub>2</sub></li> <li>· Electricidad</li> <li>· Explosión</li> <li>· Psicosocial</li> <li>· Choque/Colisión</li> </ul>
<p>8</p>	<p><b>Gestión de riesgos:</b> Todos los peligros relacionados con los sistemas de hidrógeno deben ser identificados, los riesgos respectivos deben ser evaluados y controlados, especialmente los riesgos con resultados de intolerables. Es recomendable: implementar controles primarios que eviten el riesgo al decidir no comenzar o continuar con la actividad, eliminar la fuente del riesgo, cambiar la probabilidad y consecuencia, controles de contingencia que minimizan los efectos si hay un incidente.</p> <p>Los controles de prevención y gestión deben basarse en procesos establecidos y estándares relevantes, incluyendo: diseño, construcción e instalación segura, procesos efectivos de gestión del cambio, procedimientos de trabajo seguros operativos y de mantenimiento, formación de los trabajadores basada en competencias, supervisión y control de la gestión.</p> <p>Algunos de los principales riesgos que se pueden identificar en proyectos con tecnologías de hidrógeno en entornos mineros y deben ser evaluados son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Atmósfera explosiva</li> <li>· Crackeo de material</li> <li>· Asfixia / hipoxia</li> <li>· Mantenimiento deficiente</li> <li>· Liberación de energía</li> </ul>
<p>9</p>	<p><b>Controles de peligros particulares:</b> El uso de tecnologías de hidrógeno en minería, ya sea en la superficie o bajo tierra, puede agregar peligros más allá de los asociados con una operación minera convencional. Estos peligros adicionales requieren una consideración detallada y evaluación de riesgos para garantizar que se gestionen de forma eficaz. Los controles establecidos para una operación con hidrógeno deben proporcionar un rendimiento de seguridad equivalente o mejor del que podría esperarse de una operación convencional. Véase anexo “Exigencias particulares relativas al hidrógeno” a modo de referencia.</p> <p>Algunos de los principales controles de peligros que se deberían implementar en proyectos con tecnologías de hidrógeno en entornos mineros son:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Ventilación forzada y natural</li> <li>▸ Sistemas de alarma sonora y estroboscópica</li> <li>▸ Correcta capacitación y entrenamiento</li> <li>▸ Filtros de polvo y mantenimiento de filtros</li> <li>▸ Sistemas de extinción de incendio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Sensores fuga de hidrogeno</li> <li>▸ Sistemas de control y medición de presión de H<sub>2</sub></li> <li>▸ Correctas purgas de H<sub>2</sub> en mantenimiento</li> <li>▸ Lazos de control de presión y parada de Emergencia</li> <li>▸ Equipos, elementos y materiales bajo normas/certificados específicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Cámaras infrarrojos</li> <li>▸ Diseño en las conexiones de alta presión</li> <li>▸ Distancias de seguridad a prueba de explosión</li> <li>▸ Cumplimiento de códigos y normativa internacional</li> </ul>
10	<p><b>Seguimiento, revisión y gestión de documentos:</b> Para asegurar que la efectividad de los controles se mantenga en el sitio, se debe implementar un programa de monitoreo y revisión que incluye auditorías de control, verificación y validación. Los resultados de la evaluación de riesgos deben ser formalmente documentados en el registro de riesgos de la operación, detallando: ubicaciones y áreas de exposición de sistemas con hidrógeno, tamaño y complejidad de las operaciones, tipos de incidentes potenciales, consecuencias y probabilidad de cada incidente, controles de mitigación, seguimiento y revisión de resultados y acciones.</p> <p>La documentación de esta información constituye la base del plan de gestión de seguridad del sitio para sistemas que utilizan hidrógeno como combustible en la minería.</p>		
11	<p><b>Instrucción e información:</b> Se debe instruir al personal sobre la funcionalidad del sistema y tareas específicas a realizar, incluidos los peligros y riesgos, los controles que se aplicarán y los pasos del trabajo necesarios para completar las tareas de forma segura y correcta incluyendo la información necesaria (manuales/especificaciones/instrucciones de funcionamiento, las políticas/procedimientos/planes de la operación y legislación/normativa aplicable). Herramientas instructivas como instrucciones de trabajo seguras o procedimientos de operación estándar se pueden utilizar para documentar el proceso.</p>		
12	<p><b>Entrenamiento:</b> El personal debe ser competente en las tareas asignadas. Esto significa que deben tener las competencias necesarias para realizar la tarea de forma segura y correcta. La competencia se adquiere a través de la formación y la experiencia siendo supervisado o guiado. La formación en gestión de riesgos proporcionada debe ser adecuada a los roles y responsabilidades asignados, y proporcionar información sobre: el proceso de gestión de riesgos, métodos de trabajo seguros para tareas específicas, requisitos del sitio para monitorear el desempeño de la máquina, cómo informar incidentes.</p>		
13	<p><b>Supervisión:</b> La supervisión es una función de seguridad fundamental que complementa la provisión de información, instrucción y formación. La supervisión eficaz establece y mantiene altos estándares de desempeño. Los supervisores dentro de una operación con sistemas de hidrógeno en minería ayudan a lograr los objetivos de seguridad y salud de la operación en una variedad de formas, incluyendo: liderar y gestionar su equipo utilizando su comprensión de los principios clave y las características de seguridad de la tecnología de hidrógeno, asegurar que el trabajo se lleve a cabo de acuerdo con el sistema documental de la empresa minera titular y respectivo proveedor, confirmar que los trabajadores están capacitados como competentes para desempeñar sus funciones, comunicarse regularmente con los afectados por el trabajo, supervisar el lugar de trabajo e identificar y controlar peligros de acuerdo con las reglas del sitio, analizar trabajos y tareas críticas, informar y registrar problemas de desempeño, comunicar lo aprendido de incidentes.</p>		
14	<p><b>Modelo, gestión y supervisión de la operación minera:</b> Los siguientes principios fundamentales deben incorporarse a los procesos de diseño y planificación de la mina al principio del proyecto: gestión de riesgos, diseñar y planificar el uso de equipos con uso de hidrógeno, infraestructura física de sistemas de hidrógeno (diseño, ubicación e integración considerando: escalabilidad y capacidad, especificaciones de el o los equipos, y capacidades de operación, sistemas de comunicación y monitoreo del estado del sistema).</p>		

