

Planta de producción de e-Metanol a partir de hidrógeno verde

Anexo XII - Análisis de riesgos,

M. Sc. Ing. Quím. Colin Rogers,

Ing. Tec. Prev. Sonsoles Baison.



Socio estratégico: SEG Ingeniería.



Página intencionalmente en blanco
para impresión en doble faz.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. CARACTERÍSTICAS Y RIESGOS ASOCIADOS AL HIDRÓGENO Y MEOH	7
1.1 HIDRÓGENO	7
1.2 METANOL.....	9
1.3 MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y CONTROL DE RIESGOS DE SUSTANCIAS PELIGROSAS PRESENTES EN EL PROYECTO.....	12
2. CLASIFICACIÓN DE LAS SUSTANCIAS PELIGROSAS A MANEJAR EN EL PROYECTO	13
2.1 SISTEMA GLOBALMENTE ARMONIZADO.....	13
3. REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD - ESTÁNDARES INTERNACIONALES APLICABLES AL PROYECTO	15
3.1 NORMA ISO 19880-1	15
3.2 NFPA 2 - CÓDIGO DE TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO	15
3.3 ESTÁNDARES MÁS DESTACADOS APLICABLES A EQUIPOS E INSTALACIONES CONSIDERADOS EN EL PROYECTO.....	16
3.4 ESTÁNDARES DE PERFORMANCE E INSTALACIÓN DE COMPONENTES ESPECÍFICOS A TECNOLOGÍAS DE HIDRÓGENO	16
3.5 DIRECTIVAS DE SEGURIDAD RELEVANTES	17
3.5.1 <i>Directiva ATEX 99/92/EC</i>	17
3.5.2 <i>Directiva ATEX 2014/34/EU</i>	17
3.5.3 <i>Methanol Institute (Safety Handling Manual – 5° Edition)</i>	17
4. ANÁLISIS PRELIMINAR DE RIESGOS	18
4.1 SUSTANCIAS QUÍMICAS PRESENTES EN EL PROYECTO	18
4.1.1 <i>Producción de Hidrógeno Verde</i>	18
4.1.2 <i>Producción de Metanol Verde</i>	19
4.2 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN - ALMACENAMIENTO DEL PROYECTO.....	21
4.3 RIESGOS POTENCIALES ASOCIADOS AL H ₂ V, MEOH Y MEDIDAS DE CONTROL APLICABLES.....	21
5. EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES	25
5.1 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES.....	25
5.2 CRITERIOS PARA LA VALORACIÓN DE LA PROBABILIDAD	27
5.3 CRITERIOS PARA LA VALORACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS	27
6. METODOLOGÍA MODELO (SOLO DE CONSECUENCIAS) PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DE LA OPERACIÓN Y TRANSPORTE DEL PROYECTO	37
6.1 RESUMEN DE LA METODOLOGÍA (SÓLO DE CONSECUENCIAS)	37
6.2 CRITERIOS POR APLICAR CON RELACIÓN A LAS CONSECUENCIAS (UMBRALES DE DAÑO Y NO DAÑO)	38
7. CÁLCULO DE DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO MODELO (SOLO DE CONSECUENCIAS)	45
7.1 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO POR EXPLOSIÓN RETARDADA (JET VCE) Y RADIACIÓN POR FUEGO DE CHORRO (JET FIRE) - HIDRÓGENO	45
7.2 HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA SIMULACIÓN - SOFTWARE HYRAM+	45
7.3 MODELADO DE EFECTOS TÉRMICOS POR FUEGO DE CHORRO Y EXPLOSIÓN RETARDADA (JET VCE)	45
7.3.1 <i>Ecuación de estado</i>	45
7.3.2 <i>Combustión</i>	46
7.3.3 <i>Liberaciones no incendiadas</i>	46
7.3.4 <i>Liberaciones por ignición</i>	47
7.3.5 <i>Radiación de una llama curva</i>	47
7.3.6 <i>Sobrepresión no confinada</i>	47
7.4 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO POR NUBE TÓXICA, POOL FIRE (PISCINA DE FUEGO) Y BOLA DE FUEGO (BLEVE) –MEOH.....	48

7.5	HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA SIMULACIÓN – SOFTWARE ALOHA	48
7.6	MODELADO DE EFECTOS TÉRMICOS POR POOL FIRE Y BOLA DE FUEGO (BLEVE) Y POR EFECTOS DE NUBE TÓXICA	48
7.6.1	<i>Modelos para el cálculo de los efectos de las explosiones de nubes de vapor</i>	<i>48</i>
7.6.2	<i>Modelos de radiación térmica y área inflamable</i>	<i>49</i>
7.6.3	<i>Incendios por chorro</i>	<i>49</i>
7.6.4	<i>Incendios en piscina de fuego</i>	<i>50</i>
7.7	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE DAÑO Y NO DAÑO CON RELACIÓN A LAS CONSECUENCIAS	50
7.8	DEFINICIÓN DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD APLICABLES AL PROYECTO	50
7.9	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SÓLO CONSECUENCIAS	52
7.9.1	<i>Distancia de seguridad - Zona de Riesgo Exterior</i>	<i>53</i>
7.9.2	<i>Criterios de aceptación de no daño</i>	<i>53</i>
7.9.3	<i>Condiciones atmosféricas usados en ALOAH:</i>	<i>53</i>
8.	CONCLUSIONES	57
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1: CLASIFICACIÓN DE H ₂ V. FUENTE: MSDS - GHS.	7
TABLA 1-2: SEGURIDAD DEL HIDRÓGENO EN RELACIÓN CON COMBUSTIBLES FÓSILES.	9
TABLA 1-3 CLASIFICACIÓN DE ME ₂ H. FUENTE: MSDS - GHS.	10
TABLA 1-4 SEGURIDAD DEL METANOL CON RELACIÓN A LA GASOLINA.	12
TABLA 3-1 CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR ISO 19880-1 (FUENTE: GIZ Y FITCHNER, 2020. DESCARBONILACIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO CHILENO. HIDRÓGENO – CADENA DE VALOR Y LEGISLACIÓN INTERNACIONAL).....	15
TABLA 3-2 CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR NFPA 2 (FUENTE: GIZ Y FITCHNER, 2020. DESCARBONILACIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO CHILENO. HIDRÓGENO – CADENA DE VALOR Y LEGISLACIÓN INTERNACIONAL).....	15
TABLA 3-3 ESTÁNDARES APLICABLES A EQUIPOS E INSTALACIONES DEL PROYECTO (FUENTE: GIZ Y FITCHNER, 2020. DESCARBONILACIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO CHILENO. HIDRÓGENO – CADENA DE VALOR Y LEGISLACIÓN INTERNACIONAL).	16
TABLA 4-1 CARACTERÍSTICAS DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS ASOCIADAS AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE H ₂ V VERDE (CAMEO CHEMICALS, CHEMICAL DATASHEET - SGA)	19
TABLA 4-2 CARACTERÍSTICAS DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS ASOCIADAS AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ME ₂ H VERDE (CAMEO CHEMICALS, CHEMICAL DATASHEET - SGA).....	20
TABLA 4-3 RIESGOS POTENCIALES – REDUCCIÓN DE RIESGO (REF.: NFPA 2:2023).	23
TABLA 5-1 TIPOS DE ACCIDENTES REFERIDOS AL METANOL POR SECTOR- 1998-2011. (FUENTE: METHANOL INSTITUTE, SAFE HANDLING GUIDE, 5TH EDITION).	26
TABLA 5-2 CRITERIOS PARA VALORACIÓN DE LA PROBABILIDAD O FRECUENCIA. (FUENTE: UNE 150008:2008).	27
TABLA 5-3 CRITERIOS PARA VALORACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS. (FUENTE: UNE 150008:2008).	27
TABLA 5-4 FÓRMULAS PARA LA VALORACIÓN DE LA GRAVEDAD DE LAS CONSECUENCIAS. (FUENTE: UNE 150008:2008)...	27
TABLA 5-5 CLASIFICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO	28
TABLA 5-6 CÁLCULO DE LA GRAVEDAD DE LAS CONSECUENCIAS DE LOS ESCENARIOS EVALUADOS.....	35
TABLA 5-7 ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD DEL RIESGO AMBIENTAL DE LOS ESCENARIOS EVALUADOS.	36
TABLA 6-1 CRITERIOS PARA ASIGNACIÓN DE UMBRALES DE DAÑO Y NO-DAÑO PARA PERSONAS Y EQUIPOS – COMITÉ API 521 KHK, NFPA 2 Y NFPA 2020.....	39
TABLA 6-2 MODELO SÓLO DE CONSECUENCIAS – LÍMITES DE RADIACIÓN TÉRMICA PARA PERSONAS (NO-DAÑO, 0.1% FATALIDAD) – COMITÉ API 521 KHK. (FUENTE: UNE-ISO 1880-1:2022).....	40
TABLA 6-3 IEA TCP TASK 43 – SUBTASK SAFETY DISTANCES: STATE OF THE ART, PARTICIPANTE A, 2023.	41
TABLA 7-1 VELOCIDADES DE LLAMA PARA EL MODELO BST. (FUENTE: ALOHA VERSIÓN 5.2.2).	49
TABLA 7-2 CURVAS DE CONSTANTES PARA VELOCIDADES DE LLAMA PARA EL MODELO BST. (FUENTE: ALOHA VERSIÓN 5.2.2).	49
TABLA 7-3 EJEMPLOS DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD – ZONA DE RIESGO EXTERIOR (UNE-ISO 19880-1:2022)	51
TABLA 7-4 OBJETIVOS DE EJEMPLOS PARA CADA TIPO DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD – ZONA DE RIESGO EXTERIOR (UNE-ISO 19880-1:2022)	52
TABLA 7-5 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO PARA PERSONAS, INFRAESTRUCTURA Y EQUIPAMIENTO- (ANÁLISIS DE SÓLO CONSECUENCIAS - HYRAM+ VERSIÓN 5.0 - ALOHA VERSIÓN 5.2.2).....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4-1 DIAGRAMA SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE H ₂ V VERDE.	18
FIGURA 4-2 DIAGRAMA SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ME ₂ H VERDE.....	20
FIGURA 5-1 ACCIDENTES - PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO, VALORES ACUMULADOS. UE 1995-2014. (FUENTE: ELSEVIER, 2018).....	26
FIGURA 6-1 ENFOQUE BASADO EN EL RIESGO PARA DISTANCIAS DE SEGURIDAD (FUENTE: UNE-ISO 1880-1:2022).	38
FIGURA 7-1 REPRESENTACIONES GRÁFICAS DE LOS PUNTOS DE ESTADO, CALCULADAS UTILIZANDO COOLPROP [33] QUE UTILIZA LA ECUACIÓN DE ESTADO DE LEACHMAN ET AL. [34] PARA EL HIDRÓGENO. LOS GRÁFICOS SUPERIORES MUESTRAN EL SOMBRADO Y LOS ISOCONTORNOS DE LA DENSIDAD COMO UNA FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA PRESIÓN. EL GRÁFICO INFERIOR MUESTRA EL SOMBRADO DE LA DENSIDAD COMO UNA FUNCIÓN DE LA ENTROPÍA Y LA TEMPERATURA, CON ISOCONTORNOS DE PRESIÓN Y ENTALPÍA. LA LÍNEA NEGRA GRUESA MUESTRA EL LÍMITE LÍQUIDO/BIFÁSICO/VAPOR, Y LOS PUNTOS NEGROS MARCAN EL PUNTO TRIPLE Y LOS PUNTOS CRÍTICOS (FUENTE: HYRAM+ VERSIÓN 5.0).	46
FIGURA 7-2 MODELO DE COORDENADAS DE PLUMA DE HIDRÓGENO. (FUENTE: HYRAM+ VERSIÓN 5.0).	47
FIGURA 7-3 MAPEO DE LA DISTANCIA ESCALADA A LA SOBREPRESIÓN ESCALADA (IZQUIERDA) Y AL IMPULSO ESCALADO (DERECHA) PARA EL MODELO BST DE SOBREPRESIÓN NO CONFINADA [3] (FUENTE: HYRAM+ VERSIÓN 5.0).	48

FIGURA 7-4 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO PARA PERSONAS Y EQUIPOS - EFECTOS DE SOBREPRESIÓN POR EXPLOSIÓN RETARDADA H2V (ANÁLISIS DE SÓLO CONSECUENCIAS - HYRAM+ VERSIÓN 5.0 – ALOHA VERSIÓN 5.2.2).....	53
FIGURA 7-5 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO PARA PERSONAS Y EQUIPOS - EFECTOS TÉRMICOS – JET FIRE DE H2V (ANÁLISIS DE SÓLO CONSECUENCIAS - HYRAM+ VERSIÓN 5.0 – ALOHA VERSIÓN 5.2.2).	54
FIGURA 7-6 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO PARA PERSONAS Y EQUIPOS - EFECTOS TÉRMICOS – BOLA DE FUEGO (BLEVE) Y FUEGO DE PISCINA (POOL FIRE) MEOH (ANÁLISIS DE SÓLO CONSECUENCIAS - ALOHA VERSIÓN 5.2.2).....	54
FIGURA 7-7 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO PARA PERSONAS - EFECTOS POR NUBE TÓXICA DE MEOH (ANÁLISIS DE SÓLO CONSECUENCIAS - ALOHA VERSIÓN 5.2.2).	54
FIGURA 7-8 HISTOGRAMA CON CENTRO EN LA UBICACIÓN PROPUESTA PROYECTO CON MAYORES DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO PERSONAS DE 650M (ROJO – INCENDIO BLEVE DE MEOH), DAÑO EDIFICIOS 300M (NARANJA – EXPLOSIÓN DE H2V) Y DAÑO EQUIPAMIENTO 280M (AMARILLO – EXPLOSIÓN DE H2V).....	55

1. CARACTERÍSTICAS Y RIESGOS ASOCIADOS AL HIDRÓGENO Y MEOH

1.1 HIDRÓGENO

El hidrógeno es una sustancia química con una serie de propiedades específicas las cuales deben ser consideradas durante su uso y manejo a efectos de evitar potenciales accidentes que comprometan la vida humana, infraestructura y medio ambiente.

Se presentan a continuación las propiedades específicas de esta sustancia de acuerdo con su correspondiente hoja de seguridad y clasificación del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de productos químicos:

- Es un potente agente reductor y en contacto con óxidos metálicos se oxida y produce calor.
- Fragiliza o es inadecuado para ser utilizado con muchos materiales que se usan normalmente en válvulas, tuberías y juntas.
- Al contrario que con otros gases comprimidos, al disminuir la presión aumenta su temperatura (coeficiente de Joule-Thomson negativo a temperatura ambiente), lo que puede contribuir a su ignición, siempre que esté mezclado con oxígeno.
- Forma mezclas explosivas con muchos gases, incluidos el cloro y otros halógenos. Se debe señalar que el hidrógeno no es explosivo y que necesita de una fuente de ignición externa y oxígeno en cantidad suficiente para explotar o incendiarse.
- Difunde fácilmente a través de muchos materiales convencionales que se usan en tuberías y válvulas a través de agujeros que son lo suficientemente pequeños para retener de forma segura a otros gases.
- A diferencia de las sustancias peligrosas para la salud, tiene un potencial de peligro debido únicamente a su inflamabilidad (no tiene umbral de toxicidad).

Tabla 1-1: Clasificación de H2V. Fuente: MSDS - GHS.

Propiedad	Valor
Nombre de la sustancia:	Hidrógeno gas comprimido
Número ONU:	1966
CAS:	1333-74-0
Estado:	Gas
Peligrosidad:	Sustancia inflamable
Pictograma transporte:	
Clase de Peligro:	2.1

Propiedad	Valor
Pictograma SGH:	
Propiedades:	Gas a presión, incoloro, inodoro, insípido. Combustible.
Incompatibilidad, condiciones a evitar	Reacciona violentamente con agentes oxidantes, líquidos y halógenos.

Sistema Globalmente Armonizado (GHS) de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos

Iniciativa mundial para promover criterios uniformes de clasificación y etiquetado de productos químicos que sirve para definir y comunicar los peligros físicos para la salud y para el medio ambiente que éstos involucren.

- Declaraciones de Peligro (H-Statements)
- Hnxx:
 - H: "declaración de peligro"
 - N: 2 = peligros físicos, 3 = peligros para la salud, 4 = peligros ambientales.
 - XX: esquema de numeración secuencial.
- Declaraciones de Precaución (P-Statements)
- Pnxx:
 - P: "Precaución"
 - N: 1 = generales, 2 = preventivas, 3 = de respuesta, 4 = almacenamiento, 5= disposición.
 - XX: esquema de numeración secuencial.

