



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**“Condiciones de seguridad para uso de hidrógeno (on board)
en vehículos de operación minera subterránea”**

Trabajo de Titulación para optar al Título
De Ingeniero en PREVENCIÓN DE RIESGOS
LABORALES Y AMBIENTALES.

Alumno:

Sr. Cristóbal Zamorano Cisterna.

Profesor Guía:

Sr. Rodrigo Domínguez Carmona.

2023

Resumen

Hidrógeno – Combustible – Minería subterránea – IF&E Dow Chemical – Condiciones de seguridad – Riesgos inherentes.

El presente trabajo de título hizo el análisis de la evaluación de los riesgos de explosión, inflamabilidad y reactividad consecuencia la materialización de incidentes correspondientes al peligro que conlleva en el desarrollo de las tareas relacionadas con el hidrógeno y su uso como combustible de vehículos en operaciones mineras precisando estas en el vehículo en tareas estacionarias, carga de combustible, almacenamiento a bordo y operación. Se caracterizó e identificó al hidrógeno y las diferentes formas que tiene de producir generando diferentes estados del hidrógeno para su uso como combustible y al ser el combustible más liviano de la tabla periódica indica que al no estar contenido se disipa rápidamente y considerando sus rangos tan amplios de inflamabilidad, entre 4% y 75%, a eso hay que atribuirle que la forma más común es uso es almacenado de un tanque comprimido en presiones entre los 350 y 700 bar con una energía tan baja de ignición de 0.02 MJ.

En el análisis se comparará con dos combustibles comúnmente usados en este tipo de faenas como lo son el Diesel y Gas Natural, en las operaciones en las que se puede evaluar acorde al método. La evaluación para el análisis se realizó mediante la implementación del Índice de Fuego y Explosión de Dow Chemical para la objetividad paso a paso de la posibilidad real de un incendio, explosión y reactividad de las sustancias describiendo y calculando teóricamente el índice en las 3 tareas mencionadas anteriormente para considerar y evidenciar los riesgos del uso de hidrógeno como combustible comparado con sus 2 grandes competidores. Se hizo un análisis correspondiente al marco legal nacional aplicable al uso de hidrógeno como combustible y mediante una matriz legal se plasmó como resultado, además se toma en cuenta como en otros países se legisla y ha apoyado el desarrollo de esta tecnología en la implementación donde destacan acciones realizadas por los Estados Unidos, Alemania, Uruguay, Organización Internacional de Normalización, Unión Europea y su apoyo al desarrollo en otras naciones, como el caso de Alemania.

Se consideró todos estos aspectos y los años de estudio y experiencias se entregan recomendaciones para las condiciones de uso del hidrógeno a bordo en vehículos de operación subterránea abarcando la mayoría de los aspectos de las tareas y los riesgos inherentes a las faenas de estas características. Existiendo 18 proyectos por un monto de inversión de US\$ 29.600 millones.

Abstract

Hydrogen - Fuel - Underground mining - IF&E Dow Chemical - Safety conditions - Inherent risks.

The present work of title made the analysis of the evaluation of the risks of explosion, flammability and reactivity consequence the materialisation of incidents corresponding to the danger that entails in the development of the tasks related to hydrogen and its use as fuel of vehicles in mining operations specifying these in the vehicle in stationary tasks, fuel loading, storage on board and operation. Hydrogen was characterised and identified and the different ways it is produced generating different states of hydrogen for use as fuel and being the lightest fuel in the periodic table indicates that when not contained it dissipates quickly and considering its wide flammability ranges between 4% and 75%, it is attributed that the most common way it is used is stored in a compressed tank at pressures between 350 and 700 bar with an ignition energy as low as 0.02 MJ.

The analysis will be compared with two fuels commonly used in this type of operations such as Diesel and Natural Gas, in the operations that can be evaluated according to the method. The evaluation for the analysis was carried out by implementing the Dow Chemical Fire and Explosion Index for the step-by-step objectivity of the real possibility of a fire, explosion and reactivity of the substances by describing and theoretically calculating the index in the 3 tasks mentioned above to consider and demonstrate the risks of using hydrogen as a fuel compared to its 2 major competitors. An analysis was made corresponding to the national legal framework applicable to the use of hydrogen as a fuel and a legal matrix was used as a result, also taking into account how other countries legislate and have supported the development of this technology in the implementation where actions carried out by the United States, Germany, Uruguay, International Organisation for Standardisation, European Union and its support for development in other nations, as in the case of Germany, stand out.

All these aspects and years of study and experience were considered and recommendations for the conditions of use of on-board hydrogen in underground operation vehicles were provided, covering most aspects of the tasks and risks inherent to these types of operations. There are 18 projects with an investment amount of US\$ 29.6 billion.

Índice

SIGLA 6

SIMBOLOGÍA: 7

Introducción..... 1

Objetivo..... 3

 Objetivos específicos 3

Fundamentación 3

Alcance..... 4

Metodología:..... 5

CAPÍTULO 1: CARACTERIZACIÓN DEL HIDRÓGENO 7

 1.1 Características y propiedades del hidrógeno..... 8

 1.1.1 Comparación de combustibles..... 9

 1.2 Procesos de obtención de hidrógeno 13

 1.3 Chile como productor 14

 1.4 Tipos de almacenamiento..... 15

 1.5 Descripción de tareas..... 16

 1.5.1 Almacenamiento a bordo 16

 1.5.2 Carga de combustible 17

 1.5.3 Operación..... 18

 1.6 Riesgos asociados al hidrógeno y sus tareas 19

 1.6.1 Riesgos específicos del hidrógeno criogénico..... 19

 1.7 Riesgos propios de la operación minera subterránea 20

 1.8 Recomendaciones de seguridad 20

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ÍNDICE DE FUEGO Y EXPLOSIÓN DE DOW CHEMICAL..... 23

 2.1 Índice de Fuego y Explosión de Dow 24

 2.2 Introducción al análisis cuantitativo de riesgos..... 24

 2.3 Procedimiento..... 25

 2.3.1 Unidad de proceso 27

 2.3.2 Determinación del Factor Material..... 28

 2.3.3 Factor de riesgo de la Unidad de Proceso..... 30

 2.3.4 Factor de Riesgos Generales (F1) 30

 2.3.5 Riesgos especiales del proceso 35

 2.4 Factor de riesgo de la unidad..... 45

 2.5 Resultado del análisis cuantitativo de riesgos 45

Capítulo 3: ARMONIZACIÓN DE LA LEGISLACIÓN PARA EL USO SEGURO DE HIDRÓGENO..... 48

 3.1 Normativas nacionales..... 49

 3.1.1 Ley n° 18410:1985..... 49

 3.1.2 Ley n° 20417:2010..... 50

 3.1.3 Ley n° 19300:1994..... 50

 3.1.4 Decreto Supremo n° 132 del Ministerio de Minería, año 2004..... 50

3.1.5	Decreto Supremo n° 298 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, año 1995	51
3.1.6	Decreto Supremo n° 43 del Ministerio de Salud, año 2015”	51
3.1.7	Norma técnica nacional NCh 382:2021	52
3.1.8	Norma técnica nacional NCh 1377:1990	53
3.1.9	Norma Chilena Oficial NCh 385:1955	53
3.1.10	Norma Chilena Oficial NCh 1411/4:2000	54
3.1.11	Norma Chile Oficial NCh 2120/2:2004	54
3.1.12	Norma Chile Oficial NCh 2190:2019	54
3.1.13	Norma Chile Oficial NCh 2245:2021	55
3.2	Matriz legal nacional	55
3.3	Normativas internacionales	59
Conclusión		62

SIGLA

APR : Asesor en Prevención de Riesgos.