15	<p><b>Planificación y diseño del sistema para control de peligros y seguridad funcional:</b> Se debe identificar, evaluar y controlar los peligros asociados con las operaciones con H<sub>2</sub>. La seguridad funcional proporciona la garantía de que los elementos de seguridad y los controles operativos proporcionan una reducción de riesgos adecuada para lograr una operación segura de los sistemas de hidrógeno. La criticidad de la seguridad funcional y los niveles de desempeño requeridos, deben ser determinados por la identificación de peligros y el proceso de identificación de riesgos, que incluye: roles y responsabilidades de operadores y proveedores, diseño de sistemas (capas de protección y redundancias en el sistema de seguridad, gestión de la configuración y seguridad para prevenir modificación no autorizada de ajustes/parámetros y guía base, aprobación a través del proceso de gestión de cambios antes de implementar cambios de diseño o configuración), estado a prueba de fallos, procesos de revisión y auditoría (revisiones periódicas del rendimiento del sistema y parámetros de acuerdo con los parámetros de diseño para confirmar que los requisitos de gestión operativa son cumplidos), registro de cambio, seguridad de los sistemas.</p>
16	<p><b>Controles de peligro de comisionamiento:</b> Para lograr los resultados de seguridad deseados, las actividades de puesta en servicio para sistemas de hidrógeno deben abordar asuntos tales como:</p> <p>Descripción Proceso de Implementación y Comisionamiento, Organización para la Implementación y Comisionamiento, Detalle Implementación y Comisionamiento de sistemas de hidrógeno, Comisionamiento de Sistemas Digitales, Infraestructura, Sala de Control de Terreno, Estaciones de paradas de Emergencia, descripción equipos, abastecimiento de hidrógeno, Plan de prueba del comisionamiento, pruebas funcionales y de aceptación del usuario, sistema de aceptación, Inicio de Operación (Marcha Blanca) que validará el funcionamiento seguro del sistema de hidrógeno.</p>
17	<p><b>Controles de peligros operacionales:</b> Para lograr los resultados de seguridad deseados, el diseño y la función de las prácticas operativas debe abordar adecuadamente asuntos tales como: gestión y supervisión, conocimiento técnico y de sistemas dentro de los equipos operativos, roles y responsabilidades, validación de competencias, gestión de cambios, seguimiento del desempeño de la mejora continua, seguridad y control del área, prestación de asistencia técnica.</p>
18	<p><b>Controles de peligros mediante plan de mantenimiento:</b> Para lograr los resultados de seguridad deseados, las actividades de mantenimiento para sistemas y componentes con uso de hidrógeno deben abordar asuntos tales como: partes relacionadas con la seguridad de los sistemas de control y consideraciones de seguridad para el mantenimiento del sistema, procesos de inspección y mantenimiento programados (programas de mantenimiento), inspección y servicio in situ, purgas correctamente realizadas, aislamiento de áreas y actividades, monitoreo y diagnóstico de condición, análisis de informes de alarmas y errores para indicar el comportamiento del sistema, calibración y prueba.</p>
19	<p><b>Gestión de emergencias:</b> La naturaleza potencialmente peligrosa de las operaciones con uso de hidrógeno en minería, y a menudo ubicaciones remotas donde se encuentran, significa que es fundamental estar preparado para la salud y seguridad del personal. La gestión de emergencias implica comprender la probabilidad de una situación de emergencia y su consecuencia potencial, estar preparado para mitigar sus efectos, responder eficazmente y abordar adecuadamente la posterior recuperación. La gestión eficaz de emergencias significa que hay planes establecidos para todos los escenarios de emergencia previsible y la respuesta es integral y coordinada. El sistema de seguridad debe incluir procedimientos de respuesta de emergencia para: aislar todo o parte del área y apagar los equipos.</p>