Si bien el hidrógeno presenta todos estos peligros, posee características que lo vuelven más seguro que los compuestos fósiles utilizados actualmente; entre ellos el hidrógeno no es tóxico y debido a que es 14 veces más liviano que el aire, tiende a subir, lo que permite una dispersión relativamente ágil de la sustancia en caso de fuga. Adicionalmente, presenta un riesgo de explosión mucho menor que los compuestos fósiles utilizados habitualmente, volviéndose explosivo en concentraciones entre el 18,3% y el 59% en comparación con los vapores de gasolina que pueden explotar en concentraciones de poco más del 1%¹.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de distintos parámetros relevantes para comparar la seguridad del hidrógeno en relación con los combustibles utilizados actualmente:

¹ Hydrogen Tools. <https://h2tools.org./bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>

Tabla 1-2: Seguridad del Hidrógeno en relación con Combustibles Fósiles.²

	Hidrógeno gaseoso	Gas Natural	Propano	Vapor de Gasolina	Comentarios
Densidad relativa respecto al aire	0,07	0,55	1,52	4,00	El hidrógeno es 14 veces más ligero que el aire
Temperatura de autoignición (°C)	585	540	490	220	El H ₂ y el gas natural tienen T de autoignición similares y 2 veces mayor que el vapor de gasolina
Rango de inflamabilidad (%)	4 - 75	5 – 15	2,1 – 10,1	1,4 – 7,67	Rango amplio de inflamabilidad del H ₂ , especialmente cuando el ratio H ₂ -aire es 29%
Energía mínima de ignición (mJ)	0,02	0,29	0,26	0,24	En condiciones óptimas de combustión el H ₂ puede encenderse con mínima energía

La producción de hidrógeno verde a partir de fuentes renovables no se diferencia del resto de las alternativas para producir hidrógeno. No obstante, la electrólisis es un proceso que tiene un potencial de peligro significativamente menor que otras plantas químicas; no implica condiciones potencialmente peligrosas (como altas presiones o temperaturas), ni grandes cantidades de sustancias peligrosas. El potencial de peligro estará asociado a la inflamabilidad y la cantidad de hidrógeno almacenado en el lugar, no estando asociado a la capacidad de producción de una planta³.

Se presentan a continuación los principales riesgos asociados a la cadena de valor del hidrógeno de acuerdo con los lineamientos de la norma ISO/TR 15916:2015 (Consideraciones básicas de seguridad para los sistemas de hidrógeno):

- Fugas.
- Fragilización de materiales de almacenamiento, suministro e instalaciones.
- Explosión e incendio.

1.2 METANOL

El metanol es un producto químico peligroso con propiedades tóxicas, inflamables y reactivas que pueden causar efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente cuando no se manipula adecuadamente (Methanol Institute, 2008).



Se presentan a continuación las propiedades específicas de esta sustancia de acuerdo a su correspondiente hoja de seguridad y clasificación del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de productos químicos:

² Fuente: GIZ. (2018). Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile.

³ GIZ y Fitchner. (2020). Descarbonilación del sector energético chileno Hidrógeno-Cadena de Valor y legislación internacional.

- El metanol es un líquido inflamable, de fácil ignición que arde y a veces explota en el aire.
- Sus vapores son más pesados que el aire (32 frente a 28 g por mol), pueden migrar cerca del suelo y acumularse en espacios reducidos y zonas bajas.
- En determinadas circunstancias específicas, el vapor de metanol puede explotar. Los contenedores de metanol están sujetos a la explosión de vapor en expansión de líquido en ebullición (BLEVE) cuando son calentados externamente.
- Es tóxico en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación.
- Es totalmente miscible en agua y conserva su inflamabilidad en concentraciones muy altas (75% agua – 25% metanol).

Tabla 1-3 Clasificación de MeOH. Fuente: MSDS - GHS.

Propiedad	Valor
Nombre de la sustancia:	Metanol
Número ONU:	1230
CAS:	67-56-1
Estado:	Líquido
Peligrosidad:	Sustancia inflamable, tóxica y reactiva
Pictograma transporte:	
Clase de Peligro:	3; 6.1
Pictograma SGH:	
Propiedades:	Líquido y vapores muy inflamables. Tóxico. Explosivo.
Incompatibilidad, condiciones a evitar:	Mantener alejado fuentes de calor, superficies calientes, llamas abiertas y cualquier otra fuente de ignición.

Sistema Globalmente Armonizado (GHS) de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos

Iniciativa mundial para promover criterios uniformes de clasificación y etiquetado de productos químicos que sirve para definir y comunicar los peligros físicos para la salud y para el medio ambiente que éstos involucren.

- Declaraciones de Peligro (H-Statements)
 - Hnxx:
 - H: "declaración de peligro"
 - N: 2 = peligros físicos, 3 = peligros para la salud, 4 = peligros ambientales.
 - XX: esquema de numeración secuencial.
- Declaraciones de Precaución (P-Statements)
 - Pnxx:
 - P: "Precaución"

- N: 1 = generales, 2 = preventivas, 3 = de respuesta, 4 = almacenamiento, 5= disposición.
- XX: esquema de numeración secuencial.

Guía de Respuesta de Emergencia

Guía para ayudar a los equipos de primeros auxilios a identificar rápidamente los peligros de los materiales involucrados en un incidente en el transporte de sustancias peligrosas, y a protegerse a sí mismos y al público en general durante la fase de respuesta inicial del incidente.



Referente a los potenciales riesgos y la seguridad en la manipulación y uso de metanol, un estudio de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA)⁴ concluye que comparativamente, el metanol es un combustible más seguro que la gasolina, presentándose a continuación las ventajas en materia de seguridad referidas a su uso (Methanol Institute, 2008):

- Los incendios de metanol generan sustancialmente menos calor radiante (llama de metanol es de baja temperatura y no luminosa) que los incendios de gasolina, que tienen temperaturas de llama más altas y arden con llamas luminosas. A este respecto, la EPA de EE.UU. ha estimado que si todos los autos fueron alimentados con metanol, la incidencia de incendios en vehículos se reduciría en un 90%.
- Debido a la baja generación de calor radiante, los incendios de metanol se propagan más lentamente que los incendios con gasolina.
- La concentración de metanol en el aire necesaria para la combustión es aproximadamente cuatro veces mayor que el de la gasolina. El metanol debe elevarse a una temperatura más alta para generar concentraciones de vapor (>6 v%) necesarias para soportar combustión en el aire.
- El vapor de metanol tiene una flotabilidad casi neutra, por lo tanto, tienen más probabilidad de disiparse y menos probabilidad de fluir a lo largo del suelo y acumularse en zonas bajas que los de la gasolina.

⁴ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1994. Methanol Fuels and Fire Safety. Fact Sheet OMS-8. Office of Mobile Sources. August.

Tabla 1-4 Seguridad del Metanol con relación a la Gasolina.⁵

	Vapor de Metanol	Vapor de Gasolina
Densidad relativa respecto al aire	1,10	4,00
Temperatura de autoignición (°C)	440	220
Rango de inflamabilidad (%)	6 - 50	1,4 – 7,67
Energía mínima de ignición (mJ)	0,14	0,24

De acuerdo con el Methanol Institute (2008), los principales riesgos asociados al uso y manipulación de metanol refieren a:

- Explosión e incendio.
- Intoxicación por inhalación e ingestión.
- Efectos dérmicos por contacto con la piel.

1.3 MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y CONTROL DE RIESGOS DE SUSTANCIAS PELIGROSAS PRESENTES EN EL PROYECTO

Las medidas de mitigación y control de los riesgos derivados de las sustancias químicas presentes en el proyecto (hidrógeno/metanol) estarán basadas en el cumplimiento de estándares y normas avaladas internacionalmente, así como aspectos regulatorios de la Unión Europea para planta de producción de hidrógeno y metanol: Directiva SEVESO (2012/18/UE)⁶, Directiva ATEX (2014/34/UE)⁷ y la Directiva 2010/75/UE⁸ sobre las emisiones industriales. Este aspecto será profundizado en el capítulo 3 Requerimientos de Seguridad – Estándares Internacionales de este estudio.

⁵ Fuente: Methanol Institute (2008).

⁶Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

⁷ Directiva 2014/34/UE que cubre los equipos y sistemas de protección destinados a ser utilizados en atmósferas potencialmente explosivas.

⁸ Directiva 2010/75/UE sobre emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).

2. CLASIFICACIÓN DE LAS SUSTANCIAS PELIGROSAS A MANEJAR EN EL PROYECTO

La clasificación de sustancias químicas presentes en el proyecto se realizó de acuerdo con su número ONU (Naciones Unidas) e información específica de la hoja de seguridad de cada sustancia involucrada, en línea con la normativa uruguaya (Decreto 307/09⁹, 346/011¹⁰ y 560/03¹¹).

El hidrógeno está asociado a los números ONU 1049 (gas comprimido), teniendo asignada una categoría de peligro 2.1, correspondiente a gases inflamables, al ser inflamable en mezcla de proporción igual o inferior al 3% en volumen con el aire a 20°C y una presión de referencia de 101,3 kPa¹².

El metanol está clasificado como número ONU 1230, teniendo asignado una categoría de peligro 3 y 6.1 correspondiente a líquidos inflamables tóxicos, al ser inflamable en mezcla de proporción igual o inferior al 6% en volumen con el aire (vapores de metanol) a 20°C y una presión de referencia de 101,3 kPa y 75% de agua en volumen (líquido)¹³.

El dióxido de carbono está asociado al número ONU 1013 (gas comprimido), teniendo asignado una categoría de peligro 2.2, correspondiente a gases no inflamables y no tóxicos.

2.1 SISTEMA GLOBALMENTE ARMONIZADO

El Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS, por sus siglas en inglés) es una iniciativa que busca promover criterios uniformes de clasificación y etiquetado de productos químicos, comunicando los peligros físicos para la salud y el medio ambiente.

El Reglamento Europeo (CE) N° 1272/2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas adoptó el GHS en todos los países de la Unión Europea; del mismo modo Estados Unidos aplicó el GHS en el lugar de trabajo mediante la revisión de la Norma de Comunicación de Riesgos publicada por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés) en 2012.

A nivel nacional, en el año 2009 y 2011 se aprueban los Decretos 307/2009 y 346/2011, estableciendo la obligatoriedad de seguir las directrices del GHS en cuanto a la Clasificación, Etiquetado y Notificación de Sustancias y Mezclas Peligrosas.

Para definir la peligrosidad de las sustancias identificadas en este estudio, se utilizarán las siguientes declaraciones del GHS:

⁹ Decreto 307/09: Reglamentación para la protección de la seguridad y salud contra los riesgos derivados de los agentes químicos.

¹⁰ Decreto 346/011: Etiquetado de productos químicos – Sistema Globalmente Armonizado (SGA).

¹¹ Decreto 560/03: Reglamento Nacional sobre transporte de mercancías peligrosas.

¹² Fuente: Hoja de seguridad del hidrógeno, límites de inflamabilidad con el aire a 101,3 kPa son de 4-75% en volumen.

¹³ Fuente: Hoja de seguridad del metanol, límites de inflamabilidad con el aire a 101,3 kPa son de 6-50% en volumen.

- Declaraciones de peligro (*H-Statements*): redacción normalizada para indicar los peligros de un producto incluido, cuando procede, el grado de peligro. Se codifica de la forma Hnxx, donde H significa “declaración de peligro”, n=2 para peligros físicos, n=3 para peligros a la salud y n=4 para peligros ambientales. Finalmente, se adopta un esquema de numeración secuencial (xx).
- Declaraciones de precaución (*P-Statements*): redacción estandarizada para describir las medidas preventivas sobre los efectos adversos resultantes de la exposición a un producto peligroso, o el almacenamiento, la manipulación o la eliminación inadecuados. Los códigos siguen el formato Pnxx, siendo P la precaución, n=1 para precauciones generales, n=2 para precauciones preventivas, n=3 para precauciones de respuesta, n=4 para precauciones de almacenamiento y n=5 para precauciones de disposición. Finalmente, se adopta un esquema de numeración secuencial (xx).

En el SGA, los peligros para el medio ambiente se dividen en peligros para el medio ambiente acuático y peligros para la capa de ozono, considerándose adecuadas para su aplicación no solo en mercancías embaladas/envasadas, sino también en su distribución, utilización y transporte multimodal tanto terrestre como marítimo (ONU, 2011).

3. REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD - ESTÁNDARES INTERNACIONALES APLICABLES AL PROYECTO

Los requerimientos de seguridad considerados en el proyecto refieren al cumplimiento de los siguientes códigos y estándares internacionales basados en el estudio realizado por Fichtner en el año 2020, los cuales definen los requisitos de construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de producción y almacenamiento de hidrógeno, así como Directivas de la Unión Europea para planta de producción de hidrógeno y metanol.

3.1 NORMA ISO 19880-1

Este documento proporciona recomendaciones y orientación en relación con requisitos mínimos de diseño, instalación, puesta en marcha, funcionamiento, inspección y mantenimiento de sistemas de producción y almacenamiento de hidrógeno gaseoso.

Las principales características de la norma ISO 19880-1 se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3-1 Características del Estándar ISO 19880-1 (Fuente: GIZ y Fichtner, 2020. Descarbonilación del sector energético chileno. Hidrógeno – Cadena de Valor y legislación internacional).

Característica	ISO 19880-1
Nombre	Gaseous Hydrogen – Fuelling Stations
Etapas en la cadena de valor	Producción / Almacenamiento
Temas tratados	Sistemas de producción de H ₂ V Suministro de H ₂ V a través de tuberías Generadores de H ₂ V a in situ que utilizan el proceso de electrólisis del agua Compresión de H ₂ V Almacenamiento de H ₂ V Dispositivos de pre enfriamiento Sistemas de distribución de H ₂ V
Aplicación en el proyecto	Características de diseño para la seguridad de las operaciones y equipamiento del proyecto

3.2 NFPA 2 - CÓDIGO DE TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO

Este documento proporciona requisitos de seguridad para la generación, instalación, almacenamiento, conducción, uso y manipulación de hidrógeno en forma de gas comprimido (H₂V) o de líquido criogénico (LH₂). Las principales características del estándar NFPA 2 se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3-2 Características del Estándar NFPA 2 (Fuente: GIZ y Fichtner, 2020. Descarbonilación del sector energético chileno. Hidrógeno – Cadena de Valor y legislación internacional).

Característica	NFPA 2
Nombre	Hydrogen Technology Code

Característica	NFPA 2
Etapa en la cadena de valor	Producción / Almacenamiento
Tema principal	Seguridad del hidrógeno
Tipo de hidrógeno	Gaseoso y líquido
Partes principales del estándar	Requisitos generales de seguridad contra incendios Requisitos generales para uso de hidrógeno Hidrógeno gaseoso Protección contra explosiones Sistemas de producción de Hidrógeno Aplicación atmósferas especiales
Aplicación en el proyecto	Distancias mínimas de exposición de sistemas al aire libre Requisitos generales de seguridad contra incendios Requisitos generales para uso de hidrógeno Protección contra explosiones

3.3 ESTÁNDARES MÁS DESTACADOS APLICABLES A EQUIPOS E INSTALACIONES CONSIDERADOS EN EL PROYECTO

Tabla 3-3 Estándares aplicables a equipos e instalaciones del proyecto (Fuente: GIZ y Fitchner, 2020. Descarbonilación del sector energético chileno. Hidrógeno – Cadena de Valor y legislación internacional).

Característica	ISO/TR 15916:2015
Nombre	Basic considerations for the safety of Hydrogen systems
Etapa en la cadena de valor	Producción / Almacenamiento
Temas tratados	Producción, almacenamiento, uso Propiedades básicas de combustión, explosiones, deflagración y detonación
Aplicación en el proyecto	Selección de tuberías para transportar hidrógeno Válvulas de alivio de presión Detectores de incendio
Característica	ISO 22734-1
Nombre	Hydrogen generators using water electrolysis – industrial, commercial and residential applications
Etapa en la cadena de valor	Producción
Temas tratados	Definición de requisitos de construcción, seguridad y rendimiento de los equipos de generación H2V
Aplicación en el proyecto	Instalación, operación y seguridad de equipamiento alcalino (AEL) de generación de hidrógeno

3.4 ESTÁNDARES DE PERFORMANCE E INSTALACIÓN DE COMPONENTES ESPECÍFICOS A TECNOLOGÍAS DE HIDRÓGENO

- ASME B31.3 y B31.12 Tuberías y conductos: Códigos de diseño e instalación de tuberías que también cubren la selección de materiales

- Código ASME de calderas y recipientes a presión (BPV): Aborda el diseño de los recipientes a presión de aleación de acero y compuestos
- CGA S series: Aborda requisitos de liberación de presión para containers.
- CGA H series: Componentes y sistemas.
- UL 2075: Sensores.
- CSA H Serie de estándares de componentes de hidrógeno.

3.5 DIRECTIVAS DE SEGURIDAD RELEVANTES

A continuación, se presentan tres directivas que abordan aspectos de seguridad relevantes para el contexto del estudio:

3.5.1 Directiva ATEX 99/92/EC

Define requisitos mínimos para mejorar la protección de la seguridad y la salud derivada de los riesgos de atmósferas explosivas (ATEX). De esta forma, define zonas sobre la base de la frecuencia y la duración de la aparición de una atmósfera explosiva.

3.5.2 Directiva ATEX 2014/34/EU

Define normas y reglamentos para todos los actores de la cadena de valor. Tiene la intención de garantizar que sólo se vendan y apliquen equipos seguros para su uso en atmósferas potencialmente explosivas. Incluye:

- Equipos y sistemas de protección.
- Requisitos esenciales de salud.
- Requisitos esenciales de seguridad.
- Procedimientos de evaluación a productos comercializados en la Unión Europea.