BMU : Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit - Ministerio Federal Alemán del Medioambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear.

BMWI : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Ministerio Federal Alemán de Economía y Protección del Clima.

BMZ : Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung - Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo.

CAEX : Camión de Extracción.

CGA : Compressed Gas Association – Asociación de Gas Comprimido.

CO₂ : Dióxido de Carbono.

CODELCO : Corporación Nacional del Cobre.

CORFO : Corporación de Fomento de la Producción.

D.S : Decreto Supremo.

EIGA : European Industrial Gases Association – Asociación Europea de Gases Industriales.

F&EI : Fire and Explosion Index – Índice de Fuego y Explosión.

GEI : Gases de Efecto Invernadero.

GN : Gas Natural.

H₂ : Hidrógeno Molecular.

H₂O : Agua.

INN : Instituto Nacional de Normalización.

ISO : International Organization for Standarization – Organización Internacional de Normalización.

NCh : Norma Chilena.

NFPA : National Fire Protection Association – Asociación Nacional de Protección Contra el Fuego.

UE : Unión Europea.

UV: Ultravioleta.

SIMBOLOGÍA:

K : Kelvin

bar : bar

MJ : MegaJoule

Kg/L : kilogramo/ litro

kJ : Kilo Joule

mol : mol

Pa : Pascal

mJ : Mili Joule

kg : Kilógramo

g : Gramo

m³ : Metro Cúbico.

L : Litro

ΔH : Entalpía.

kJ/mol : kiloJoule/mol.

Índice de figuras

Figura 1-1: Hidrógeno en la tabla periódica (IUPAC, 2022) 8

Figura 1-2: Llama de combustión de hidrógeno comparado con propano a "simple vista".
(Hydrogen tolos, 2020). 9

Figura 1-3 : Gráfico de densidad de gas natural, hidrógeno y Diesel en kg/m^3 11

Figura 1-4: Gráfico comparativo de temperatura de autoignición 11

Figura 1-5: Gráfico comparativo del rango de inflamabilidad. 12

Figura 1-6: Gráfico comparativo de calor de combustión 13

Figura 1-9: Pirámide invertida de jerarquía de control. 20

Figura 2-1: Proceso para calcular el índice de fuego y explosión, y el análisis de información de
otros riesgos..... 26

Figura 2-2: Rombos NFPA-704 para los combustibles en estudio (Hojas de seguridad) 29

Figura 2-3: Curva de penalización de unidades de proceso identificada como equipos de
combustión y la distancia de la unidad que afecta..... 43

Figura 3-1: Estrategia país de hidrógeno verde Uruguay – H2Uruguay. 60

Índice de tablas

Tabla 2-1: Valores de factor del material..... 28

Tabla 2-2: Factor de material de los combustibles en estudio 30

Tabla 2-3: Penalización de reacciones químicas exotérmicas 31

Tabla 2-4: Penalización de procesos endotérmicos..... 31

Tabla 2-5: Penalización acorde al índice de inflamabilidad 32

Tabla 2-6: Evaluación de combustibles y tareas del proceso 33

Tabla 2-7: Penalización por características de la unidad 33

Tabla 2-8: Penalización por dificultad de acceso a la unidad 34

Tabla 2-9: Penalización por posibles derrames y fugas por el diseño de la unidad 34

Tabla 2-10: Riesgos generales del proceso 35

Tabla 2-11: Penalización por toxicidad del 36

Tabla 2-12: Penalización por operación dentro o cercana al rango de inflamabilidad de la sustancia 37

Tabla 2-13: Penalización de polvo por tamaño de la partícula..... 37

Tabla 2-14: Penalización por presión de la operación 38

Tabla 2-15: Penalización por la cantidad de producto (combustible o inestable) dentro de la unidad de proceso 41

Tabla 2-15: Penalización por fugas en uniones o empaquetaduras de las sustancias en la unidad de proceso..... 42

Tabla 2-15: Penalización por cantidad de material y temperatura alcanzada con respecto a la sustancia en la unidad de proceso 44

Tabla 2-16: Penalización de los riesgos especiales del proceso. 45

Tabla 2-17: Resultado del índice F₃ de fuego y explosión..... 45

Tabla 2-18: Resultado de IF&E 46

Tabla 2-19: Grados de riesgos para el IF&E 46

Introducción

En los países desarrollados y en vías de desarrollo, la población está creciendo, la industrialización está aumentando, existe una alta demanda energética en adición a una mala organización ambiental, la tecnología de baja eficiencia y la alta tasa de tráfico vehicular resulta en nuevas problemáticas, siendo una de éstas, la calidad del aire [1]. Más aún cuando, prácticamente todos los aspectos de la vida moderna extraen su energía de los combustibles fósiles, derivan materialmente de ellos o reciben su influencia de algún u otro modo [2]. Y esto es reafirmado por el gráfico de “Consumo de energía procedente de combustibles fósiles”, donde al 2015 representa un 80%. [3]

La problemática de la contaminación del aire debido a la quema de combustibles fósiles para satisfacer la demanda energética afecta la calidad de vida de las personas, dando como resultado, un aproximado de 4.5 millones de muertes anuales en el mundo y generando una pérdida económica estimada en 2.9 billones de dólares [4]. Donde se aprecia una clara predominancia de los combustibles fósiles en el transporte, que alcanza un 32% del consumo de energía final total, motivo por el cual el desarrollo de combustibles alternativos y renovables para asegurar poder movilizar al mundo en un futuro, desde viajes de vacaciones hasta la movilización total de operaciones mineras, por ejemplo [5].

Hoy en día ya se están sentando las bases para la economía del hidrógeno, que se centra en el aprovechamiento de esta molécula como energía, convirtiéndose en el “combustible eterno” [6], pudiendo clasificarse este combustible dependiendo de la generación de carbono en sus procesos como hidrógeno gris y verde principalmente, en donde el primero es producido a partir del reformado de vapor de gas natural sin captura de emisiones de carbono [7], mientras que el segundo es producido por la electrolisis del agua a partir de electricidad proveniente de fuentes renovables [8], como lo son la energía fotovoltaica, eólica, geotérmica o por biomasa [9].