20	<p><b>Componentes sistemas de hidrógeno</b></p> <p>Dentro de los componentes típicos que desarrollan funciones primarias de operación, como funciones de seguridad, dentro del sistema de H<sub>2</sub> para la minería se encuentran principalmente [1]:</p> <p><b>Tanques de almacenamiento</b> El diseño, función y materiales utilizados para la estructura y sus componentes deben encontrarse en función del tipo de servicio y cargas de operación.</p> <p><b>Tuberías, sellos y juntas para transporte.</b> El diseño de estos elementos para el transporte de hidrógeno debe considerar las propiedades de difusión debido al tamaño de molécula del hidrógeno. Por esta razón, juntas por medio de soldadura serán recomendadas para áreas donde las fugas no son toleradas y las secciones con uniones y sellos deberán tener medidas de seguridad con el fin de mitigar las potenciales fuentes de ignición. Además, el material utilizado debe asegurar una compatibilidad de operación con H<sub>2</sub>.</p> <p><b>Controladores de flujo.</b> Las válvulas son el principal componente que controla el flujo de hidrógeno, existe una gran variedad de válvulas las cuales pueden ser operadas tanto manual como remotamente. En ambos casos se debe tener precaución para evitar asfixia en el caso del operador y evitar una posible ignición producto del movimiento de actuadores en el caso de válvulas operadas remotamente. El control de flujo también incluye componentes como manómetros, flujómetros, indicadores de nivel y sistemas de control.</p> <p><b>Válvulas liberadoras de presión</b> Los tanques almacenadores y tuberías deben tener sistemas que liberen la presión en caso de exceder ciertos niveles. Existen casos en que fallan los reguladores de presión, y un incremento de presión puede generar excesos de presión no deseables tanto en el tanque como en las válvulas. Además, independiente del tipo de componente utilizado para liberar exceso de presión, se debe considerar el área donde está instalado para minimizar las fuentes potenciales de ignición y espacios para evitar acumulación de hidrógeno.</p> <p><b>Detectores de hidrógeno</b> Fuera del sistema de hidrógeno, estos componentes detectan la presencia de hidrógeno gaseoso o potenciales llamas producto de hidrógeno. Generalmente se ubican en sectores con potenciales fugas o acumulación de hidrógeno. ISO 26142 detalla los requerimientos aplicables a detección de hidrógeno.</p> <p><b>Otros componentes</b> Otros componentes presentes en distintos sistemas de hidrógeno son los convertidores catalíticos y membranas de separación utilizados para remover el exceso de hidrógeno. Para acondicionar el hidrógeno los principales componentes utilizados son los filtros, intercambiadores de calor, enfriadores y radiadores.</p> <hr/> <p>[1] ISO 15916 [n1] En norma ISO 15916 no se plantea esta etapa.</p>
21	<p><b>Exigencias particulares relativas al hidrógeno</b></p> <p>La combinación entre las características fisicoquímicas del H<sub>2</sub> y las condiciones de operación de los sistemas de H<sub>2</sub> generan distintos riesgos potenciales en los que operador, maquinaria e instalación se ven inmersos. Si el sistema de hidrógeno utiliza H<sub>2</sub> comprimido o utiliza H<sub>2</sub> líquido, esto determinará el grado de riesgos presentes en la instalación y las exigencias de seguridad necesarias para asegurar una operación con gran parte de sus riesgos controlados. A continuación, los principales riesgos para el personal e instalaciones en función de las propiedades fisicoquímicas y de combustión del hidrógeno [ref: ISO 15.916 cap 6 y 7.]:</p>