3.5.3 Methanol Institute (Safety Handling Manual – 5° Edition)

Reglamentos y códigos de EE. UU. (OSHA, EPA y DOT) relativas a la manipulación, producción, almacenamiento y distribución de metanol.

4. ANÁLISIS PRELIMINAR DE RIESGOS

El Análisis Preliminar de Riesgos es una técnica utilizada durante las fases de desarrollo de los proyectos teniendo como finalidad identificar los peligros y riesgos asociados a estos.

Teniendo en cuenta las características del proyecto y los procesos asociados a su operativa, se identificó los productos químicos peligrosos y principales equipamientos a estar presentes en la planta, para realizar posteriormente una revisión de los puntos capaces de liberar energía en forma incontrolada y su potencial afectación a receptores sensibles, instalaciones y medioambiente, concluyendo el análisis con recomendaciones para reducir o eliminar estos peligros.

Las sustancias químicas presentes en el proyecto se identificaron y clasificaron de acuerdo al Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos, así como los requisitos de las normas internacionales ISO/TR 15916:2015, UNE-ISO 19880-1:2022 (Europa/Global), NFPA 2, OSHA, EPA y DOT (EEUU) respecto a aspectos de seguridad y recomendaciones para reducir o eliminar los peligros identificados; asimismo se tuvo en cuenta la capacidad de producción y almacenamiento estimada para el proyecto.

Referente a equipos e instalaciones, los mismos serán acorde a los estándares internacionales ISO 22734-1, NPR 7910-1, UNE-EN-IEC 60079-10, IEC 61511-1, EN ISO 12100-2010, (Europa/Global), NFPA 55, ANSI B11.0-2010 (EE. UU.), aspectos en los cuales se profundizará en función de mayores avances en la selección de los proveedores, tecnología empleada y diseño de detalle de la planta.

En el análisis se consideraron las directivas para plantas de producción de hidrógeno y metanol de la Unión Europea SEVESO (2012/18/UE), ATEX (2014/24/UE) y la Directiva (2010/75/UE).

4.1 SUSTANCIAS QUÍMICAS PRESENTES EN EL PROYECTO

4.1.1 Producción de Hidrógeno Verde

En la figura 4-1 se identifican las sustancias químicas presentes en la generación de hidrógeno verde asociadas al proyecto:

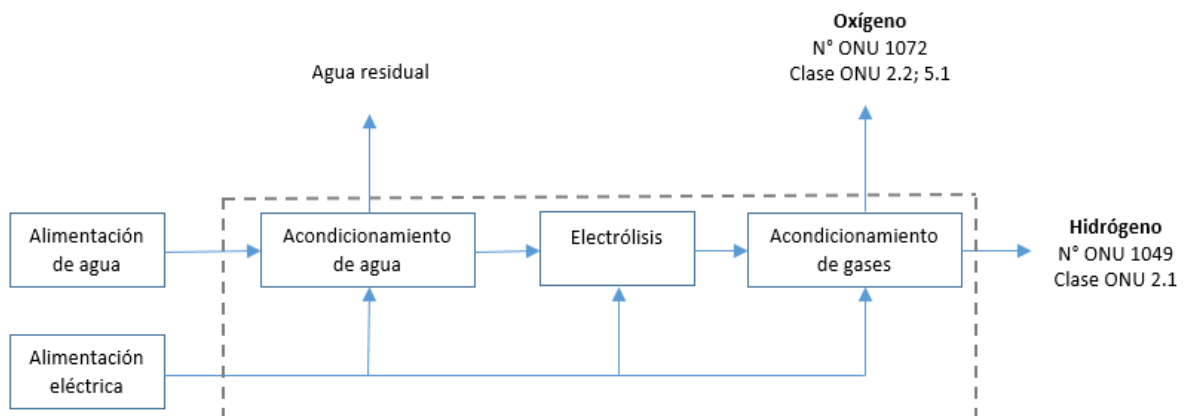






Figura 4-1 Diagrama sistema de producción de H2V verde.

La identificación de características asociadas a estas sustancias se realizó teniendo en cuenta las correspondientes fichas de datos de seguridad y las consideraciones del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de sustancias:

Tabla 4-1 Características de las sustancias químicas asociadas al proceso de producción de H2V verde (Cameo Chemicals, Chemical Datasheet - SGA)

Riesgos y Precauciones		
Tipo	Hidrógeno gaseoso	Oxígeno
Número ONU	1049	1072
CAS	1333-74-0	7782-44-7
Estado	Gas	Gas
Pictograma de transporte		
Clase de Peligro	2.1	2.2 - 5.1
Pictograma GHS		
Riesgos físicos	Gas extremadamente inflamable (H220). Contiene gas bajo presión; puede explotar si es calentado (H280).	Puede causar o intensificar fuego; oxidante (H270). Contiene gas bajo presión. Puede explotar si es calentado (H280).
Riesgos a la salud	No se especifican riesgos a la salud (H3xx).	No se especifican riesgos a la salud (H3xx*).
Riesgos ambientales	No se especifican riesgos medioambientales (H4xx).	No se especifican riesgos medioambientales (H4xx).
Precaución almacenamiento	Use y almacene al aire libre o en un lugar seco y bien ventilado (P271 - P403).	Use y almacene al aire libre o en un lugar seco y bien ventilado (P271 - P403).

4.1.2 Producción de Metanol Verde

En la Figura 4-2 se identifican las sustancias químicas presentes en la generación de metanol verde asociadas al proyecto:

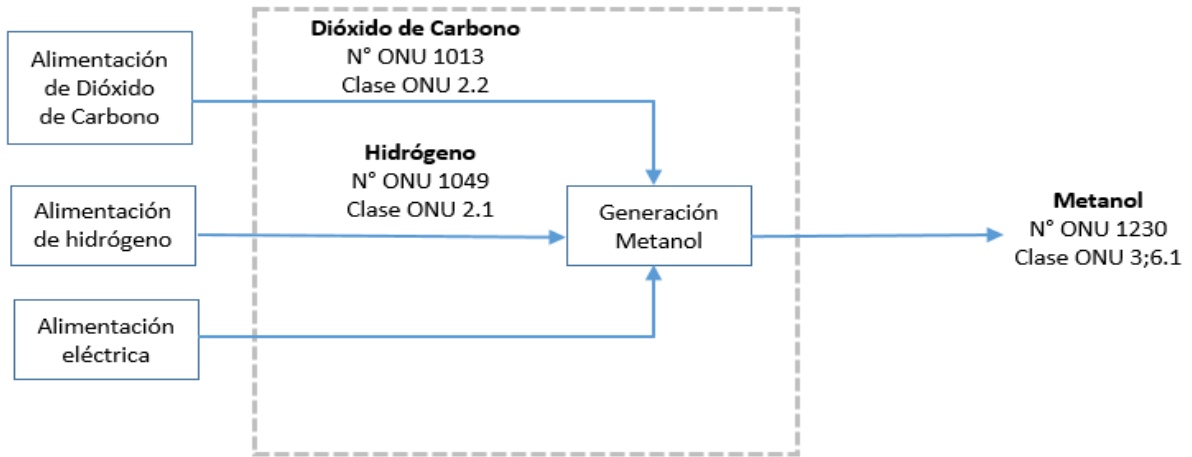


Figura 4-2 Diagrama sistema de producción de MeOH verde.

La identificación de características asociadas a estas sustancias se realizó teniendo en cuenta las correspondientes fichas de datos de seguridad y las consideraciones del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y etiquetado de sustancias.

Tabla 4-2 Características de las sustancias químicas asociadas al proceso de producción de MeOH verde (Cameo Chemicals, Chemical Datasheet - SGA)

Riesgos y Precauciones			
Tipo	Hidrógeno gaseoso	Metanol	Dióxido de Carbono
Número ONU	1049	1230	2187
CAS	1333-74-0	67-56-1	124-38-9
Estado	Gas	Líquido	Líquido refrigerado
Pictograma de transporte			
Clase de Peligro de transporte	2.1	3	2
Pictograma GHS			
Riesgos físicos	Gas extremadamente inflamable (H220). Contiene gas bajo presión; puede explotar si es calentado (H280).	Líquido y vapores muy inflamables (H225).	Contiene un gas a presión; Peligro de explosión en caso de calentamiento. (H280)
Riesgos a la salud	No se especifican riesgos a la salud (H3xx).	Tóxico en de ingestión, contacto con la piel o inhalación. (H301 + H311 + H331) Provoca daños en los órganos (Ojos). (H370)	Asfixiante a altas concentraciones (H380).

Riesgos y Precauciones			
Riesgos ambientales	No se especifican riesgos medioambientales (H4xx).	No se especifican riesgos medioambientales (H4xx).	No se especifican riesgos ambientales (H4xx).
Precaución almacenamiento	Use y almacene al aire libre o en un lugar seco y bien ventilado (P271 - P403).	Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener en lugar fresco. (P403 + P235).	Almacenar en un lugar bien ventilado (P403)

4.2 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN - ALMACENAMIENTO DEL PROYECTO

En cuanto a la capacidad de producción de metanol, la misma se estima en 84,000 t/año - 12.5 t/h con un abastamiento de 17.8 t/h dióxido de carbono máximo y 2.44 t/h hidrógeno-, previendo una capacidad máxima de acopio en el lugar en el orden de los 4000 t MeOH, 8 t H₂V y 250 t/d durante el transporte férreo de MeOH. Teniendo en cuenta las cantidades de almacenamiento, las mismas resultan de un volumen significativo; a efectos de reducir los riesgos potenciales asociados a su almacenamiento, se tuvo en cuenta las directivas de la Unión Europea en cuanto a almacenamiento en plantas de producción de hidrógeno y metanol, la cual en la Directiva 2012/18/UE, Anexo 1, Parte 2, establece una obligación en cuanto a estudio de riesgos para plantas que almacenen cantidades mayores a 5 toneladas de sustancias químicas peligrosas.

4.3 RIESGOS POTENCIALES ASOCIADOS AL H₂V, MEOH Y MEDIDAS DE CONTROL APLICABLES

Teniendo en cuenta la identificación de peligros potenciales realizado en el capítulo 1, los riesgos principales asociados al manejo, producción y almacenamiento de hidrógeno pueden clasificarse como: fugas, fragilización de materiales de almacenamiento, suministro e instalaciones (aspectos abordados en este capítulo de acuerdo a la norma ISO/TR 15916:2015 y NFPA 2); respecto a los riesgos potenciales relacionados al metanol, los mismos pueden clasificarse como explosión, incendio y toxicidad (Methanol Institute, 2008).

A continuación, se presentan los principales riesgos potenciales para el personal e instalaciones en función de las propiedades fisicoquímicas de las sustancias presentes en el proyecto.

Riesgos Potenciales H₂V, de acuerdo con la norma ISO 15.916 cap. 6 y 7:

- Inflamabilidad
 - Efectos térmicos (incendio).
 - Efectos de sobre presión (explosión).
 - Facilidad de ignición a diferentes concentraciones.
- Molécula de tamaño pequeño
 - Baja viscosidad.
 - Alta tasa de difusión.
 - Alta flotabilidad.
- Interacción con materiales

- Fragilización.
- Riesgos de asfixia
- Riesgos asociados a almacenamiento
 - Altas presiones de gas.
 - Otros como metales hidruros

Riesgos Potenciales MeOH (Methanol Institute, 2008):

- Inflamabilidad
 - Efectos térmicos (incendio).
 - Efectos de sobre presión (explosión).
 - Facilidad de ignición a diferentes concentraciones.
- Riesgos de intoxicación
- Riesgos asociados a Reactividad e incompatibilidad
 - Reaccionar violentamente con agentes oxidantes fuertes como el trióxido de cromo, con ácidos minerales fuertes como el ácido perclórico, sulfúrico y nítrico y con metales altamente reactivos como el potasio

Para alcanzar en el proyecto una operación confiable y segura, teniendo en cuenta las estrategias previstas por la norma de referencia, las medidas de gestión a implementar estarán basadas en eliminar, prevenir, evitar, mitigar o aceptar los riesgos asociados a través de las siguientes consideraciones generales:

- Minimizar el error humano.
- Seleccionar un material compatible con las características y condiciones de operación.
 - Consideraciones para operación con bajas temperaturas (H2V).
 - Consideraciones debido a la fragilización de material en caso de hidrógeno.
 - Consideraciones debido a la difusión del hidrógeno.
- Prevenir exceso de presión (H2V).
- 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.

Todos los peligros relacionados con el sistema de generación de hidrógeno y metanol serán identificados, los riesgos respectivos serán evaluados y controlados, especialmente los riesgos con resultados de intolerables, implementando controles primarios que evitarán el riesgo al decidir no comenzar o continuar con la actividad, eliminar la fuente del riesgo, cambiar la probabilidad y consecuencia y estableciendo controles de contingencia que minimicen los efectos si hay un incidente.

Se describen a continuación para cada uno de los riesgos potenciales identificados del proceso de producción y almacenamiento de H2V y las medidas de control asociadas que se implementarán de acuerdo con los lineamientos de la norma NFPA 2 de EEUU:

Tabla 4-3 Riesgos potenciales – Reducción de riesgo (Ref.: NFPA 2:2023).

Riesgo Potencial	Reducción del Riesgo	Código/Sección NFPA 2:2023
Liberación (fuga) de Hidrógeno H2V	1.Limitar el almacenamiento de Hidrógeno en interiores.	1- 6.4.1
	2. Uso de detectores para identificar liberación de H2V.	2- 6.12
	3. Contar con sistema de ventilación para asegurar la liberación de hidrógeno.	3- 6.17
	4. Shut down del sistema si se detecta liberación de H2V y activación de la alarma sonora y visual.	4- 10.3.1.18.1.3 y 10.3.1.17.1
	5. Evacuar el lugar en caso de alarma.	5- 4.11
	6. Selección de materiales adecuados compatibles con el H2V.	6- 6.18.1.1 y 7.2.1.1
Evento de sobrepresión de Hidrógeno sin ignición	1. PRDS (dispositivo de alivio) para prevenir eventos de sobrepresión catastrófica.	1- 8.3.1.2.2. y 7.1.5.1
	2. Evacuar al personal por un potencial evento de sobrepresión.	2- 4.11
	3. Realizar pruebas y mantenimiento para garantizar que los sistemas de alivio de presión estén operativos.	3- 8.3.1.2.2 y 7.1.5.5
	4. Contar con zonas de clasificación eléctrica.	4- Tabla 7.3.2.3.1.5, Tabla 8.3.1.2.6, Tabla 10.3.1.15.1
Liberación de Hidrógeno con ignición y fuego	1. Venteo de H2V en un área segura.	1- 7.1.17 y 8.1.5
	2. Inexistencia de materiales inflamables en el área de ignición y fuego.	2- 4.12, 7.1.9.1.6, 7.1.26, 8.3.2.2.2.3, Tabla 8.3.2.3.1.6.(A), 10.3.1.13.9, Tabla 8.3.2.3.1.6 (A), 10.3.1.13.9 y Tabla 10.3.2.3.1.4
Liberación de Hidrógeno con ignición en un espacio cerrado o parcialmente cerrado como resultado una explosión	1. Limitar el almacenamiento de H2V en un espacio cerrado o parcialmente cerrado ante la liberación de H2V para evitar tener la cantidad suficiente para producir una explosión	1- 6.1.1.4 y 6.1.1.5
	2. Almacenamiento de H2V no permitido en espacios confinados sin ventilación.	2- 6.3

El proyecto contemplará el cumplimiento de estándares internacionales ISO (Europa/Global), NFPA OSHA, EPA y DOT (EEUU), así como normativa nacional vigente referidas a los Decretos

128/2014¹⁴, 244/016¹⁵, 307/2009¹⁶ así como demás normas complementarias y concordantes aplicables; éstos estándares y normativa serán incluidos en las etapas de diseño, construcción e instalación, elaboración de procesos seguros y efectivos de manejo de hidrógeno/metanol, procedimientos de trabajos operativos y de mantenimiento, formación de los trabajadores basada en prácticas adecuadas en manejo de hidrógeno/metanol y realización en forma periódica de simulacros de emergencia así como supervisión y control de la gestión.

No se cuenta con un estándar internacional ISO específico para metanol, por lo cual en este estudio se utilizó la guía "Methanol Safe Handling Manual 5th-Edition, 2008" del Methanol Institute de EEUU, en el cual se presenta estándares y normas internacionales universales para sustancias inflamables, explosivos y tóxicos aplicables a la sustancia de referencia.

¹⁴ Decreto 128/014: Servicios de Seguridad y Salud en el trabajo en la Industria Química.

¹⁵ Decreto 244/016: Comisiones bipartitas y tripartitas de Seguridad y Salud en el Trabajo.

¹⁶ Decreto 307/09: Reglamentación para la protección de la seguridad y salud contra los riesgos derivados de los agentes químicos.

5. EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES

5.1 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES

El análisis de riesgo ambiental se realizó aplicando la norma internacional UNE 150008:2008¹⁷ así como el sistema de clasificación de sustancias químicas presentes en el proyecto de acuerdo con el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos.