Se destaca del hidrógeno características como, ser invisible, insípido, gas descolorido que sucede ser el elemento más abundante del universo y un combustible muy energético y no contaminante [10]. Si a esto se agregan ciertos beneficios que trae consigo su uso a la seguridad, como que no es tóxico, además, porque el hidrógeno es mucho más liviano que el aire, se disipa rápidamente cuando es dejado escapar, permitiendo una rápida dispersión en caso de fuga [11]. Como se puede constatar este gas, que es un gas noble, puede ser la opción más viable a lo que sería un futuro centrado en eliminar las huellas de carbono dejada por los procesos antropogénicos que, con las tecnologías más usadas hoy en día, no hace más que contaminar y contribuir al deterioro del medioambiente.

Después de un pequeño preámbulo de las bases científicas, de este trabajo de título hay que indicar que se realiza gracias al interés del desarrollo del hidrógeno verde en Chile a través del proyecto CORFO en el que participa nuestra Universidad de “Electromovilidad minera mediante celdas de combustible”, que tiene como objetivo principal el uso del hidrógeno como combustible en procesos de transporte mineros.

De esta misma manera en parte este trabajo contribuirá al desarrollo de una estandarización del proceso del uso del hidrógeno como combustible en el consorcio conformado por parte de nuestra casa de estudios con CODELCO y financiado por la empresa Ingeniería 2030, que consiste en la conversión de una camioneta pick-up “minera” diésel para que opere con celdas de combustibles en base a hidrógeno. Este proyecto al ser una reconversión, una transformación de una tecnología a otra, lo que trae un riesgo asociado que hay que asumir y evaluar cómo mitigar esos riesgos [12].

Todo lo anterior enmarcado en el programa “4e Chile”, que consiste en el programa de energías renovables y eficiencia energética, como iniciativa de la GIZ, por encargo del BMU, BMZ y BMWI de Alemania, para en conjunto aumentar la sustentabilidad del sector energético a través de asesoría y fomentos a nuevos negocios y proyectos, como lo son el desarrollo de hidrógeno verde, descarbonización de la matriz eléctrica, cogeneración y eficiencia energética, entre otros [13].

Objetivo

Proponer las condiciones de seguridad para uso de hidrógeno on board en los vehículos de operaciones mineras subterráneas.

Objetivos específicos

- Caracterizar al hidrógeno y comparar sus características con otros 2 combustibles de interés, gas natural y diésel.
- Analizar a través del Índice de Fuego y Explosión de Dow Chemical considerando 3 etapas de proceso, y siendo nuevamente comparado con el gas natural y diésel.
- Armonizar la legislación nacional e internacional para entregar recomendaciones de uso seguro.

Fundamentación

Este trabajo es desarrollado sobre la propuesta del uso del hidrógeno en celdas de almacenamiento como combustible para vehículos que operen en mineras subterráneas, área en la que Chile todavía se encuentra a la espera de un marco regulatorio adaptado a la realidad nacional, porque como nosotros nos encontramos en los inicios, hay países como Alemania o Estados Unidos, principalmente en estado de California, en los cuales ya existen en primera instancia, medidas de seguridad en su uso, manejo y almacenamiento y más aún, llegando a establecer normativas que incentiven y promuevan la investigación y avance en esta materia. Al ser un proyecto ya en etapa avanzada, hay que asegurar e identificar las tareas y procesos críticos que contribuyan a la seguridad y salud ocupacional como marco estándar de características no legales. Lo que el proyecto pretende entregar a través del análisis del Índice de Fuego y Explosión de Dow Chemical usando esta evaluación cuantitativa del riesgo del hidrógeno en vehículos de operación minera subterránea siendo comparado con los 2 combustibles más usados en estos tipos de operaciones, como lo son el Diesel y el gas natural. En las tareas que este índice lo permite siendo de características estacionarias.

Alcance

El presente análisis tiene como alcance lograr establecer recomendaciones de condiciones para el uso y almacenamiento de hidrógeno en celdas de combustible a bordo en operaciones mineras, partiendo por poder identificar las tareas que realizarán durante la jornada de trabajo y exista riesgo de contacto con la sustancia, de esta misma manera las condiciones del lugar de almacenamiento del hidrógeno, así se obtendrá una lista de los riesgos asociados a su manipulación y almacenamiento, donde con esta información y posterior análisis se puedan definir los estándares de uso de hidrógeno con las normativas nacionales y en caso de ser necesario, tomar en consideración normativa internacional que no se contradiga con la anterior. Considerando que es únicamente teórico debido a que no se puede ver en terreno la operación y cada una de las tareas que la componían y detalles técnicos propios del vehículo y entorno en cual se proyecta su uso.

Premisas

Se desarrolla un análisis de almacenamiento en los equipos móviles que trabajan con hidrógeno.

El hidrógeno se viene ocupando como combustible durante al menos tres décadas,

Se trabaja sobre un combustible que carece de normativa,

Chile y Alemania están desarrollando un plan impulsor de producción de hidrógeno.

Supuestos

Ver las tareas a evaluar.

Evaluación de tareas de operaciones móviles del vehículo.

Visita a terreno.

Conocimiento de detalles técnicos del vehículo.

Limitaciones

Falta de conocimiento de normativas internacionales

Visualización incompleta de contenido en documentos de pago y/o suscripción

Falta de visita a terreno

No conocimiento del vehículo a modificar

Restricciones

No existe normativa chilena que regule el uso del hidrógeno como combustible,

No hay homologación de normativa internacional para Chile en el uso y almacenamiento a bordo de vehículos a hidrógeno,

Hitos principales

- Selección de enfoque en la temática inicial propuesta.
- Certificación del curso “Hidrógeno Verde para el APR”.
- Asistencia al Webinar “Desafíos para la Gestión de Riesgos en el Hidrógeno Verde”.
- Compra de suscripción a página de documentos para investigación.
- Se realiza comparación y conversación de los resultados del análisis cuantitativo de riesgos con estudiante memorista con proyecto a fin.
- Elaboración del material de apoyo gráfico para el presente documento.

Metodología:

Etapas 1: Características del hidrógeno.

En el desarrollo de esta etapa se busca informar las características y cualidades del hidrógeno, tanto como gas, como combustible, indicando cómo funciona su cadena de valor, como se transforma en energía, esto permitirá evidenciar de mejor manera los tópicos presentados en las etapas siguientes.

Etapas 2: Análisis del Índice de Fuego y Explosión.

Se realizará una evaluación cuantitativa en la que se compara una celda de combustible de hidrógeno de un vehículo estándar con otros dos combustibles, diésel y gas natural, en tres tareas; almacenamiento a bordo, carga de combustible y operación. Para poder dimensionar realmente cuáles son los pro y contra de uso de este nuevo combustible. Mediante el método de cálculo del “Índice de Fuego y Explosión de Dow”.

Etapas 3: Armonización legal para uso seguro del hidrógeno.

Como última etapa se decidió realizar una conjunción de las normativas legales que podemos considerar, junto con las recomendaciones para un uso seguro en la operación subterránea y como país con miras a desarrollar este tipo de tecnologías.