21

**Inflamabilidad**

- Efectos térmicos
- Efectos de presión
- Facilidad de ignición a diferentes concentraciones

**Molécula de tamaño pequeño**

- Baja viscosidad
- Alta tasa difusión
- Alta flotabilidad

**Interacción con materiales (Fragilización)**

**Riesgos de asfixia**

**Riesgos asociados a almacenamiento**

- Altas presiones de gas
- Bajas temperaturas en caso de H2 líquido
- Otros como metales hidruros

Es necesario considerar estos efectos producto de las características propias del H2, tanto para las personas como para las instalaciones y equipos. Por esta razón las exigencias que todo diseño debe cumplir para asegurar una operación confiable y segura se basan en: eliminar, prevenir, evitar, mitigar o aceptar los riesgos asociados a través de las siguientes consideraciones:

**Minimizar el error humano**

**Seleccionar un material compatible con las características y condiciones de operación del hidrógeno**

- Consideraciones para operación con bajas temperaturas
- Consideraciones debido a la fragilización de material por hidrógeno
- Consideraciones debido a la difusión del hidrógeno

**Prevenir exceso de presión**

**Asegurar el buen funcionamiento de componentes de medición, regulación y control.**

**Considerar mantenimientos y limpieza de sistemas y componentes**

**Considerar las diferentes condiciones de operación en el entorno minero**

## 8. BIBLIOGRAFÍA

---

1. International Standard Organization. (2015). ISO 15.916, Basic considerations for the Safety of Hydrogen Systems.
2. NFPA Standars. (2020). NFPA, Hydrogen technology code.+
3. Ministerio de Minería. (2004). DS 132, Reglamento de seguridad en minería.
4. GIZ y Fitchner. (2020). Descarbonilación del sector energético chileno Hidrógeno-Cadena de Valor y legislación internacional.
5. GIZ y Centro UC Energía. (2020). Proposición de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno para Chile.
6. El Decreto Supremo N° 72, de 1985, del Ministerio de Minería, "Reglamento de Seguridad Minera", cuyo texto refundido, coordinado y sistematizado fue fijado mediante el artículo quinto del Decreto Supremo N° 132, de 2002, del Ministerio de Minería.
7. El Decreto Supremo N°108, de 2013, del Ministerio de Energía, que aprueba reglamento de seguridad para las instalaciones de almacenamiento, transporte y distribución de gas licuado de petróleo y operaciones asociadas.
8. El decreto N° 67, de 2012, del ministerio de Minería, Reglamento de seguridad de plantas de gas natural licuado.
9. NFPA 70, Código Eléctrico Nacional NFPA 70, Norma técnica, EEUU.

## 9. ANEXOS

---

1. Ejemplo de la aplicación del CCP al uso de Hidrógeno en minería.
2. Metodología para cálculo de Criterios de Clasificación del riesgo (CCP).



SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA  
2021  
[www.sernageomin.cl](http://www.sernageomin.cl)