Esta norma es un método de evaluación cualitativa donde teniendo en cuenta los riesgos potenciales del proyecto, se plantean escenarios accidentales relacionados a los mismos, obteniéndose una medida del riesgo mediante la evaluación de la probabilidad de ocurrencia y posibles consecuencias de dichos escenarios accidentales:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

La identificación de escenarios accidentales, relacionados a las actividades a ser llevadas a cabo se realizó centrándose en las etapas de operación del proyecto.

Las actividades por evaluar en la fase de operación se centraron en el manejo, producción, almacenamiento (H₂V, MeOH, CO₂), transporte de (MeOH, CO₂) y presencia de línea de alto voltaje con relación al transporte/almacenamiento de MeOH, ya que estas tareas conllevan la posibilidad de ocurrencia de estados definidos como inseguros o de riesgo.

Para el análisis de probabilidad y de acuerdo con lo establecido por el método, se pueden utilizar registros de accidentes e incidentes o realizar la evaluación mediante estimación. Con relación a accidentes relacionados con toda la cadena de valor del hidrógeno, se utilizaron estadísticas de la UE referidas al período 1995-2014, en donde se aprecia una disminución del número de accidentes a medida que aumenta la producción de H₂ (Figura 5-1); teniendo en cuenta las etapas de la cadena de valor donde se registraron más accidentes, se observa que el 44% de los accidentes ocurrió durante el transporte, el 25% en la producción, el 19% en el almacenamiento y el 12% durante su uso, registrándose la mayoría de los accidentes que causaron al menos una muerte, lesión o evacuación durante la etapa de transporte del hidrógeno¹⁸.

¹⁷ Normalización Española - International Standard Organization. (2008). UNE/150008:2008. Análisis y evaluación del riesgo ambiental.

¹⁸ M. Spada, P. Burgherr, P. Rouelle. Comparative risk assessment with focus on hydrogen and selected fuel cells: Application to Europe. s.l.: ELSEVIER, 2018.

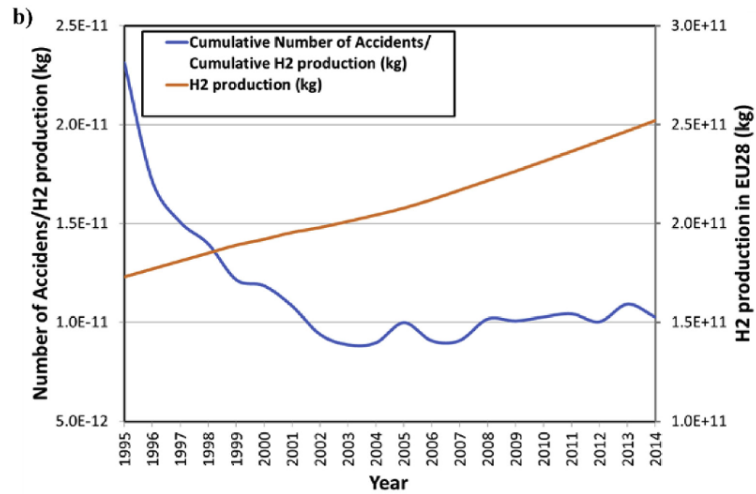


Figura 5-1 Accidentes - producción de hidrógeno, valores acumulados. UE 1995-2014. (Fuente: ELSEVIER, 2018).

En relación a datos históricos correspondientes al metanol (por sector), se utilizaron estadísticas elaboradas por el Methanol Institute¹⁹ de accidentes reportados en EEUU, Canadá, Brasil, Francia, Italia, Alemania, Suecia, China, India, Malasia, Sudáfrica y Australia, referidos al período 1998-2011, donde el 81% de todos los accidentes fueron a causa de incendios y explosiones y el 14% a derrames (Tabla 5-1), estimándose una probabilidad de riesgo de accidente relacionado con incendio de tanques de almacenamiento de $2,58 \times 10^{-1}$ eventos/año.

No se encontraron datos históricos relacionados con accidentes referidos a la manipulación, producción y transporte de CO₂ así como a provocados por la cercanía de líneas de alta tensión.

Tabla 5-1 Tipos de accidentes referidos al metanol por sector- 1998-2011. (Fuente: Methanol Institute, Safe Handling Guide, 5th edition).

Sector	Número de incidentes	% de incidentes	Incendio y/o Explosión	Derrame	Otros
Biodiésel	23	28%	23		
Industrial	23	28%	21	2	
Transporte	22	27%	12	6	4
Hogar	4	5%	4		
Tuberías	4	5%	1	3	
Escuelas	3	4%	3		
Comercial	1	1%	1		
Tratamiento de aguas	1	1%	1		
Total	81	-	66	11	4
Porcentaje	100%	100%	81%	14%	5%

La evaluación de las posibles consecuencias se realizó teniendo en cuenta el posible daño que generaría el incidente o accidente, sobre la infraestructura, vida humana y el medio ambiente. A continuación, se presentan los criterios para la valoración de los riesgos ambientales.

¹⁹ Methanol Institute. <https://www.methanol.org/safe-handling/>

5.2 CRITERIOS PARA LA VALORACIÓN DE LA PROBABILIDAD

Tabla 5-2 Criterios para valoración de la probabilidad o frecuencia. (Fuente: UNE 150008:2008).

Probabilidad o frecuencia		Puntuación
<1 vez/ mes	Muy probable	5
1 vez/mes - 1 vez/año	Altamente probable	4
1 vez/año - 1 vez/10 años	Probable	3
1 vez/10 años - 1 vez/50 años	Posible	2
>1 vez/50 años	Muy poco probable	1

5.3 CRITERIOS PARA LA VALORACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS

La técnica desarrollada en esta norma recoge 4 criterios que se deben evaluar para cada uno de los tres entornos:

Tabla 5-3 Criterios para valoración de las consecuencias. (Fuente: UNE 150008:2008).

Cantidad (ton)		H2V	MeOH	Peligrosidad		
4	MUY ALTA	>500	>30.000	4	MUY PELIGROSA	Muy inflamable Muy tóxica Causa efectos irreversibles inmediatos
3	ALTA	50 – 500	4.000- 30.000	3	PELIGROSA	Explosivos Inflamables Corrosivos
2	POCA	5 – 49	25-29.999	2	POCO PELIGROSA	Combustibles
1	MUY POCA	<5	<25	1	NO PELIGROSA	Daños leves y reversibles
Extensión						
4	MUY EXTENSO	Radio >1 Km		4	MUY ALTO	Más de 100 personas
3	EXTENSO	Radio <1 Km		3	ALTO	Entre 50 y 100 personas
2	POCO EXTENSO	Emplazamiento		2	MEDIO	Entre 5 y 50 personas
1	PUNTUAL	Área afectada		1	BAJO	Menos de 5 personas

Para estimar la gravedad de las consecuencias se deben aplicar las siguientes fórmulas en las que se consideran los criterios antes citados:

Tabla 5-4 Fórmulas para la valoración de la gravedad de las consecuencias. (Fuente: UNE 150008:2008).

Cantidad	+2 x peligrosidad	+extensión	+calidad del medio	=gravedad sobre el entorno natural
Cantidad	+2 x peligrosidad	+extensión	+población afectada	=gravedad sobre el entorno humano
Cantidad	+2 x peligrosidad	+extensión	+patrimonio y capital productivo	=gravedad sobre el entorno socioeconómico

Una vez estimadas las probabilidades/frecuencias de ocurrencia de los distintos escenarios identificados y las consecuencias derivadas sobre cada uno de los 3 entornos posibles se procede a la estimación del riesgo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

Finalmente se realiza la clasificación de la estimación del riesgo de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 5-5 Clasificación de la estimación del riesgo

Significancia	Valoración	Valor asignado
Crítico	Entre 20 - 18	5
Grave	Entre 17 - 15	4
Moderado	Entre 14 - 11	3
Leve	Entre 10 - 8	2
No relevante	Entre 7 - 5	1

Peligro	Escenario de Riesgo	Posibles Causas	Descripción	Impactos Potenciales	Probabilidad	Consecuencias				Valor	Estim. del Riesgo	Medidas de Control para minimizar el Riesgo
						Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Receptores			
Manipulación, producción y almacenamiento (H2V)	Fugas de hidrógeno	Fallas/roturas en los materiales de los tanques de almacenamiento, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones. Mantenimiento insuficiente (equipos, instalaciones, calibración de instrumentos). Fallas en los chequeos de seguridad del sistema (shutdown, detección de gases). Error – falla humana.	Existe riesgo de fragilización –rotura en los tanques de almacenamiento de hidrógeno, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones provocando una liberación de este.	Las fugas de hidrógeno acompañadas de una fuente de ignición externa y presencia de O2 en cantidad suficiente pueden generar combustión, provocando incendios y explosiones. Incendio de toda el área del proyecto, provocando heridos, generación de mayor cantidad de emisiones atmosféricas, incendios forestales, pérdida de flora y fauna, daño extensivo a áreas aledañas al emplazamiento y afectación a receptores sensibles de la zona. Sobrepresión por detonación (vapor cloud explosion - VCE), onda expansiva afectando a toda el área del proyecto, provocando heridos, daño en instalaciones, equipos y zonas aledañas, pérdida de flora y fauna y afectación a receptores sensibles de la zona.	1	2	3	3	1	11	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ○ Todos los materiales, equipos, instalaciones e infraestructura cumplirán con las normas y estándares internacionales para manipulación, producción y almacenamiento H2V. ○ Conductos de ventilación, muros cortafuegos, estructuras anti-deflagraciones como puertas blindadas. Ventilación forzada y natural para evitar incendio y explosiones. ○ Sistemas de detección de H2V. ○ Sistemas de detección de O2. ○ Sistemas de detección y extinción de incendio. ○ Distancias de seguridad a prueba de incendio y explosiones. ○ Lazos de control de presión y parada de emergencia. Nivel integrado de seguridad (Safety Integrity Level - SIL) incluyendo sistemas de señal de seguridad y software de seguridad para shutdown de emergencia. ○ Zonas de clasificación eléctrica. ○ Zonas de clasificación de atmósferas explosivas. ○ Mantenimiento preventivo de equipos, instalaciones, herramientas y vehículos. ○ Desarrollo de procedimientos operativos, capacitación y entrenamiento del personal. ○ Desarrollo y entrenamiento en procedimientos de evacuación y respuesta ante emergencia. ○ Dotación de cuerpo de Bomberos para dar respuesta en caso de emergencias. ○ Uso de EPP y Colectivos homologados bajo norma/certificado específico.
	Explosión e incendio	Fallas de equipos, materiales / Presencia de exceso de oxígeno y fuentes de ignición/ Amplio rango de inflamabilidad del H2 (especialmente ratio H2-aire = 29%). Error – falla humana.	Existe riesgo de incendio/explosión en caso de rotura/ fuga en los tanques de almacenamiento de hidrógeno, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones (liberación de H2V), acompañadas de una fuente de ignición externa y presencia de O2 en cantidad suficiente.	Incendio de toda el área del proyecto, provocando heridos, generación de mayor cantidad de emisiones atmosféricas, incendios forestales, pérdida de flora y fauna, daño extensivo a áreas aledañas al emplazamiento y afectación a receptores sensibles de la zona. Sobrepresión por detonación (vapor cloud explosion - VCE), onda expansiva afectando a toda el área del proyecto, provocando heridos, daño en instalaciones, equipos y zonas aledañas, pérdida de flora y fauna y afectación a receptores sensibles de la zona. Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.	1	2	3	3	1	11	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ○ Todos los materiales, equipos, instalaciones e infraestructura cumplirán con las normas y estándares internacionales para manipulación, producción y almacenamiento H2V. ○ Selección del equipo adecuado, conexión a tierra y unión del equipo, selección de materiales: utilice materiales que sean resistentes a la fragilización por hidrógeno y adecuados para aplicaciones de alta presión y entornos climáticos adversos. ○ Barreras físicas: utilice barreras físicas y recintos protectores para minimizar el impacto de posibles fugas o incendios. ○ Procedimientos operativos estándar y capacitación. ○ Ventilación forzada y natural para evitar incendio y explosiones. ○ Sistemas de detección de H2V. ○ Sistemas de detección de O2. ○ Sistemas de detección y extinción de incendio. Distancias de seguridad a prueba de incendio y explosiones. ○ Lazos de control de presión y parada de emergencia. Nivel integrado de seguridad (Safety Integrity Level - SIL) incluyendo sistemas de señal de seguridad y software de seguridad para shutdown de emergencia. ○ Zonas de clasificación eléctrica. ○ Zonas de clasificación de atmósferas explosivas.

Peligro	Escenario de Riesgo	Posibles Causas	Descripción	Impactos Potenciales	Probabilidad	Consecuencias				Valor	Estim. del Riesgo	Medidas de Control para minimizar el Riesgo
						Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Receptores			
												<ul style="list-style-type: none"> ○ Mantenimiento preventivo de equipos, instalaciones, herramientas y vehículos. ○ Desarrollo de procedimientos operativos, capacitación y entrenamiento del personal. ○ Desarrollo y entrenamiento en procedimientos de evacuación y respuesta ante emergencia. ○ Dotación de cuerpo de Bomberos para dar respuesta en caso de emergencias. Uso de EPP y Colectivos homologados bajo norma/certificado específico.
	Impacto vehicular (Tráfico interno y externo, carga y descarga de productos, choque accidental contra unidades de almacenamiento, tuberías, otros equipos e instalaciones, fugas H2, incendio, explosión)	<p>Falla de equipos de control de vehículos / Exceso de velocidad y maniobras.</p> <p>Señales de identificación de desplazamiento de vehículos inadecuadas.</p> <p>Falla en vallas protectoras anticolidión de unidades e instalaciones.</p> <p>Falla en sensores de colisión.</p> <p>Error humano</p>	<p>Existe riesgo de fugas de H2, incendio y explosión en caso de impacto vehicular por carga y descarga de productos o choque accidental contra unidades de almacenamiento, tuberías, otros equipos e instalaciones.</p>	<p>Incendio de toda el área del proyecto, provocando heridos, generación de mayor cantidad de emisiones atmosféricas, incendios forestales, pérdida de flora y fauna, daño extensivo a áreas aledañas al emplazamiento y afectación a receptores sensibles de la zona.</p> <p>Sobrepresión por detonación (vapor cloud explosion - VCE), onda expansiva afectando a toda el área del proyecto, provocando heridos, daño en instalaciones, equipos y zonas aledañas, pérdida de flora y fauna y afectación a receptores sensibles de la zona.</p> <p>Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.</p>	1	2	3	2	1	11	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ○ Todos los materiales, equipos, instalaciones e infraestructura cumplirán con las normas y estándares internacionales para manipulación, producción y almacenamiento H2V. ○ Ventilación forzada y natural para evitar incendio y explosiones. ○ Sistemas de detección de H2V. ○ Diseño con elevación adecuada para el tráfico de equipos y camiones/elevadores. Procedimientos de elevación. ○ Límites de velocidad dentro de la planta. ○ Capacitación constante en conducción. ○ Plan de emergencia. ○ Sistema de detección y protección contra incendios. ○ Sistemas de detección de O2. Vallas protectoras anticolidión en unidades e instalaciones. ○ Sistemas de detección y extinción de incendio. ○ Sensores de colisión homologados bajo norma/certificado específico. ○ Control satelital de velocidad de vehículos. Señalización de desplazamiento de vehículos bajo norma/estándar específico. ○ Cumplimiento de normativa nacional para el transporte de sustancias peligrosas. ○ Prohibición de consumo de alcohol y drogas en el trabajo. ○ Distancias de seguridad a prueba de incendio y explosiones. ○ Lazos de control de presión y parada de emergencia. ○ Nivel integrado de seguridad (Safety Integrity Level - SIL) incluyendo sistemas de señal de seguridad y software de seguridad para shutdown de emergencia. ○ Zonas de clasificación eléctrica. ○ Zonas de clasificación de atmósferas explosivas. ○ Mantenimiento preventivo de equipos, instalaciones, herramientas y vehículos. ○ Desarrollo de procedimientos operativos, capacitación y entrenamiento del personal - capacitación específica en el transporte de sustancias peligrosas. ○ Plan de contingencia y Protocolos de actuación ante derrame/fuga de sustancias químicas. ○ Desarrollo y entrenamiento en procedimientos de evacuación y respuesta ante emergencia. ○ Dotación de cuerpo de Bomberos para dar respuesta en caso de emergencias. ○ Uso de EPP y Colectivos homologados bajo norma/certificado específico
Manipulación, producción, almacenamiento	Explosión incendio	Fallas/roturas en los materiales de los tanques	Existe riesgo de incendio/explosión en caso de	Incendio (pool fire) extendiéndose a toda el área del proyecto, provocando heridos, generación de mayor cantidad	1	2	4	3	1	14	Moderado	