CAPÍTULO 1: CARACTERIZACIÓN DEL HIDRÓGENO

Introducción

En este trabajo se procede a hacer un análisis mediante dos métodos, los cuales están propuestos en el siguiente capítulo, pero para poder realizar este análisis de manera correcta es necesario conocer con el compuesto con el cual se está en contacto directo o indirecto durante la jornada. Este primer apartado servirá para lograr hacer una correcta identificación de los riesgos asociados y señalar las características principales del hidrógeno, las que se deben tener en consideración para estimar sus consecuencias en los análisis.

1.1 Características y propiedades del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico número 1 en la tabla periódica, representado con la letra “H”. Con una masa atómica de 1,00797, siendo el más ligero de ellos. Generalmente se representa en su forma molecular, formando un gas diatómico H₂ en condiciones estándares para gases, es decir, una temperatura de 273,15 K o 0 °C y una presión de 10⁵ (Pa) o 1 (bar) o 0.98692327 atm.[14]

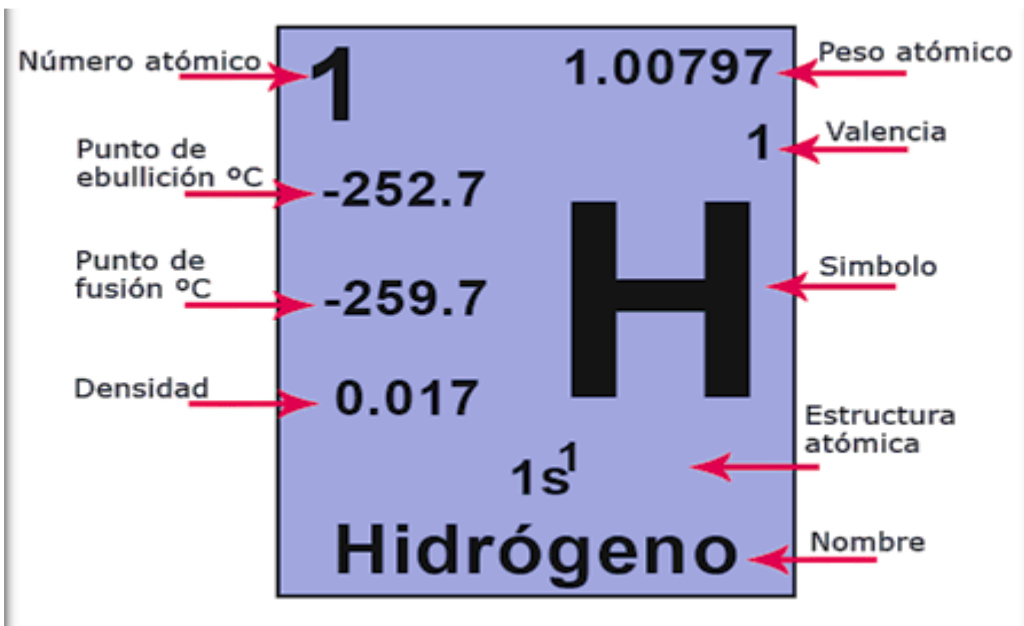


Figura 1-1: Hidrógeno en la tabla periódica (IUPAC, 2022)

Este gas es altamente inflamable, teniendo sus límites del rango de inflamabilidad entre un 4 a un 75% de volumen porcentual de hidrógeno presente en aire a 1 atm [15], la entalpía de combustión de hidrógeno es de -285.8 kJ/mol y se quema en función de la siguiente ecuación balanceada [16].



Cuando el hidrógeno se mezcla con aire en una gran variedad de proporciones y con una energía necesaria para ignición de 0.02 mJ, esta mezcla explota por ignición, las llamas generadas por la quema se encuentran en el rango del espectro U.V (ultravioleta), por lo que a simple vista resulta casi imposible identificarlas, como se muestra en la figura 1-2.

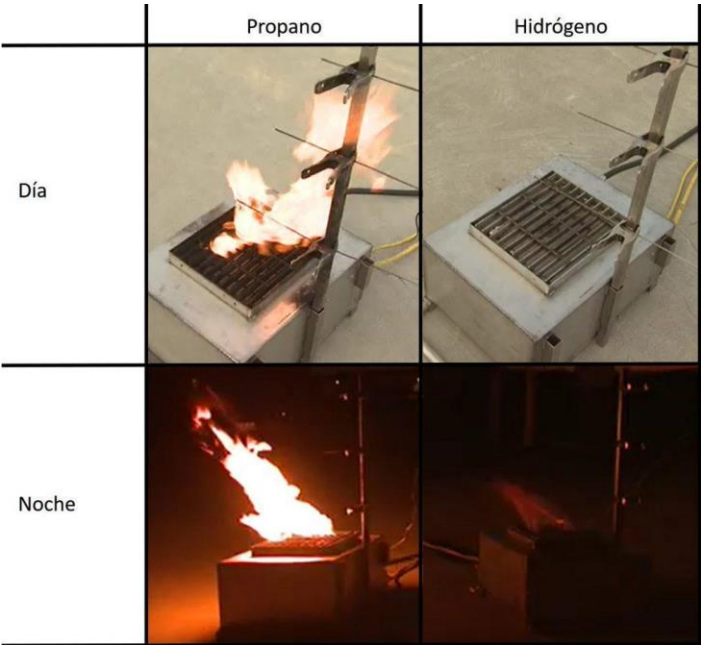


Figura 1-2: Llama de combustión de hidrógeno comparado con propano a "simple vista". (Hydrogen tolos, 2020).

El hidrógeno es un gas y es el elemento más abundante en el universo constituyendo un aproximado del 75% de la materia visible y, sin embargo, en la Tierra, raramente se encuentra en estado libre [17]. Extrañamente, el hidrógeno no es un recurso natural, ya que no se puede obtener de la naturaleza como pasa, por ejemplo, con los otros combustibles, que pueden ser extraídos mediante tareas como la minería o la extracción.

Este gas es un portador de energía, por lo que es necesario producirlo a partir de otras materias primas, que son parte de la mayoría de los compuestos en los cuáles se encuentran presente, como el agua, biomasa o los recursos fósiles [18]. Y para convertir estos compuestos de hidrógeno en energía disponible para su uso hay que seguir alguno de los procesos, dependiendo de la fuente donde se esté obteniendo.

1.1.1 Comparación de combustibles

Se procederá a realizar una breve descripción y contextualización de los combustibles con los cuales se comparará el hidrógeno a lo largo de este documento, serán dos, ambos muy

utilizados en lo que respecta a la industria y transporte en todas las economías del mundo, el diésel y el gas natural.

Para posteriormente transformar los valores en gráficos de elaboración propia enfocados en la comparación visual de las características de estos.

- Diésel

El combustible “diésel” se origina a partir de experimentos realizados por el científico e inventor alemán Rudolf Diésel, quien lo uso para su motor de encendido por compresión durante la década del 90’ [19].