Peligro	Escenario de Riesgo	Posibles Causas	Descripción	Impactos Potenciales	Probabilidad	Consecuencias					Estim. del Riesgo	Medidas de Control para minimizar el Riesgo
						Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Receptores	Valor		
y transporte (MeOH)		<p>almacenamiento, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones y antorcha.</p> <p>Mantenimiento insuficiente (equipos, instalaciones, calibración de instrumentos).</p> <p>Fallas en los chequeos de seguridad del sistema (shutdown, detección de gases).</p> <p>Error – falla humana.</p>	<p>rotura/fuga en los tanques de almacenamiento, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones de MeOH, acompañadas de una fuente de ignición externa y presencia de O2 en cantidad suficiente.</p> <p>Si hay arrastre de líquido a la antorcha, se puede producir lluvia de fuego.</p>	<p>de emisiones atmosféricas, nube tóxica, incendios forestales, pérdida de flora y fauna, daño extensivo a áreas aledañas al emplazamiento y afectación a receptores sensibles de la zona.</p> <p>Sobrepresión (Bleve), onda expansiva afectando a toda el área del proyecto, provocando heridos, daño en instalaciones, equipos y zonas aledañas, pérdida de flora y fauna y afectación a receptores sensibles de la zona.</p> <p>Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.</p>								<ul style="list-style-type: none"> Los tanques de almacenamiento de metanol se instalarán en un área bien ventilada y alejados de fuentes de calor e ignición, con temperatura controlada, segura y separada de las áreas de trabajo, y en un edificio aislado y separado. El diseño considera las velocidades de flujo y los materiales adecuados, Se realiza ensayos no destructivos (END) adecuados Se realiza una inspección visual. Instalación detectores de gas. Disponer de sistemas de detección y protección contra incendios.4Instalar fuelles de la más alta calidad disponibles en la industria, diseño con mayor tolerancia a la corrosión, Se realiza una inspección visual de ruta, Mantenimiento adecuado, Verificación del espesor materiales frecuentemente, y de fuentes de calor e ignición, con temperatura controlada, segura y separada de las áreas de trabajo, y en un edificio aislado y separado. Diseño antorcha adecuado y su Knock Out (KO) drum para separar mezclas vapor-líquido. - Rutina adecuada de mantenimiento - Control en los niveles de líquido del KO drum - Mantenimiento apropiado para las bombas del KO drum - Asegurar inspección visual diaria. Los tanques se inspeccionarán periódicamente y seguirán estrictas pautas de inspección. Los procedimientos de carga y descarga se realizarán en áreas bien ventiladas, fuera de la luz solar directa y lejos de fuentes de calor e ignición (es decir, no se permite fumar ni utilizar teléfonos celulares en las operaciones de carga y descarga). El almacenamiento y manipulación de metanol debe estar sujetos a las mismas pautas que se siguen para otras sustancias inflamables similares, como la gasolina. Mantenimiento periódico: inspección de todos los equipos, tanques de acopio, calibración de instrumentos, monitoreo y control de la corrosión, limpieza de reactores, intercambiadores de calor y tuberías, aislaciones de tuberías y equipos.
	Fugas en instalaciones, áreas de almacenamiento y antorcha	<p>Fallas/roturas en los materiales de los tanques de almacenamiento, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones.</p> <p>Falla de llama en antorcha / Daño en líneas de antorcha.</p> <p>Mantenimiento insuficiente (equipos, instalaciones, calibración de instrumentos).</p> <p>Fallas en los chequeos de seguridad del sistema</p>	<p>Existe riesgo de intoxicación /incendio/explosión en caso de rotura/fuga en los tanques de almacenamiento, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones de MeOH, acompañadas de una fuente de ignición externa y presencia de O2 en cantidad suficiente.Si la</p>	<p>Incendio (pool fire) extendiéndose a toda el área del proyecto, provocando heridos, generación de mayor cantidad de emisiones atmosféricas, nube tóxica, incendios forestales, pérdida de flora y fauna, daño extensivo a áreas aledañas al emplazamiento y afectación a receptores sensibles de la zona.</p> <p>Emisiones a la atmósfera desde la antorcha y posible asfixia cuando hay daño en líneas cerca al piso.</p> <p>Sobrepresión (Bleve), onda expansiva afectando a toda el área del proyecto, provocando heridos, daño en instalaciones, equipos y zonas aledañas,</p>	1	2	4	3	1	14	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> Los tanques de almacenamiento de metanol se instalarán en un área bien ventilada, alejada de fuentes de calor e ignición, segura y separada de las áreas de trabajo, y en un edificio aislado y separado. Envolvado de contención alrededor de los tanques de almacenamiento. Circuito de control de nivel y alarmas. Sistemas de detección y protección contra incendios. Los tanques se inspeccionarán periódicamente y seguirán estrictas pautas de inspección. Los procedimientos de carga y descarga se realizarán en áreas bien ventiladas, fuera de la luz solar directa y lejos de fuentes de calor e ignición (es decir, no se permite fumar ni utilizar teléfonos celulares en las operaciones de carga y descarga). El almacenamiento y manipulación de metanol debe estar sujetos a las mismas pautas que se siguen para otras sustancias inflamables similares, como la gasolina.

Peligro	Escenario de Riesgo	Posibles Causas	Descripción	Impactos Potenciales	Probabilidad	Consecuencias				Valor	Estim. del Riesgo	Medidas de Control para minimizar el Riesgo
						Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Receptores			
		(shutdown, detección de fugas). . Error – falla humana.	antorcha no funciona, habrá emisiones de gases con contenido de metanol a la atmósfera	pérdida de flora y fauna y afectación a receptores sensibles de la zona. Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.								<ul style="list-style-type: none"> ○ Diseño antorcha y su piloto adecuado mantenimiento antorcha, KO drum y piloto Backup de emergencia para piloto de flare. ○ Detectores de gas Mantenimiento periódico: inspección de todos los equipos, tanques de acopio, calibración de instrumentos, monitoreo y control de la corrosión, limpieza de reactores, intercambiadores de calor y tuberías, aislaciones de tuberías y equipos.
	Fugas durante el transporte	Riesgo de incendio y explosión durante el transporte en tren. El metanol es inflamable y durante un incendio, los contenedores cerrados pueden romperse violentamente. Error - falla humana.	Existe riesgo de intoxicación /incendio en caso de rotura/fuga en los contenedores cerrados de MeOH durante el transporte en tren o la existencia de vagones defectuosos.	Incendio, provocando heridos, generación de mayor cantidad de emisiones atmosféricas, nube tóxica, incendios forestales, pérdida de flora y fauna, daño extensivo a áreas aledañas y afectación a receptores sensibles de la zona. Sobrepresión, onda expansiva provocando heridos, daño en infraestructura, vagones y zonas aledañas, pérdida de flora y fauna y afectación a receptores sensibles de la zona. Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.	1	2	4	3	3	16	Grave	<ul style="list-style-type: none"> ○ Los contenedores se inspeccionarán periódicamente y seguirán estrictas pautas de inspección. ○ Los procedimientos de carga y descarga se realizarán en áreas bien ventiladas, fuera de la luz solar directa y lejos de fuentes de calor e ignición (es decir, no se permite fumar ni utilizar teléfonos celulares en las operaciones de carga y descarga). La manipulación de metanol debe estar sujetos a las mismas pautas que se siguen para otras sustancias inflamables similares, como la gasolina. ○ Mantenimiento periódico: inspección de todos los equipos, contenedores, calibración de instrumentos, monitoreo y control de la corrosión. ○ Rutina de inspección de vagones para identificar vagones defectuosos. ○ Se inspeccionarán los movimientos de los trenes y se prepararán planes de respuesta de emergencia con antelación para responder a cualquier incidente de incendio. ○ El personal estará capacitado sobre los procedimientos a seguir durante un evento en el que se incendian vagones o camiones. ○ El transporte de metanol debe estar sujeto a las mismas pautas que se siguen para otras sustancias inflamables similares como la gasolina.
Manipulación, producción, almacenamiento y transporte (CO2)	Fugas en instalaciones y áreas de almacenamiento	Fallas/roturas en los materiales de los tanques de almacenamiento, válvulas, tuberías u otros equipos e instalaciones. Mantenimiento insuficiente (equipos, instalaciones, calibración de instrumentos). . Fallas en los chequeos de seguridad del sistema (shutdown, detección de fugas). . Error – falla humana.	Existe riesgo de asfixia en caso de que el CO2 se filtre en un ambiente cerrado.	Pérdida de vida humana, asfixia y afectación a receptores sensibles de la zona. Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.	1	4	1	2	1	9	Lev Leve	<ul style="list-style-type: none"> ○ Los tanques de almacenamiento de CO2 se instalarán en un área fresca, seca, bien ventilada, alejada de la luz solar directa y de fuentes de calor e ignición, con temperatura controlada, segura y separada de las áreas de trabajo, y en un edificio aislado y separado. ○ Los contenedores de almacenamiento de CO2 se aseguran (mediante cadenas) en posición vertical a una pared, estante u otra estructura sólida para evitar caer y romper el tanque provocando fugas. ○ En la planta de producción CO2 instalar protecciones mecánicas en el compresor. ○ Edificio ventilado. ○ Asegurar cambios de aire para evitar la acumulación de CO2, Monitores en el edificio del compresor. ○ Los procedimientos de carga y descarga se llevarán a cabo en áreas bien ventiladas, fuera de la luz solar directa y lejos de fuentes de calor e ignición (es decir, los camiones se apagarán durante las operaciones de carga y descarga).

Peligro	Escenario de Riesgo	Posibles Causas	Descripción	Impactos Potenciales	Probabilidad	Consecuencias				Valor	Estim. del Riesgo	Medidas de Control para minimizar el Riesgo
						Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Receptores			
	Ruptura violenta de contenedores cerrados durante el transporte y almacenamiento	Frente a la exposición a altas temperaturas (incendio), los contenedores cerrados pueden romperse violentamente	El calor del fuego puede generar presión en el cilindro y provocar su ruptura.	Pérdida de fauna, afectación a áreas aledañas y receptores sensibles de la zona. Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.	1	4	1	2	1	9		<ul style="list-style-type: none"> Los contenedores y unidades de almacenamiento contarán con válvulas de alivio de presión. El personal estará capacitado sobre los procedimientos a seguir durante un evento en el que se incendian camiones o contenedores de almacenamiento. Los camiones estarán equipados con un kit de emergencia para afrontar adecuadamente los incendios/rupturas violentas durante el transporte. El personal contará con capacitación para el transporte de mercaderías peligrosas. Los camiones se envían en pares para garantizar que se siga el plan de respuesta durante los accidentes y para mantener la comunicación con el equipo de transporte. Desarrollo y entrenamiento en procedimientos de respuesta ante emergencia.
Línea de Alta Tensión	Incendio y explosión de MeOH durante el transporte y almacenamiento	Esta línea de alto voltaje puede inducir corrientes en las vías del tren que pueden provocar una explosión ya que el metanol es inflamable.	En caso de inducción de corriente eléctrica provocado por la línea de alto voltaje puede provocarse una explosión por la presencia de metanol.	Sobrepresión, onda expansiva provocando heridos, daño en infraestructura, vagones y zonas aledañas, pérdida de flora y fauna y afectación a receptores sensibles de la zona. Percepción social negativa sobre la actividad de la empresa.	1	2	4	3	1	14	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> Los estándares de la Asociación Canadiense de Estándares (CSA) describen el requisito de espacio libre mínimo de 11,3 m por encima del riel para una línea de 500 KV. (MeOH). Zona de riesgo exterior referida a LAT contemplada en el Comité Técnico ISO TC 197 durante la preparación de la Norma ISO/TC 19880-1: distancia de 30 m respecto a áreas de manipulación, producción y almacenamiento de H2V propuestas por Italia Los valores proporcionados anteriormente para Italia se han derivado del Reglamento italiano del 2006-08-31: Norma técnica para el diseño, construcción y ejercicio de estaciones de servicio de hidrógeno.

Página intencionalmente en blanco
para impresión en doble faz.

Del análisis de riesgo ambiental efectuado y teniendo en cuenta los registros históricos mencionados anteriormente, se obtuvieron puntuaciones de 1 (muy poco probable) en cuanto a la probabilidad de ocurrencia de los escenarios accidentales evaluados.

Siguiendo con la metodología se aplicaron los criterios para la valoración de las consecuencias, obteniéndose puntuaciones en cuanto a la cantidad de sustancia almacenada de acuerdo con tablas de valoración de la norma: H2V: 2 (poca), almacenamiento = 8 t; MeOH: 4 (alta), almacenamiento = 4.000 t; CO₂: (muy alta), almacenamiento = 2.000 t.

En cuanto a la peligrosidad de los compuestos, se aplicaron los criterios para valoración de acuerdo con las fichas de datos de seguridad de cada una de las sustancias evaluadas, obteniéndose las siguientes puntuaciones: H2V: 3 (peligrosa), sustancia explosiva e inflamable; MeOH: 4 (muy peligrosa), sustancia inflamable y tóxica; CO₂: 1 (poco peligrosa), daños leves y reversibles ambientales.

Teniendo en cuenta la extensión de los escenarios accidentales, la valoración obtenida fue de 1 (puntual) en todos los casos, entendiendo que el impacto quedaría acotado al área afectada al proyecto. Se profundizará en este aspecto mediante la aplicación del modelo de solo consecuencias (modo físico) del software HyRAM+ y ALOHA (EPA) mediante el cual se determinaron las distancias de efecto daño a receptores sensibles referidas a escenarios accidentales de incendio y explosión.

Finalmente se consideraron los impactos en receptores sensibles, obteniéndose una puntuación de 1 (impacto bajo), teniendo en cuenta la ubicación geográfica de la población existente fuera del área del proyecto y las distancias de seguridad (zona de riesgo exterior) obtenidas mediante la aplicación del software mencionado anteriormente.

Siguiendo con la metodología se procedió a aplicar las fórmulas para el cálculo de la gravedad de las consecuencias obteniendo los siguientes valores:

Tabla 5-6 Cálculo de la gravedad de las consecuencias de los escenarios evaluados.

Actividades evaluadas	Valoración (gravedad consecuencias)
Manipulación, producción y almacenamiento de H2V	11
Manipulación, producción, almacenamiento y transporte de MeOH	14
Fugas durante el transporte de MeOH	16
Manipulación, producción, almacenamiento y transporte de CO ₂	9
Línea de Alta Tensión	14

Con las puntuaciones obtenidas se procedió a la aplicación de la fórmula para la estimación del riesgo (Riesgo = Probabilidad x Consecuencia) de los escenarios evaluados:

Tabla 5-7 Estimación de la magnitud del riesgo ambiental de los escenarios evaluados.

Escenario de riesgo evaluado	Valor asignado	Estimación de Riesgo
Fragilización / Fugas de H2V	3	Moderado
Incendio y Explosión de H2V	3	Moderado
Impacto vehicular (Fugas de H2V/Incendio y Explosión)	3	Moderado
Explosión e Incendio de MeOH	3	Moderado
Fugas de MeOH (instalaciones y áreas de almacenamiento)	3	Moderado
Fugas de MeOH (transporte)	4	Grave
Fugas de CO ₂ (instalaciones y áreas de almacenamiento)	2	Leve
Ruptura violenta de contenedores (transporte y almacenamiento de CO ₂)	2	Leve
Línea de Alta Tensión	3	Moderado

Finalmente se proponen medidas de control para minimizar la magnitud de los riesgos evaluados basados en el cumplimiento de estándares/normas internacionales y normativa nacional aplicable al proyecto. Este análisis se complementará mediante la aplicación del modelo de solo consecuencias (modo físico) del software HyRAM+ y ALOHA (EPA) mediante el cual se determinaron las distancias de efecto daño a receptores sensibles referidas a escenarios accidentales de incendio y explosión.

6. METODOLOGÍA MODELO (SOLO DE CONSECUENCIAS) PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DE LA OPERACIÓN Y TRANSPORTE DEL PROYECTO

6.1 RESUMEN DE LA METODOLOGÍA (SÓLO DE CONSECUENCIAS)

Las evaluaciones cuantitativas de riesgos (QRA, Quantitative Risk Assessment) son posibles cuando se dispone de datos medibles verificables y, a menudo, predefinidos para un escenario específico determinado. Tanto la probabilidad de ocurrencia como la consecuencia para un escenario dado deben definirse completamente con datos suficientes para hacer un QRA. En este se evalúan todos los escenarios para obtener la frecuencia de ocurrencia y el rango de posibles consecuencias para cada escenario para una métrica de riesgo, por ejemplo, pérdida potencial de vidas (PLL, Potential Loss of Life), riesgo individual promedio (AIR, Average Individual Risk), etc. Además de los datos de probabilidad, se requiere un diseño completo del sistema con especificaciones y mitigaciones.

Una evaluación de riesgos sólo de consecuencias proporciona un nivel intermedio entre las evaluaciones textuales de la evaluación cualitativa de riesgos y la evaluación numérica de la evaluación cuantitativa de riesgos, evaluando los mismos con una puntuación. La evaluación de riesgos sólo de consecuencias proporciona una forma estructurada de clasificar los riesgos según la probabilidad, gravedad o ambas (criticidad), y de clasificar las acciones de reducción de riesgos según su eficacia. Esto se consigue a través de un sistema de puntuación predefinido que permite mapear un riesgo percibido en una categoría, cuando existe una jerarquía lógica y explícita entre categorías.

Los casos sólo de consecuencias se diferencian de los casos de QRA en dos aspectos importantes. Primero, los casos QRA permiten incluir consideraciones sobre el sistema de diseño, las características de seguridad, y la frecuencia de emisión (de cada parte del sistema) en el cálculo de la distancia. Segundo, el enfoque de la QRA considera el espectro completo de posibles tamaños de descarga: el cálculo incluye las consecuencias de todos los tamaños de descarga posibles. Estas consecuencias se ponderan en función de la frecuencia de este tamaño de fuga.

En los enfoques sólo de consecuencia, no se tiene en cuenta el diseño del sistema; se elige el tamaño de la emisión (esto difiere del enfoque QRA donde se consideran todos los tamaños de descarga y se ponderan en función de la frecuencia de esas emisiones en base a los datos de fiabilidad del sistema) y se selecciona en función de los requisitos locales. En la mayoría de los países, especificándose como un tamaño seleccionado mucho más pequeño que la emisión más grande posible, o como un diámetro requerido (por ejemplo, 0,2 mm, 1 mm) o una fracción requerida del diámetro de la tubería (1 % o 10 % del diámetro exterior, el diámetro interior o el área de flujo de una tubería).

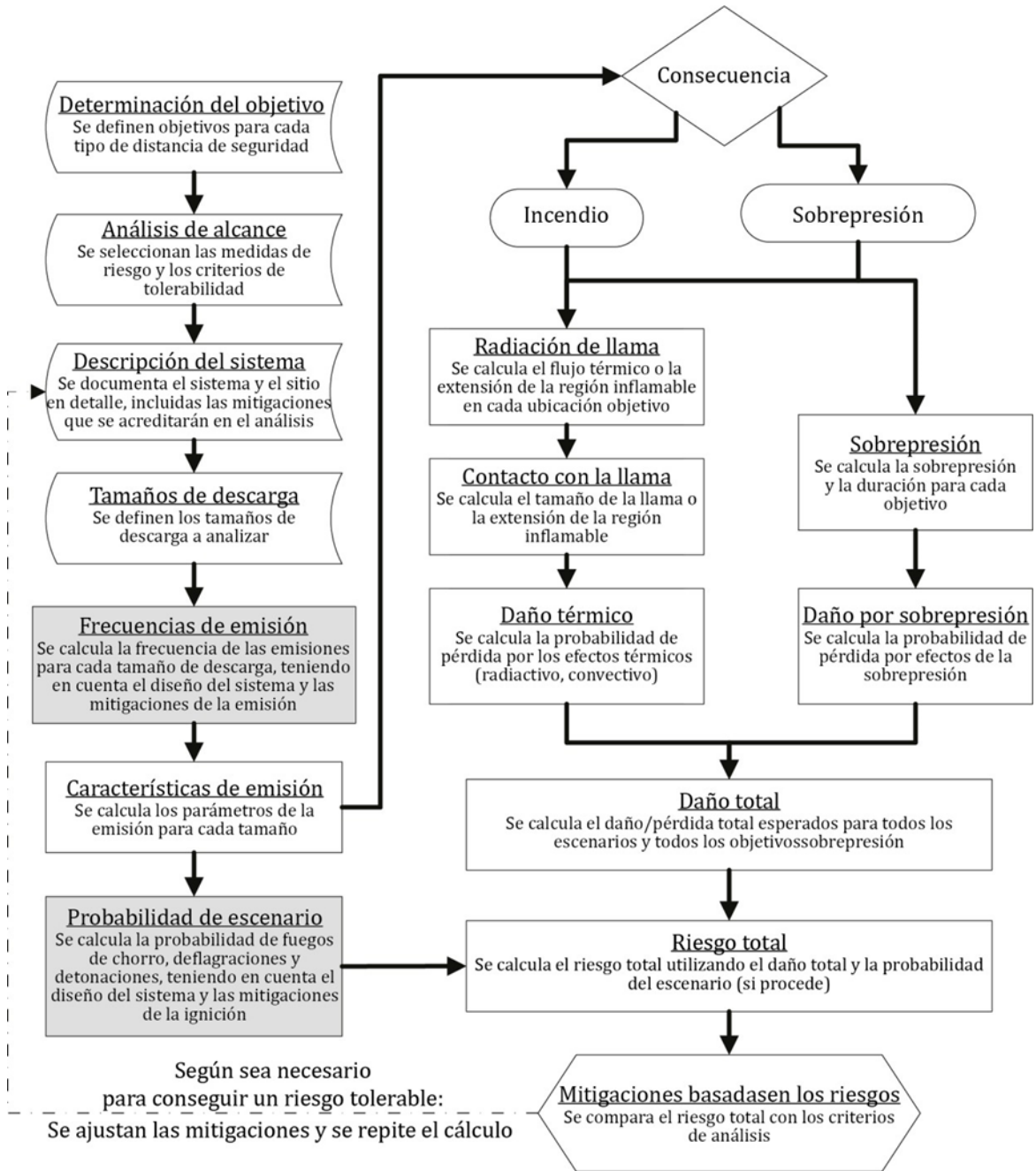


Figura 6-1 Enfoque basado en el riesgo para distancias de seguridad (Fuente: UNE-ISO 1880-1:2022).

6.2 CRITERIOS POR APLICAR CON RELACIÓN A LAS CONSECUENCIAS (UMBRALES DE DAÑO Y NO DAÑO)

Los límites de radiación térmica y de sobrepresión para personas y equipos utilizados en este estudio son los recomendados por el Comité API 521 KHK de 1.26 kW/m² (0,1% de fatalidad para personas - umbral de no daño), de la NFPA 2 en el cual el umbral de daño para personas correspondiente al 1% de fatalidad corresponde a contornos de radiación de 4,7 kW/m² y de la NFPA 2020 para contornos de sobrepresión con umbrales de no daño para personas de 5 kPa (0,1% de fatalidad).

Tabla 6-1 Criterios para asignación de umbrales de daño y no-daño para personas y equipos – Comité API 521 KHK, NFPA 2 y NFPA 2020.

Receptores	Flujo térmico (Incendios)		Efectos Sobrepresión (Explosiones)		Efectos Tóxicos (Nube MeOH)	
	Referencia	Contorno	Referencia	Contorno	Referencia	Contorno
Personas	Comité API 521 KHK	1,26 kW/m ² No-daño (0,1% de fatalidad)	NFPA 2020 (IEA TCP Task 43, Participante A, 2023)	5 kPa No-daño (0,1% de fatalidad)	ACGIH (STEL)	250 ppm
Edificios	NFPA 2020 (IEA TCP Task 43, Participante A, 2023)	25 kW/m ² Daño	NFPA 2020 (IEA TCP Task 43, Participante A, 2023)	14 kPa Daño (1%- 5% de fatalidad)	NA	NA
Equipamientos	NFPA 2020 (IEA TCP Task 43, Participante A, 2023)	40 kW/m ² Daño	NFPA 2020 (IEA TCP Task 43, Participante A, 2023)	20 kPa Daño (1%- 5% de fatalidad)	NA	NA

Tabla 6-2 Modelo Sólo de Consecuencias – Límites de radiación térmica para personas (no-daño, 0.1% fatalidad) – Comité API 521 KHK. (Fuente: UNE-ISO 1880-1:2022).

Característica	Caso 1A	Caso 1B	Caso 1C	Caso 1D	Caso 1E	Caso 1F
Método de cálculo	QRA	QRA	Solo de consecuencia	Solo de consecuencia	Solo de consecuencia	La región F no considera el escenario del caso 1.
Criterio de aceptación	$AIR < 2,0e^{-5}$	$AIR < 1,0e^{-5}$	1,26 kW/m ²	< 1,26 kW/m ²	<3,0 kW/m ²	
Diámetro del flujo máximo de la tubería (tanto el DI como el DI efectivo en base a la restricción del flujo)	10 mm (Di del módulo 0)	3 mm (caudal equivalente a una tubería de 3 mm)	N/A. No se considera el diseño del sistema en los enfoques solo de consecuencia			
Diámetro de descarga considerado	Todas las emisiones desde 0,1 mm- 10 mm	Todas las emisiones desde 0,03 mm- 3 mm	Mínimo (orificio de 10 mm)	1 mm	10% del área de flujo (3 mm)	
Temperatura interna	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	
Presión interna	250 bar (25 MPa)	250 bar (25 MPa)	250 bar (25 MPa)	312,5 bar (31,25 MPa)	250 bar (25 MPa)	
Temperatura externa	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	
Presión externa	1 atm (101,325 kPa)	1 atm (101,325 kPa)	1 atm (101,325 kPa)	1 atm (101,325 kPa)	1 atm (101,325 kPa)	
Configuración del sistema (fuentes de emisión)	0 compresores, 0 botellas, 23 válvulas, 3 instrumentos, 2 filtros, 0 bridas, 48 juntas (sin soldadura), 1 manguera, tuberías de 10 m	0 compresores, 0 botellas, 23 válvulas, 3 instrumentos, 2 filtros, 0 bridas, 48 juntas (sin soldadura), 1 manguera, tuberías de 10 m	N/A. No se considera el diseño del sistema en los enfoques solo de consecuencia			
Crédito para mitigaciones adicionales (por ejemplo, detección de gas o llamas) u otras	0	0	N/A. No se considera el diseño del sistema en los enfoques solo de consecuencia			

Característica	Caso 1A	Caso 1B	Caso 1C	Caso 1D	Caso 1E	Caso 1F
consideraciones documentadas (por ejemplo, dirección de la descarga)						
Número de personas expuestas	1	3	N/A. La población expuesta no se considera en los enfoques solo de consecuencia			
Horas de exposición de persona en 1 año	8.760	8.760	N/A. La población expuesta no se considera en los enfoques solo de consecuencia			
Ejemplo ilustrativo de distancia de seguridad calculada	11,5 m	1 m	40 m	4,0 m	8,5 m	No aplica

Tabla 6-3 IEA TCP Task 43 – substask Safety Distances: state of the art, Participante A, 2023.

Categoría/Participante	Participante A	Participante B	Participante C	Participante D	Participante E	Participante F	Participante G	Participante H 1
Caso de uso	HRS, Electrolizadores, Almacenamiento	Electrolizadores	Electrolizadores	HRS, Electrolizadores, Almacenamiento	Electrolizadores	HRS	HRS	Cualquier instalación de H ₂
País	Francia, Sudamérica, Sudáfrica	Global	Global	Suecia	Global	Países Bajos, Alemania, Francia, Reino Unido	Francia	EE. UU.
Regulación/ Estándar/ Código	ICPE 4715/1416 para proyectos franceses	No se encontraron estándares legales obligatorios para electrolizadores	BCGA GN 41 "Distancias de separación en la industria del gas"	MSBFS 2020:1 (respuestas basadas en la versión actualmente en revisión)	No existen estándares legales obligatorios para electrolizadores	PGS 35 APEA/BCGA/El Book Guidance - UK Blue	Se utilizan regulaciones y estándares nacionales para evaluar la probabilidad de falla	NFPA-2
Metodología de la compañía para distancias de seguridad	Basada en consecuencias en la etapa de factibilidad.	Basada en consecuencias en la etapa de factibilidad. Basada en el riesgo en la etapa de diseño detallado.	Seguir las distancias de separación de BCGA GN 41, a menos que la documentación sobre la separación	Seguir el enfoque MSBFS 2020:1, que es un enfoque basado en las	Basada en las consecuencias y el riesgo.	Seguir las distancias de seguridad en los estándares relevantes	El objetivo de la distancia de seguridad es prevenir cualquier	Basada en las consecuencias utilizando un tamaño de

Categoría/Participante	Participante A	Participante B	Participante C	Participante D	Participante E	Participante F	Participante G	Participante H 1
	Basada en el riesgo en la etapa de diseño detallado.		tenga un requisito específico. En tal caso, se aplican distancias basadas en las consecuencias.	consecuencias con tablas precalculadas			consecuencia en el objetivo (seres humanos). La evaluación se basa en riesgos, se tienen en cuenta las consecuencias y las probabilidades.	fuga informado por el riesgo.
Escenarios de fuga	Factibilidad: diámetro completo (distancia de seguridad externa). 10% de fuga del diámetro de la tubería (distancia) Diseño detallado: mismo enfoque, pero con más refinamientos	50mm de fuga para análisis de consecuencias Pequeñas/Medianas/Grandes. Fuga R para análisis basado en riesgos	Distancias de seguridad prescritas de BCGA GN 41 seguidas. Los requisitos de FB, para liberaciones específicas, son impuestos por las características de liberación/operación.	3% de fuga - daños. 10% de fuga - una sola fatalidad. 100% de fuga - múltiples fatalidades. El tamaño puede ser reducido con aislamiento automático.	Pequeña fuga (% del diámetro de la tubería dependiendo de RCS específico del país) / fugas medianas/ grandes para análisis basado en riesgos	Distancias basadas en fugas del 10% de diámetros de tubería típicos en HRS para PGS 35. Desconocido para Alemania y Reino Unido.	Ruptura de diámetro completo y 10% de fuga del diámetro, agresión térmica en el almacenamiento	Múltiples tamaños de fuga (desde 0.01% -100% del área de flujo) para el análisis informado por el riesgo, pero luego las distancias de retroceso utilizan un tamaño de fuga fraccional constante del 39% (ahora 19%) para hidrógeno gaseoso y 5% para hidrógeno líquido
Criterios de Daño	Umbral de las regulaciones francesas. Específico de la empresa basado en NFPA 2020 (en ausencia de regulación).	Personas: 5 kW/m ² y 140 mbar (14 kPa). Edificios: 70-140 mbar (7-14 kPa) Equipamiento: 37,5 kW/m ² y 200 mbar (20 kPa) Basado en el riesgo: 10 ⁻⁶ /yr o 10 ⁻⁵ /yr LSIR dentro de la valla	Para un enfoque basado en consecuencias: Personas: 70 mbar (7 kPa) y efectos térmicos de la Tabla 3 del documento EIGA 211/1.	Personas: 309 °C / 10 kW/m ² / 5 kPa/ 8% H ₂ para una sola persona, 115 °C / 2,5 kW/m ² / 5 kPa/ 8% H ₂ para multitudes.	Regulaciones francesas: Radiación térmica: 3 kW/m ² , 5 kW/m ² , 8 kW/m ² .	Basado en PGS 35: Personas: 3 kW/m ² (público), 10 kW/m ² (1% letalidad)	Regulaciones francesas: Radiación térmica: 3 kW/m ² , 5 kW/m ² , 8 kW/m ² . Sobrepresión: 50 mbarg (5kPa)	Flujo de calor: 4.732 kW/m ² exposición de empleados durante 3 minutos, para LH ₂ , 4.732 kW/m ² para

Categoría/Participante	Participante A	Participante B	Participante C	Participante D	Participante E	Participante F	Participante G	Participante H 1
	<p>Personas: 4.7 kW/m² y 50 mbar (5 kPa).</p> <p>Edificios: 25 kW/m² y 140 mbar (14 kPa)</p> <p>Equipamiento: 25-40 kW/m² y 200 mbar (20 kPa)</p>	Riesgo social: PLL, curva FN en una ubicación específica	Equipamiento: 35 kW/m ² .	<p>Edificios: Impacto de llama/ 5 kPa y 8% H₂ en la toma de aire.</p> <p>Equipamiento: 10 o 30 kW/m² para tanques dependiendo de material, tamaño y presión.</p> <p>Región altamente obstruida: 30% H</p>	<p>Sobrepresión: 20 mbarg (2kPa), 50 mbarg (5kPa), 140 mbarg (14kPa), 200 mbarg (20kPa),</p>	<p>Edificios: 10-35 kW/m²</p> <p>Equipamiento: 10-35 kW/m².</p>	para efectos no reversibles, 140 mbarg (14kPa) y 200 mbarg (20kPa) para 1% a 5% de letalidad.	<p>GH₂ para automóviles y personas expuestas, que no dan servicio al sistema y edificios de combustibles. 20 kW/m² para edificios no combustibles y otros materiales peligrosos.</p> <p>Sobrepresión: (solo considerado para LH2): 7kPa (1 psi), 13,7 kPa (2 psi), 17 kPa (3 psi).</p>

Página intencionalmente en blanco
para impresión en doble faz.

7. CÁLCULO DE DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO MODELO (SOLO DE CONSECUENCIAS)

7.1 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO POR EXPLOSIÓN RETARDADA (JET VCE) Y RADIACIÓN POR FUEGO DE CHORRO (JET FIRE) - HIDRÓGENO

Al momento de la realización de este estudio, el proyecto se encuentra en una fase preliminar en la cual no se dispone de datos cuantitativos precisos, tecnología ni planos del proyecto de detalle que permitan realizar un proceso de QRA en su totalidad, por lo cual se propone la utilización de una metodología semi-cuantitativa de riesgo (modelo de sólo consecuencias) para el cálculo de distancias de efecto daño mediante el software HyRAM+, versión 5.0, recomendado por la norma UNE-ISO 19880-1:2022.

Los principales escenarios modelados, acorde a los estudios realizados por Sandia National Laboratories (SNL), se desarrollan a partir de la liberación y posterior ignición del hidrógeno, resultando en riesgos por exposición a efectos térmicos por fuego de chorro y sobrepresiones por explosión retardada (Jet VCE).