Como características más técnicas, la densidad promedio establecida, la cual puede variar, es de aproximadamente 0.832 kg/l [20]. De su composición un aproximado de 86% corresponde a carbono, y por otra parte, $\frac{3}{4}$ del total corresponde a hidrocarburos saturados y $\frac{1}{4}$ a hidrocarburos aromáticos, combustible que si se quema tiene un poder calorífico de 43100 kJ/kg , generando emisiones de CO_2 valorizadas en $73,25 \text{ g/Mj}$. [21]

- Gas natural

El gas natural es un hidrocarburo formado por CH_4 con una proporción variable de nitrógeno, etano, CO_2 , H_2O , butano, propano, mercaptanos y trazas de hidrocarburos más pesados. Al ser usado para transporte está comprimido a 250 bar con una densidad de 158.9 kg/m^3 . Y con un calor de combustión de 46600 kJ/kg [22].

Es un gas que en su estado en condiciones normales es insípido, incoloro e inodoro, es decir, no tiene sabor, ni color, ni olor. Debido a estos motivos se le agrega un compuesto denominado Mercaptano, que es el componente que permitirá que personas con olfato normal detecten la presencia de gas natural en caso de fuga [23].

- Resumen de comparación

Presentación de los gráficos elaborados para la apreciación visual para evidenciar la comparación entre los combustibles de interés.

Con respecto a las densidades de los diferentes combustibles se presenta la figura 1-3, en la que se aprecia el valor graficado del hidrógeno, que corresponde a $0,09 \text{ kg/m}^3$ [24] y el del gas natural que es $0,63 \text{ kg/m}^3$ [25].

Por otro lado, no se compara con el diésel, ya que este almacenarse en estado líquido en condiciones normales y debido al tipo de motor en el que se utiliza no se encuentra comprimido, pero de igual manera se indica que su densidad es de 832 kg/m^3 [26].

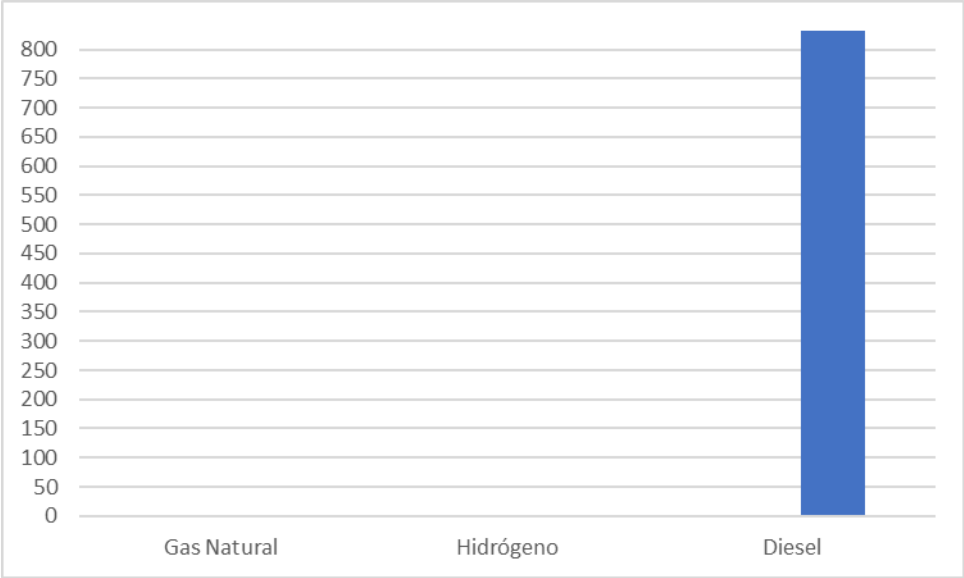


Figura 1-3 : Gráfico de densidad de gas natural, hidrógeno y Diesel en kg/m^3 .

Otra consideración relevante para la comparación es la temperatura de autoignición, la cual corresponde a la temperatura mínima a presión normal, 1 *atm*, a la que un combustible, ya sea este; sólido, líquido o gaseoso, en contacto con el aire arderá de manera inmediata sin la necesidad de exponerse a una fuente de calor exterior.

La figura 1-3 muestra gráficamente las temperaturas mínimas de autoignición que se entregaran a continuación; la temperatura para el hidrógeno es de 560 °C [27], la que corresponde al diésel es de 246 °C [28] y para finalizar la del gas natural es de 540 °C [29].

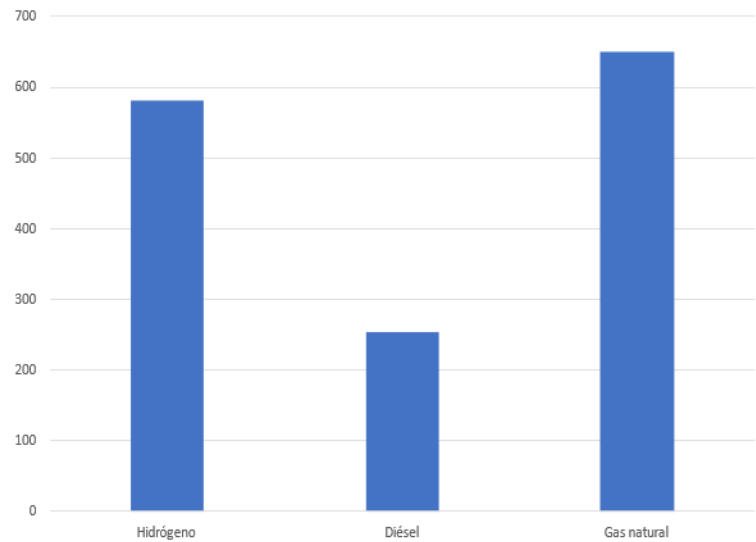


Figura 1-4: Gráfico comparativo de temperatura de autoignición

Junto con la comparación de la temperatura de autoignición de los combustibles se indicará a continuación los rangos de inflamabilidad de los combustibles, ya que la información indicará las concentraciones mínimas y máximas en las que puede estar un gas o vapor de un combustible mezclado con oxígeno, dentro de los que puede ser inflamable si se presenta una ignición.

Esta varía por cada sustancia, en la figura 1-5 se grafican los valores de los rangos de inflamabilidad, los cuales son; para el hidrógeno va desde un 4% hasta un 75%, el diésel entre 0,6% y un 7,5%, siendo en este caso el vapor que libera el diésel y el gas natural que tiene un rango que va desde el 5% hasta un 15%. Donde se ve identificado el rango de inflamabilidad en naranja.

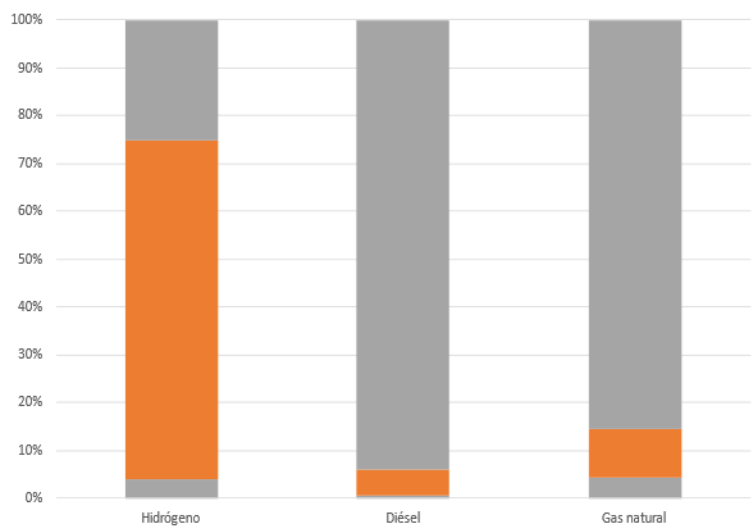


Figura 1-5: Gráfico comparativo del rango de inflamabilidad.

Y como último punto de comparación es relevante saber el calor de combustión que liberan los combustibles al encontrarse dentro de una unidad de proceso, principalmente para el caso, de transporte. El calor de combustión es un término que describe la cantidad de energía térmica, o calor, que se genera cuando una sustancia se quema completamente en un ambiente que presente las cantidades adecuadas de oxígeno.

Los valores de calor de combustión, expresados en *kJ/kg* para el hidrógeno, diésel y gas natural son de; 120.000 *kJ/kg*, 43.100 *kJ/kg* y 46.600 *kJ/kg*, respectivamente. Se encuentran graficados en la figura 1-6.

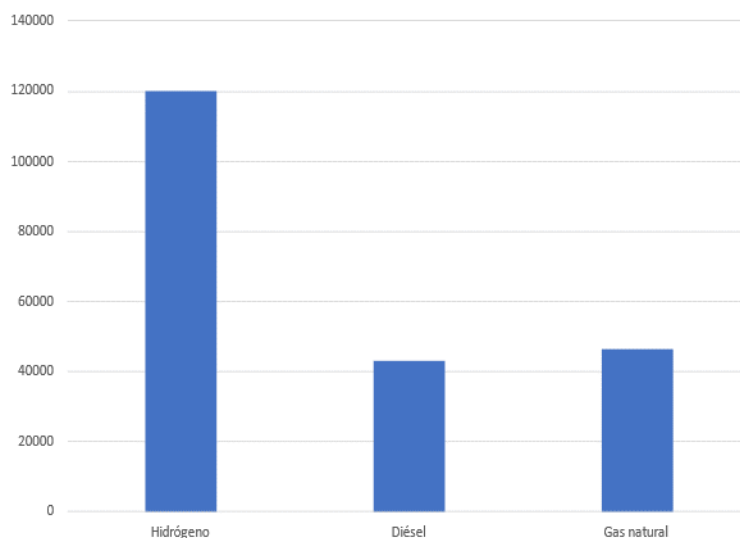


Figura 1-6: Gráfico comparativo de calor de combustión

Con esto ya existe un preámbulo de las características y propiedades de los 3 combustibles, el hidrógeno y otros 2 muy usados en la industria como son el diésel y el gas natural.

1.2 Procesos de obtención de hidrógeno

Por la naturalidad del hidrógeno, este no se presenta de forma aislada sino formando partes de moléculas más complejas, como lo son el agua o los hidrocarburos, al igual que un mineral este deberá ser procesado, fundido y transformado para que recién pueda ser utilizado o al igual que el petróleo, que debe ser refinado para ser usado como combustible, por su parte el hidrógeno debe ser producido, al ser extraído de las moléculas que lo contienen y posteriormente almacenado [30].

Existen diferentes tipos de producción de hidrógeno los cuales se pueden clasificar según la forma en la que se produce y las emisiones que genera.

Se identifican 2 formas principales para la producción de hidrógeno;

La primera consiste en su obtención a partir de fuentes fósiles, descomponiendo las moléculas de los hidrocarburos, a partir de los combustibles fósiles, ya sean petróleo, gas o carbón, generan dióxido de carbón como sub-producto.

Y la producción de hidrógeno a través de la electricidad, donde la molécula de agua se rompe aplicando corriente eléctrica ente el cátodo y el ánodo hace que el agua se disocie formándose hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo.

Por la forma de producción del hidrógeno por su impacto en la emisión de GEI se clasifican por colores en 3 tipos, como muestra la figura 1-8.

El denominado hidrógeno gris, azul y verde, pudiendo haber más variando los criterios. El gris corresponde a hidrógeno que se produce ocupando combustibles fósiles, en el que también se obtiene monóxido de carbono. El hidrógeno azul es aquel que es producido cuando se quema carbón a altas temperaturas, y el carbono emitido es captado y reutilizado o almacenado. El hidrógeno denominado verde es el que ha sido generado a partir de fuentes y energías renovables y al ser utilizado, no genera CO₂, el gas de efecto invernadero que emiten al quemarse la mayoría de los combustibles fósiles, ya que no contiene carbono en su interior ni en su producción. En su lugar, el consumo de la energía del hidrógeno simplemente genera otro compuesto conocido: agua [31].

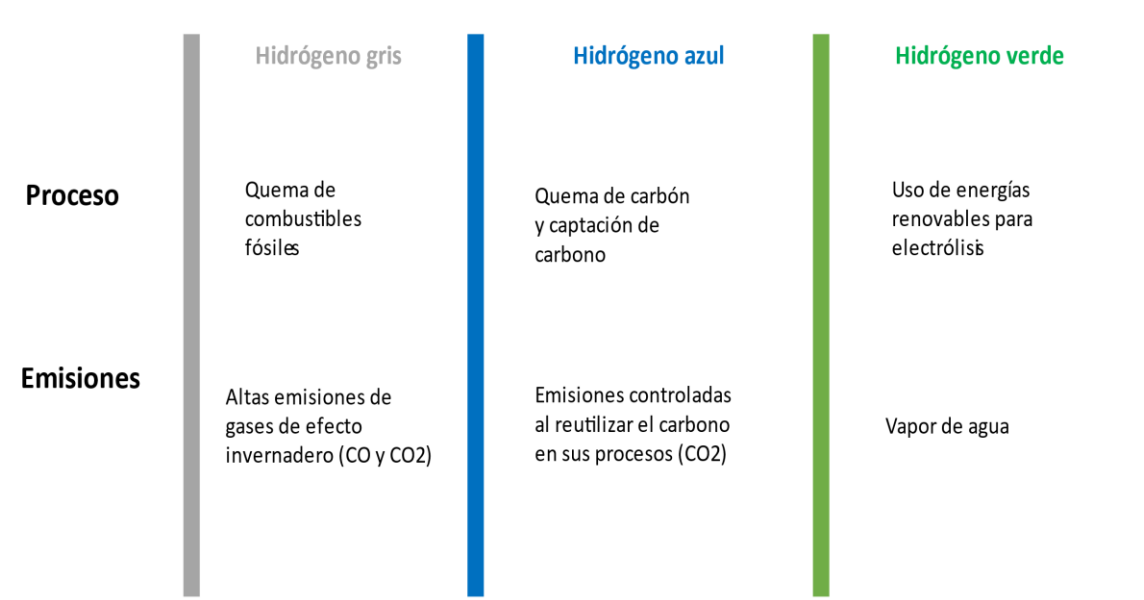


Figura 1-8: Clasificación del hidrógeno según su proceso de producción

1.3 Chile como productor

Después de haber señalado lo que fueron los riesgos y peligros, y después de haber realizado los análisis anteriormente vistos, se da paso a la parte final, que consiste en buscar apoyo en normativas nacionales e internacionales que contribuyan al desarrollo de una política de seguridad en Chile para el uso del hidrógeno como combustible, ya que según señalo la cámara del Senado de Chile: “tendríamos una posición privilegiada para transformarnos en una potencia mundial de este combustible”, y de acuerdo al Ministerio de economía, el “Hidrógeno Verde” podría representar hasta un 10% del actual Producto Interno Bruto”, que haciendo un símil es a lo que equivale la minería en nuestro país. (3.1)