7.2 HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA SIMULACIÓN - SOFTWARE HYRAM+

El análisis se realizó utilizando el software HyRAM+, desarrollado por Sandia National Laboratories (SNL) para la Oficina de Tecnologías de Pilas de Combustible (FCTO) del Departamento de Energía de EE.UU. (DOE).

HyRAM+ permite predecir los efectos físicos asociados a escenarios incidentales y las consecuencias que dichos incidentes podrían generar tanto sobre personas como sobre estructuras, mediante el uso de diversos modelos de daño (Groth et al., 2016).

7.3 MODELADO DE EFECTOS TÉRMICOS POR FUEGO DE CHORRO Y EXPLOSIÓN RETARDADA (JET VCE)

7.3.1 Ecuación de estado

HyRAM+ utiliza la biblioteca CoolProp (Bell et. al, 2014, llamada a través de su interfaz Python para realizar varios cálculos termodinámicos.

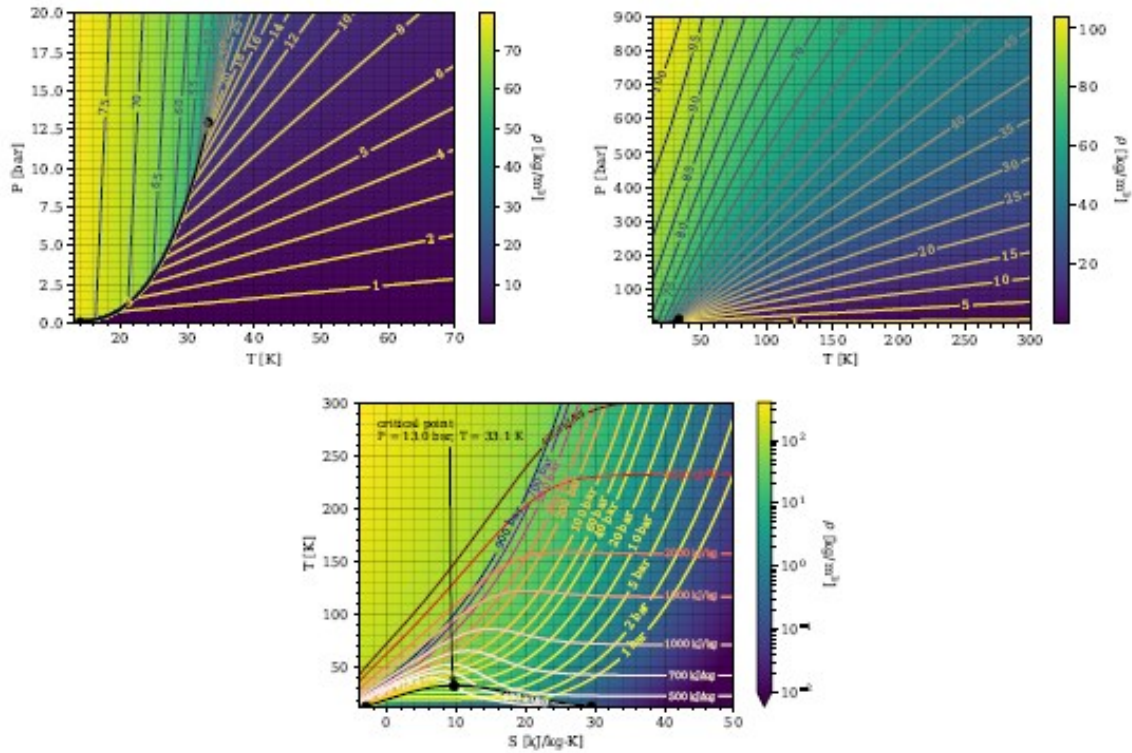


Figura 7-1 Representaciones gráficas de los puntos de estado, calculadas utilizando CoolProp [33] que utiliza la ecuación de estado de Leachman et al. [34] para el hidrógeno. Los gráficos superiores muestran el sombreado y los isocontornos de la densidad como una función de la temperatura y la presión. El gráfico inferior muestra el sombreado de la densidad como una función de la entropía y la temperatura, con isocontornos de presión y entalpía. La línea negra gruesa muestra el límite líquido/bifásico/vapor, y los puntos negros marcan el punto triple y los puntos críticos (Fuente: HyRAM+ Versión 5.0).

7.3.2 Combustión

Los cálculos de llama de HyRAM+ se basan en el trabajo de Ekoto et al. (2014) y dependen de varias propiedades subyacentes del combustible quemado, a saber, la fracción de mezcla estequiométrica, f_s , el calor de combustión, ΔH_c , junto con la temperatura, el peso molecular y la densidad de los productos de combustión para una fracción de mezcla dada.

7.3.3 Liberaciones no incendiadas

Para un chorro o columna, HyRAM+ sigue el modelo unidimensional descrito por Houf y Winters (2013):

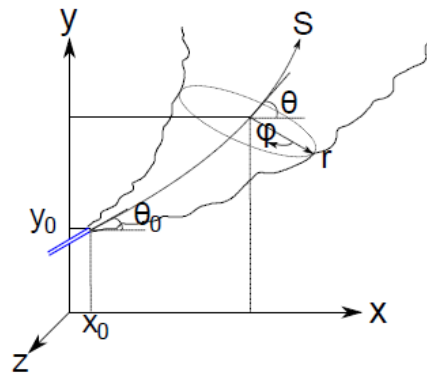


Figura 7-2 Modelo de coordenadas de pluma de hidrógeno. (Fuente: HyRAM+ Versión 5.0).

7.3.4 Liberaciones por ignición

Como observaron Houf y Schefer (2007), una longitud de llama adimensional, definida como:

$$L^* = \frac{L_{vis} f_s}{d_j \sqrt{\rho_j / \rho_{amb}}} \quad (1)$$

colapsa en una única curva para una variedad de combustibles (hidrógeno, metano y propano), donde L_{vis} es la longitud de llama visible (desde el orificio, incluida cualquier distancia de despegue), f_s es la fracción de masa de combustible en una mezcla estequiométrica de combustible y aire, y d_j , ρ_j y ρ_{amb} son el diámetro del orificio, la densidad del combustible en el orificio y la densidad del aire, respectivamente. Se supone que esta curva también será válida para las mezclas.

7.3.5 Radiación de una llama curva

El flujo de calor radiativo de la llama curva corregida por flotabilidad se calcula mediante un modelo multifuente ponderado, similar al descrito por Hankinson y Lowesmith (2012). El flujo de calor en un punto a lo largo de la llama se calcula como:

$$q = \tau S_{rad} \frac{V_F}{A_f} \quad (2)$$

7.3.6 Sobrepresión no confinada

BST El modelo Baker-Strehlow-Tang (BST) se basa en curvas de explosión que relacionan la sobrepresión y el impulso con la velocidad de llama de Mach (John Wiley & Sons Ltd., 2010).

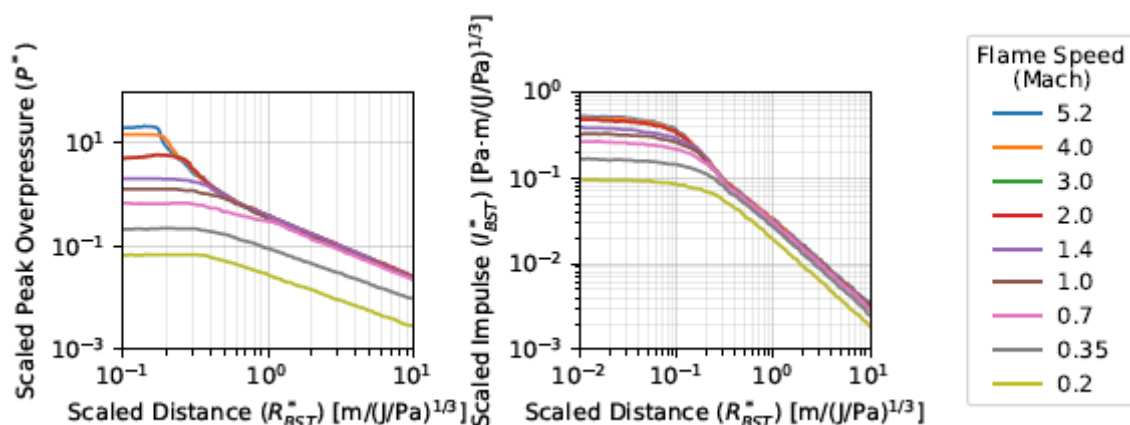


Figura 7-3 Mapeo de la distancia escalada a la sobrepresión escalada (izquierda) y al impulso escalado (derecha) para el modelo BST de sobrepresión no confinada [3] (Fuente: HyRAM+ Versión 5.0).

7.4 DISTANCIAS DE EFECTO DAÑO POR NUBE TÓXICA, POOL FIRE (PISCINA DE FUEGO) Y BOLA DE FUEGO (BLEVE) –MEOH

Para el cálculo de distancias de efecto daño se utiliza una metodología semi-cuantitativa de riesgo (modelo de sólo consecuencias) mediante el software ALOHA, versión 5.2.2, recomendado por la United States Environmental Protection Agency (EPA).

Los principales escenarios modelados, acorde a los estudios realizados por el Methanol Institute (EEUU), refieren a Pool Fire, bola de fuego (BLEVE) y nube tóxica.

7.5 HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA SIMULACIÓN – SOFTWARE ALOHA

ALOHA es el programa de software de modelado de riesgos para el paquete de software CAMEO, que se utiliza ampliamente para planificar y responder a emergencias de materiales químicos o peligrosos, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

Los detalles sobre una liberación real o potencial de materiales químicos o peligrosos se pueden ingresar en ALOHA y se generarán estimaciones de zonas de amenaza para varios tipos de peligros. ALOHA puede modelar nubes de gas tóxico, nubes de gas inflamable, BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions), incendios de chorros, incendios de charcos y explosiones de nubes de vapor. Las estimaciones de zonas de amenaza se muestran en una cuadrícula en ALOHA y también se pueden representar en mapas en MARPLOT, ArcMap de Esri, Google Earth y Google Maps. La zona de amenaza roja representa el peor nivel de peligro; las zonas de amenaza naranja y amarilla representan áreas de peligros decrecientes.

7.6 MODELADO DE EFECTOS TÉRMICOS POR POOL FIRE Y BOLA DE FUEGO (BLEVE) Y POR EFECTOS DE NUBE TÓXICA

7.6.1 Modelos para el cálculo de los efectos de las explosiones de nubes de vapor

El modelo Baker-Strehlow-Tang (BST) es la base para el cálculo de sobrepresión (Pierorazio et. al, 2005). ALOHA utiliza curvas de explosión adimensionales derivadas empíricamente para predecir la sobrepresión.

Tabla 7-1 Velocidades de llama para el modelo BST. (Fuente: ALOHA Versión 5.2.2).

	Baja congestión	Media congestión	Alta congestión
Alta reactividad	0.36	DDT	DDT
Media reactividad	0.11	0.44	0.5
Baja reactividad	26	0.23	0.34

Además,

$$\frac{\Delta P}{P_{atm}} = A \cdot B^{1/x} x^C,$$

donde ΔP es la sobrepresión máxima y A, B, C, D y X_0 son constantes. La tabla siguiente da valores de estas constantes para varios números de Mach de llama.

Tabla 7-2 Curvas de constantes para velocidades de llama para el modelo BST. (Fuente: ALOHA Versión 5.2.2).

	Mach 0.2	Mach 0.35	Mach 0.7	Mach 5.2
A	335	1.041	3.764	2.932
B	8.359	8.642	7.439	1.399
C	-11.192	-10.568	-12.728	-11.591
D	65	0.22	0.65	20
X_0	0.35	0.32	0.3	0.16

7.6.2 Modelos de radiación térmica y área inflamable

El modelo BLEVE-Fireball de ALOHA es un modelo de llama sólida basado en estudios de bolas de fuego resultantes de BLEVE (explosiones de vapor en expansión de líquido en ebullición) que involucran gases inflamables licuados bajo presión y almacenados a temperatura ambiente, como el GLP (AIChE, Instituto Americano de Ingenieros Químicos 1994).

AIChE afirma que 350 kW/m² es un flujo de energía emisiva razonable para bolas de fuego grandes que involucran combustibles de hidrocarburos (Instituto Americano de Ingenieros Químicos 1994). ALOHA aplica esto a una gama más amplia de sustancias químicas y tamaños, pero ajusta este valor multiplicándolo por la relación del calor de combustión de la sustancia química dividido por el calor de combustión del propano, y lo describe como:

$$E = 350,000 \left(\frac{\Delta h_c}{\Delta h_{c,propano}} \right), \quad (3)$$

Donde:

Δh_c es el calor de combustión del producto químico (J kg⁻¹), y

$\Delta h_{c,propano}$ es el calor de combustión del propano (J kg⁻¹).

7.6.3 Incendios por chorro

El modelo de incendio por chorro de ALOHA se puede aplicar a una liberación por chorro vertical ascendente: una tubería orientada verticalmente o un orificio en la parte superior de un tanque. El método de ALOHA se basa en un modelo empírico de llama sólida desarrollado por Shell

Research (Chamberlain, G. A. 1987). Según Cook et al (Cook, Bahrami y Whitehouse 1990), la potencia de emisión de la llama, E, se calcula como:

$$E = \frac{f_{rad}Q\Delta h_c}{A} \quad (4)$$

Donde:

Q es la tasa de descarga de masa (kg s⁻¹).

Δh_c es el calor de combustión (J kg⁻¹).

A es el área superficial de la llama (m²).

7.6.4 Incendios en piscina de fuego

La potencia emisiva promedio por unidad de área, E, de la superficie del cilindro se calcula utilizando el método de Moorhouse y Pritchard (1982):

$$E = \frac{f_{rad}\Delta h_c m}{\left(1+4\frac{h}{d}\right)}, \quad (5)$$

Donde:

h es la longitud de la llama (m).

d es el diámetro del charco (m).

Δh_c es el calor de combustión (J kg⁻¹).

m es la tasa de combustión de masa por unidad de área (kg m⁻² s⁻¹).

f_{rad} es la fracción de energía liberada como radiación térmica.

7.7 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE DAÑO Y NO DAÑO CON RELACIÓN A LAS CONSECUENCIAS

El análisis adopta los límites de radiación térmica y de sobrepresión para personas y equipos recomendados por el Comité API 521 KHK de 1.26 kW/m² (0,1% de fatalidad para personas - umbral de no daño), de la NFPA 2 en el cual el umbral de daño para personas correspondiente al 1% de fatalidad corresponde a contornos de radiación de 4,7 kW/m² y de la NFPA 2020 para contornos de sobrepresión con umbrales de no daño para personas de 5 kPa (0,1% de fatalidad). En el capítulo 6.1. de este informe se brinda información detallada en relación con estos criterios.

7.8 DEFINICIÓN DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD APLICABLES AL PROYECTO

Se presentan a continuación la distinción entre las distancias de seguridad aplicables al proyecto:

Zona de Riesgo Exterior: es la distancia (o área) fuera del área del proyecto que se tiene que proteger de los peligros provocados por el proyecto. Aquí el área del proyecto es la fuente de peligro, mientras que las personas y construcciones fuera del sitio se consideran el o los objetivos.

Distancia de Separación: es la distancia mínima entre los equipos y los objetivos vulnerables dentro de los límites del sitio del proyecto. Aquí, la planta de hidrógeno/metanol se considera la fuente, mientras que las personas/objetos circundantes se consideran los objetivos. Ejemplos

de objetivos que se pueden estar expuestos incluyen el personal de planta, proveedores, personal de mantenimiento externo.

Tabla 7-3 Ejemplos de distancias de seguridad – zona de riesgo exterior (UNE-ISO 19880-1:2022)

Caracterización de la distancia de seguridad	Propósito	Fuente	Objetivo(s)
Distancias de restricción	Minimizar el riesgo en zonas adyacentes a los equipos de hidrógeno	Equipos de la estación de servicio	Cualquier zona abierta adyacente al equipo de hidrógeno
Distancia de separación	Proteger personas y objetos en la estación de servicio de peligros asociados a la estación de servicio	Equipos y objetos dentro de la estación de servicio	Personas y otras instalaciones dentro de la estación de servicio
Distancia de distribución de la instalación	Evitar la escalada de eventos en la estación de servicio	Equipos de la estación de servicio	Equipos de la estación de servicio
Distancia de protección	Proteger la estación de servicios frente a daños debidos a cualquier peligro externo	Instalaciones fuera del sitio y elementos del sitio (excepto los equipos de la estación de servicio)	Equipos de la estación de servicio
Zona de riesgo exterior	Mitigar los riesgos fuera del sitio frente a los peligros asociados con la estación de servicio	Equipos de la estación de servicio	Personas/propiedades circundantes fuera de la estación de servicio

Tabla 7-4 Objetivos de ejemplos para cada tipo de distancias de seguridad – zona de riesgo exterior (UNE-ISO 19880-1:2022)

Distancia de seguridad	Ejemplo de objetivos ^a
Distancia de separación	Personas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Trabajadores en la estación de servicio (1ª parte). ○ Usuarios de la estación de servicio (2ª parte). ○ Público y usuarios de otras instalaciones dentro de la estación de servicio (3ª parte). Otras instalaciones dentro de la estación de servicio: <ul style="list-style-type: none"> ○ Edificios como tiendas y túneles de lavado. ○ Almacenamiento de gasolina. ○ Instalaciones de distribución de gasolina. ○ Zonas de suministro de combustible. ○ Aperturas de edificios y tomas de aire.
Distancia de distribución de la instalación Y Distancia de protección	Equipos de la estación de servicio: <ul style="list-style-type: none"> ○ Surtidor. ○ Compresor. ○ Almacenamiento de hidrógeno líquido. ○ Almacenamiento de hidrógeno gaseoso. ○ Salidas de torres de ventilación.
Zona de riesgo exterior	Personas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Público (3ª parte). ○ Zonas públicas de reunión. Propiedades: <ul style="list-style-type: none"> ○ Líneas de lote. ○ Parkings. ○ Casas. ○ Edificios públicos como colegios, hospitales. ○ Líneas de alto voltaje.