Cabe destacar que los principales países que están ocupando el hidrógeno como combustible son los Países Bajos, Alemania, Corea del Sur, Estados Unidos, por hacer referencia a algunos. Siendo Alemania muy participe en Chile con instituciones como el Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), que es la sociedad alemana de cooperación internacional, y en la actualidad se encuentran desarrollando proyectos asociados al uso de “Hidrógeno Verde” por más de 20 mil millones de dólares. (3.2) Dando a Chile una excelente oportunidad de contribuir como país a la descarbonización y abriendo un nuevo mercado “verde”, en conjunto de esto y de los esfuerzos que está poniendo el consorcio con Alemania, donde ya se presenta un proyecto llamado “Highly Innovative Fuels” (HIF) por parte de eCombustibles con sus socios, donde el gobierno alemán apoyo financieramente a través de la empresa Siemens Energy, teniendo como objetivos la producción de metanol y eCombustible a partir del año 2022.

Por lo visto los beneficios y las proyecciones para Chile como productor de combustible son muy favorables, en la actualidad Chile se encuentra realizando estrategias legislativas y de uso, que van a ir aumentando parcialmente hasta una proyección hecha para el año 2050, pero de momento, se encuentra en la etapa I: Activar la industria doméstica y desarrollar la exportación, etapa que va del 2020 al 2025. Donde se busca el despliegue mediante proyectos piloto, el despliegue del hidrógeno verde en 6 aplicaciones; uso en refinerías, amoníaco doméstico, camiones mineros (CAEX), camiones pesados de ruta, buses de larga autonomía e inyección de hasta 20% en redes de gas, para mediante esfuerzos y regulación que incentive la producción y que fomente la demanda para la construcción de un mercado local, que permita generar conocimiento, escala, infraestructura y cadenas de suministro para permitir a Chile acceder a los mercados de exportación (3.3).

Pero mientras suceden todos estos cambios y proyectos se hace necesario tener una regulación nacional que permita y contenga el uso seguro de la manipulación del hidrógeno como combustible en celdas, pero al no existir es necesario recurrir a normativa internacional de estándares de seguridad que ayude a que éste sea regulado y usado con seguridad y precaución, y que no se contradigan con los ya dispuestos en la legislación nacional.

1.4 Tipos de almacenamiento

El almacenamiento consiste básicamente en guardar objetos en algún almacén, bodega, galpón u otro lugar, según se determina, generalmente y por seguridad se deben disponer

estas infraestructuras de manera limpia y ordenada, para disponer de éstos cuando sea necesario o conveniente.

A la hora de hablar del hidrógeno esta es una gran disyuntiva, ya que las tecnologías de almacenamiento tendrían que mejorar significativamente para poder establecer un sistema basado en él.

Se identifican dos figuras fundamentales para sentar bases en este tema, el almacenamiento estacionario y el no estacionario; el primero corresponde a los puntos de producción, distribución y consumo estacionario (estaciones de recarga de celdas de combustible), y el segundo corresponde al almacenamiento en celdas de combustible y transporte de estas.

Las principales elecciones de almacenamiento viables se limitan a:

- Tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido.
- Tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico.
- Hidruros químicos.
- Materiales en estado sólido:
 - Hidruros metálicos compuestos.
 - Nanoestructuras de carbono [32].

1.5 Descripción de tareas

Para la descripción de tareas que se hará a continuación es necesario conocer los peligros y riesgos que se asocian a su uso como combustible, para en primera instancia, tener una lista de tareas que después van a ser clasificadas dependiendo si la actividad corresponde al apartado de almacenamiento el cual a su vez se subdivide en 2, dando paso y la diferencia si el almacenamiento es en bodega o a bordo, o si pertenece al proceso de carga de combustible.

1.5.1 Almacenamiento a bordo

El almacenamiento a bordo de un vehículo tiene 2 formas posibles de ser transportado y utilizado en la operación del vehículo, teniendo en cuenta que el hidrógeno en condiciones

normales se encuentra en estado gaseoso por lo que se entiende que estaría comprimido, o líquido o criogénico que se obtiene de la licuación de este gas mediante una baja de la temperatura. [33].

1.5.1.1 Almacenamiento de hidrógeno comprimido

Debido a la baja densidad de este gas, este es normalmente almacenado bajo altas presiones, las cuales pueden ir de los 200 *bar* hasta los 700 *bar*[34]. Por esto son necesarios contenedores que puedan cumplir con estas características.

Para este caso será considerado un tanque de hidrógeno a 700 *bar*, este es uno de los tipos de almacenamiento más utilizados, ya que comparte características de manipulación con otros gases comprimidos y es una tecnología ya madura, pero al tener la necesidad de alta resistencia a impactos existe un alto gasto asociado a las celdas de combustibles.

1.5.1.2 Almacenamiento de hidrógeno criogénico

El hidrógeno líquido o criogénico se obtiene de la licuación, que es pasar de un gas a un líquido, por medio de las modificaciones de condiciones de temperatura y presión. Al licuar el hidrógeno aumenta su densidad volumétrica, lo que se traduce a la larga en tanques que sean más ligeros y que contengan un menor volumen, lo cual hace que intrínsecamente se vuelva más seguro.

Dentro de los puntos negativos que tiene este sistema de almacenamiento a bordo es que, se puede comenzar a evaporar de los tanques, incluso de los que se encuentran altamente aislados y por el lado económico, al menos un 35% de la energía total generada por el hidrógeno es utilizada solamente para que éste sea licuado.

El hidrógeno criogénico se debe almacenar en tanques especialmente diseñados para que soporten temperaturas inferiores a los -253°C, y a si mismo tener una buena resistencia al calor, ya que incluso en tanques altamente aislados el hidrógeno puede comenzar a evaporarse. [35].