^a La información de esta tabla se proporciona para simplificar la selección del objetivo. No se requiere establecer distancias de seguridad para ninguno de los objetivos de la tabla. Asimismo se permite establecer distancias de seguridad para objetivos no enumerados en esta tabla.

7.9 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SÓLO CONSECUENCIAS

Esta sección refiere a los resultados del cálculo de distancias de efecto daño para los escenarios accidentales referidos a:

- Hidrógeno - Fuga de gas por caño 3” en línea entre salida compresor y entrada almacenamiento (100 bar, 40°C).
- MeOH - Fuga tóxica por caño 3” en envallado tanque almacenamiento 2.500 m³, diámetro envallado 50 m.
- MeOH - Fuego Piscina por fuga caño 3” en envallado tanque almacenamiento, diámetro envallado 50 m, piscina 2.500 m³ (18,1°C).

- MeOH - BLEVE por tanque almacenamiento, diámetro tanque 12 m, 2500 m³ (1,013 bar, 18,1°C).

7.9.1 Distancia de seguridad - Zona de Riesgo Exterior

En Base a Distancia de seguridad ISO 19880-1-2022: Caso 1C y IEA TCP Task 43, Participante A. 2023. Fuga por ruptura total, área de flujo 100% diámetro cañería.

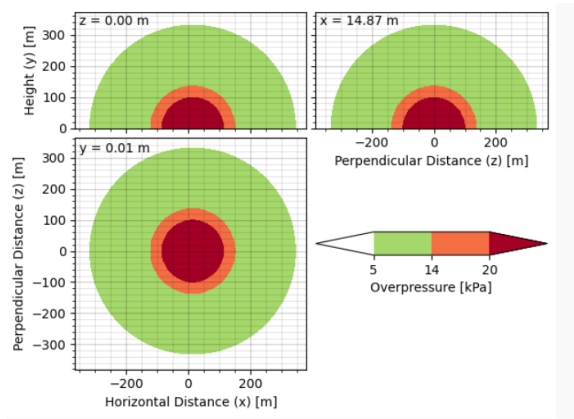
7.9.2 Criterios de aceptación de no daño

- Personas 1,26 kW/m² radiación térmica, 5 kPa sobrepresión.
- Edificios 25 kW/m² radiación térmica, 14 kPa sobrepresión.
- Equipamiento 40 kW/m² radiación térmica, 20 kPa sobrepresión.
- Personas 250 ppm toxicidad MeOH.

7.9.3 Condiciones atmosféricas usados en ALOAH:

- Viento: 4 m/s ESE a 3m arriba nivel terreno.
- Rugosidad del terreno: campo abierto.
- Cobertura nubes: 50%.
- Clase Estabilidad: D.
- Temperatura aire: 18.1°C.
- Sin altura de inversión.
- Humedad Relativa: 50%.

HyRAM+



ALOHA

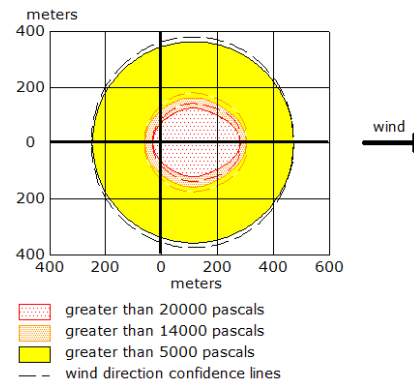


Figura 7-4 Distancias de efecto daño para personas y equipos - efectos de sobrepresión por explosión retardada H2V (Análisis de sólo consecuencias - HyRAM+ Versión 5.0 – ALOHA Versión 5.2.2).

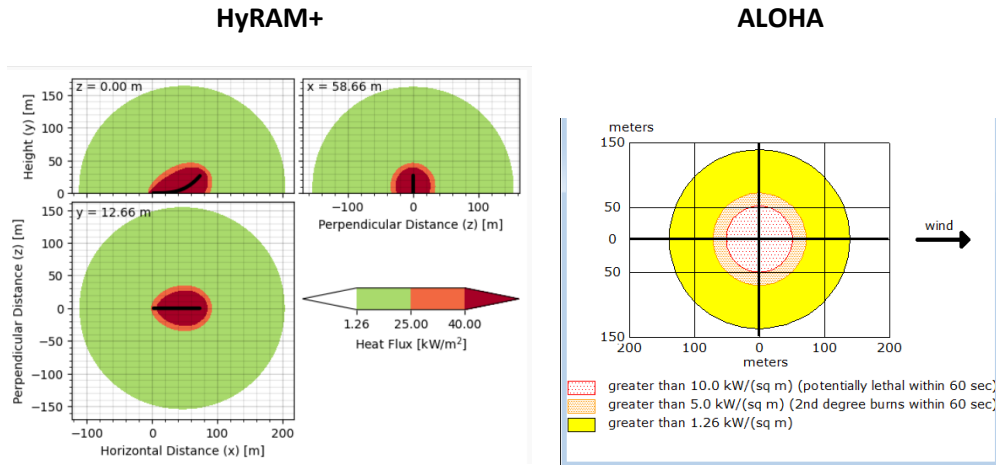


Figura 7-5 Distancias de efecto daño para personas y equipos - efectos térmicos – Jet Fire de H2V (Análisis de sólo consecuencias - HyRAM+ Versión 5.0 – ALOHA Versión 5.2.2).

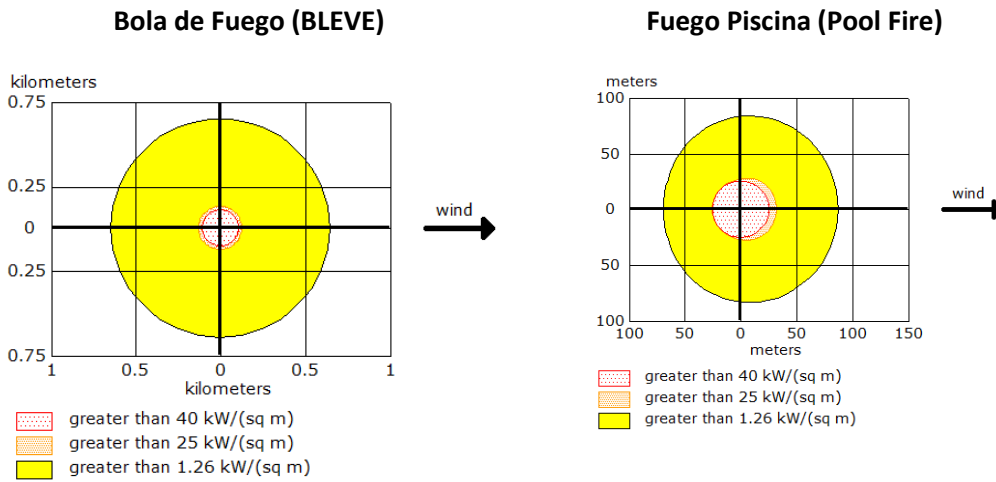


Figura 7-6 Distancias de efecto daño para personas y equipos - efectos térmicos – Bola de Fuego (BLEVE) y Fuego de Piscina (Pool Fire) MeOH (Análisis de sólo consecuencias - ALOHA Versión 5.2.2).

Nube Tóxica

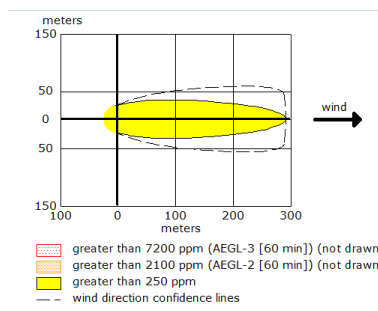


Figura 7-7 Distancias de efecto daño para personas - efectos por Nube Tóxica de MeOH (Análisis de sólo consecuencias - ALOHA Versión 5.2.2).

Tabla 7-5 Resultados del cálculo de Distancias de efecto daño para personas, infraestructura y equipamiento- (Análisis de sólo consecuencias - HyRAM+ Versión 5.0 - ALOHA Versión 5.2.2).

Sustancia	Escenario	HyRAM+	ALOHA (EPA)
Hidrógeno (gas)	Explosión Retardada Chorro de gas, ignición por deflagración (llama de fuego Mach 0,35)	110 m Personas 50 m Edificios 40 m Equipamiento	270 m Personas 250 m Edificios 240 m Equipamiento
	Explosión Retardada Chorro de gas, ignición por detonación (llama de fuego Mach 5,2)	350 m Personas 150 m Edificios 110 m Equipamiento	500 m Personas 300 m Edificios 280 m Equipamiento
	Chorro de fuego (Jet Fire), ignición instantánea	200 m Personas 90 m Edificios 80 m Equipamiento	60 m Personas 15 m Edificios 10 m Equipamiento
MeOH	Nube Tóxica	-	300 m
	Fuego Piscina (Pool Fire)	-	90 m Personas 30 m Edificios 25 m Equipamiento
	Bola de Fuego (BLEVE)	-	650 m Personas 130m Edificios 110m Equipamiento



Figura 7-8 Histograma con centro en la ubicación propuesta proyecto con mayores distancias de efecto daño personas de 650m (rojo – incendio BLEVE de MeOH), daño edificios 300m (naranja – explosión de H2V) y daño equipamiento 280m (amarillo – explosión de H2V).

Del análisis de sólo consecuencias realizado se concluye que las mayores distancias de efecto daño corresponden a efectos térmicos por Bola de Fuego (BLEVE) de MeOH en el área del proyecto con radios de alcance de 650 m para personas y a efectos de sobrepresión por

explosión retardada de H₂V de 300m para edificios y de 280 m para equipamientos correspondiente.

Para el cálculo de estas distancias se consideraron los umbrales de no daño para personas recomendados por el Comité API 521 KHK de 1.26 kW/m² (0,1% de fatalidad para personas - umbral de no daño), y de la NFPA 2020 para contornos de sobrepresión con umbrales de daño para edificios 14 kPa (1%- 5% de fatalidad) y de daño para equipamientos de 20 kPa (1%- 5% de fatalidad).

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis cualitativo de riesgos presentado, los posibles peligros derivados de las actividades de manipulación, producción y almacenamiento de hidrógeno se relacionan fundamentalmente con accidentes generados por fugas, incendio y explosión y en el caso de actividades vinculadas a la producción, almacenamiento y transporte de MeOH a explosión e incendio e intoxicación por fugas de esta sustancia. Teniendo en cuenta estos peligros, la evaluación del riesgo ambiental efectuado y el posible daño que los mismos generarían sobre la infraestructura, vida humana y el medio ambiente, se concluye que existe un riesgo moderado en cuanto a la probabilidad de ocurrencia de escenarios accidentales relativos a fugas, incendio y explosión de H₂V y MeOH y riesgo grave en el caso que estos escenarios ocurrieran durante el transporte de MeOH, por lo cual se proponen medidas de control para minimizar la magnitud de los riesgos evaluados basados en el cumplimiento de estándares/normas internacionales y normativa nacional aplicable al proyecto.

Teniendo en cuenta la fase en que se encuentra el proyecto y en ausencia de definiciones referidos a la ingeniería de detalle que permitan realizar un análisis de riesgo cuantitativo (QRA), se determinó en base a las medidas de seguridad previstas por el proyecto, las condiciones de operación y los resultados de la evaluación de riesgo ambiental, la realización de un análisis de sólo consecuencias (mediante la utilización del software HyRAM+ y ALOHA-EPA) para la determinación de distancias de efecto daño para personas, edificios y equipos en escenarios accidentales asociados a liberaciones de H₂V y MeOH (incendio, explosión, nube tóxica). Del mismo se concluye que las mayores distancias de efecto daño corresponden a efectos térmicos por Bola de Fuego (BLEVE) de MeOH en el área del proyecto con radios de alcance de 650 m para personas y a efectos de sobrepresión por explosión retardada de H₂V de 300m para edificios y de 280 m para equipamientos correspondiente. Para el cálculo de estas distancias se consideraron los umbrales de no daño para personas recomendados por el Comité API 521 KHK de 1.26 kW/m² (0,1% de fatalidad para personas - umbral de no daño), y de la NFPA 2020 para contornos de sobrepresión con umbrales de daño para edificios 14 kPa (1%- 5% de fatalidad) y de daño para equipamientos de 20 kPa (1%- 5% de fatalidad).

A instancias de avances en la ingeniería de detalle del proyecto que permitan determinar escenarios accidentales mediante la metodología HAZOP y la realización de un análisis cuantitativo de riesgo (QRA) junto con la tramitación de las habilitaciones ante la Dirección Nacional de Bomberos (DNB), quedarán definidas las distancias de riesgo exterior finales para el proyecto, que serán siempre menores a las calculadas en la presente evaluación, donde se obtuvieron distancias con nivel de riesgo aceptable respecto a personas, equipos y medioambiente dentro de la zona de proyecto.

Con los nuevos estudios a realizar citados anteriormente, y eventualmente en el proceso de intercambio técnico con la DNB, en etapas de posteriores se podrán implementar medidas adicionales (como paredes corta fuegos/explosiones) para alcanzar los niveles de seguridad previstos por la norma internacional NFPA para este tipo de proyectos, y se podrán obtener distancias de riesgo aún menores a las calculadas, acotando aún más el efecto esperado en situaciones de contingencias.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Process safety management of highly hazardous materials. Code of Federal Regulations (CFR) Title 29 Section 1910.119.

G. Hankinson and B. J. Lowesmith. (March 2012). "A consideration of methods of determining the radiative characteristics of jet fires," *Combustion and Flame*, vol. 159, pp. 1165–1177.

W. Ekoto, A. J. Ruggles, L. W. Creitz y J. X. Li. (December 2014). Updated jet flame radiation modeling with buoyancy corrections. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (35): 20570–20577.

International Standard Organization. (2015). ISO 15.916, Basic considerations for the Safety of Hydrogen Systems.

NFPA Standars. (2023). NFPA2, Hydrogen technology code.

GIZ y Fitchner. (2020). Descarbonilación del sector energético chileno Hidrógeno-Cadena de Valor y legislación internacional.

GIZ y Centro UC Energía. (2020). Proposición de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno para Chile.

Methanol Institute. (2008). Methanol Safe Handling Manual: 5th Edition.

M. Spada, P. Burgherr, P. Rouelle. (2018). Comparative risk assessment with focus on hydrogen and selected fuel cells: Application to Europe. s.l.: ELSEVIER.

Normalización Española - International Standard Organization. (2022). UNE - ISO 19880-1, Hidrógeno gaseoso – Estaciones de Servicio, Parte 1: Requisitos generales.

B. D. Ehrhart and E. S. Hecht. (November 2022). "Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 4.1 Technical Reference Manual," Tech. Rep. SAND2022-16425, Sandia National Laboratories.

United States Environmental Protection Agency (Sept 2016). Assessment Models (ALOHA Air Modeling) Version 5.4.7

Ian H. Bell, Jorrit Wronski, Sylvain Quoilin y Vincent Lemort. (Febrero 2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6):2498–2508.

W.G. Houf and W.S. Winters. (June 2013). Simulation of high-pressure liquid hydrogen releases. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(19):8092–8099.

William Houf and Robert Schefer. (January 2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(1):136–151.

Geoffrey Hankinson y Barbara Joan Lowesmith. (March 2012). A examination of methods of determining the radiative features of jet fires. *Combustion and Flame*, 159(3): 1165–1177.

John Wiley & Sons Ltd. (2010). Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE, and Flash Fire Hazards.

Pierorazio, A. J., J. K. Thomas, Q. A. Baker y D. E. Ketchum. (2005). "An update to the Baker-Strehlow-Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table". *Process Safety Progress* no. 24 (1):59-65.

Chamberlain, G. A. (1987). "Developments in Design Methods for Predicting Thermal-Radiation from Flares". *Chemical Engineering Research & Design* no. 65 (4):299-309.

Moorhouse, J., and M. Pritchard. (1982). "Thermal radiation hazards from large pool fires and fireballs." In Industrial Chemical Engineering Symposium Series. Mudan, K. S. 1984. "Thermal-Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires." Progress in Energy and Combustion Science no. 10 (1):59-80.

Página intencionalmente en blanco
para impresión en doble faz.