1.5.2 Carga de combustible

Se podría suponer que cargar de combustible un auto a hidrógeno sea igual de sencillo que cargar un con combustibles “tradicionales” como bencina, diésel, etc. Para llevar a cabo este proceso se deben considerar 2 procedimientos, los que fueron desarrollados tomando en cuenta la hoja de seguridad del hidrógeno y el proceso de carga de un vehículo común:

- Antes de cargar hidrógeno:
 - Detener completamente el vehículo cerca del dispensador indicado, acorde al vehículo (350 *bar* o 700 *bar*).
 - Cerrar todas las ventanas.
 - No fumar o manipular objetos que produzcan chispa.
 - Poner el auto en neutro o P (park) y apagar el motor.
 - Abrir la tapa de recarga de la celda de combustible.
 - Seguir las instrucciones del dispensador para una carga segura.
- Durante la carga:
 - Conectar la manguera del dispensador haciendo que asegure a la conexión del vehículo. Solo iniciará la carga cuando el sistema de bloqueo detecte la conexión.
 - Seguir las instrucciones del proveedor.
 - No manipular el dispensador mientras realiza la carga.
 - Cuando el dispensador le indique, debe sacar la manguera.
 - Cerrar las tapas de carga del vehículo.
 - Asegurar la manguera al dispensador.

La seguridad de esta operación es considerable debido a los riesgos que se expone por las posibles explosiones por la presión a la que se encuentra sometida el gas, y tomar en cuenta que el hidrógeno es un gas inflamable por lo que puede generar llamas por una fuga o una explosión por la concentración en el aire que genera una mezcla en los rangos de inflamabilidad.

1.5.3 Operación

La intención de operación de vehículo de celda de combustible es la misma establecida para los vehículos que funcionan con combustibles tradicional en las operaciones mineras subterráneas, lo cual, según indica Frank Klose, coautor del estudio de “Automotive Industry 2035 – Forecast for the future”, “We believe that there is great potential if green hydrogen is pushed into applications where it can really establish itself in the long term. Above all in industry, but also in heavy-duty transport, aviation and shipping,”

Conducir un vehículo a hidrógeno es igual a uno de combustibles tradicionales, pero al operar en túneles se deben tener consideraciones para los riesgos de explosiones como se han mencionado en las tareas anteriores, además suma el riesgo del desplazamiento de oxígeno dentro de un espacio que no cuente con las medidas preventivas necesarias para abordar una fuga, como lo son los sistemas de ventilación que ya se usan en este tipo de faenas.

1.6 Riesgos asociados al hidrógeno y sus tareas

Al ser un gas incoloro, insípido e inodoro es imposible de ser detectado por un humano. Presenta baja viscosidad y es un átomo muy pequeño que puede ser absorbido por materiales que lo contengan, pudiendo ocasionar fugas al entorno, debilitamiento de ciertos materiales que eventualmente podrían materializarse en fallas estructurales. Como es un gas de baja densidad energética debe ser almacenado a grandes presiones. Debido a la fuga de un estanque puede generar asfixias por su acumulación en espacios cerrados. Tiene un alto rango de inflamabilidad por lo que puede prenderse en un amplio espectro de concentraciones. Al tener una energía tan baja de ignición una mínima chispa puede ocasionar que encienda.

1.6.1 Riesgos específicos del hidrógeno criogénico

Los riesgos que se tienen al almacenar un fluido criogénico a temperaturas inferiores a los -253°C son que pueden;

- Provocar quemaduras en la piel y daño pulmonar, debido a que el contacto de una superficie muy fría con la piel o de ser inhalado, a nivel pulmonar, puede producir severas quemaduras.
- Generar explosiones por presión el rápido estado, de líquido a gas, del hidrógeno por el drástico cambio de temperatura cuando este se fuga del tanque de almacenamiento.
- En relación con el punto anterior, abordando la temática de fuga, al estar a estas temperaturas tan bajas y al estar en contacto con el aire, éste se puede condensar transformándolo en líquido.

1.7 Riesgos propios de la operación minera subterránea

Para que en la industria minera las condiciones de trabajo sean optimas se deben considerar todos los aspectos de la operación minera, siendo los principales riegos;

- Accidentes ocasionados por vehículos motorizados.
- Atrapamiento.
- Caída desde altura.
- Golpeado por roca.
- Golpeado por otros elementos distintos a rocas.
- Contacto con energía eléctrica.

1.8 Recomendaciones de seguridad

En lo que es la gestión de los riesgos al interior de la mina se deben tomar las medidas nacionales como base e idealmente ir complementado con legislación internacional que permita un desarrollo seguro de las actividades relacionados con el uso del hidrógeno como combustible para vehículos a utilizar en minería subterránea.

Las medidas a considerar en base a la jerarquía de los riesgos son;



Figura 1-9: Pirámide invertida de jerarquía de control.

- Eliminación:

Debido a que el hidrógeno usado como combustible es la fuente del análisis no se puede eliminar y los riesgos a controlar corresponden a los riesgos inherentes de este. Y las condiciones son determinadas por las condiciones geográficas del trabajo en minería subterránea.

- Sustitución:

Al igual que el punto anterior ninguna de las condiciones de peligro puede ser sustituida por otra, ya que esto desviaría el caso de estudio inicial.

- Controles de ingeniería:

Sistemas de ventilación natural o forzada que permita las renovaciones de aire necesarias al interior de la mina, entregando un caudal mínimo de 3m³/min por colaborador con velocidades establecidas en un rango entre 15 – 150 m/min, permitiendo una atmosfera oxigenada con un mínimo de 19,5% de concentración y que no genere una atmósfera explosiva.

Tener un sistema de detección y extinción de incendios acorde a las necesidades de las instalaciones mineras (oxígeno, hidrógeno, CO, CO₂, etc.)

Diseño adecuado de contenedores de almacenamiento (sensores y alivio de presión).

Sistema de tomas a tierra.

Uso de vehículos a control remoto.

- Controles administrativos:

Contar con un plan de emergencias y evacuación actualizado al lay-out de la minera.

Registro de capacitaciones legales y relacionadas con la operación, como procedimientos de trabajo, planes de contingencia, uso y cuidado de EPP, etc. Y colaboradores autorizados al manejo y carga de los vehículos.

Programa de mantención con personal técnico debidamente capacitado.

Identificación de los riesgos y medidas de prevención a los cuales se exponen a los colaboradores acorde al proceso que se desarrolla, mejorando la comunicación.

Recordatorio de “reglas de oro de la seguridad minera en Chile” (Anexo 2).

Programa de reforzamiento de aprendizajes y capacitación.

Campañas y sensibilización de mensajes claves para la seguridad.

- Equipos de protección personal:

Al considerar la operación minera subterránea y el sistema de carga de hidrógeno actual, habría que considerar los siguientes:

Casco de seguridad considera lámpara, elementos de protección auditivos removibles y barbiquejo. Clase A y tipo II.

Anteojos de seguridad.

Protector respiratorio con filtros de alta eficiencia para gases y polvo.

Autorrescatador.

Guantes, pudiendo ser de cuero o PVC en base a las tareas del colaborador.

Zapatos de seguridad de caña alta, con suela antideslizante, protección contra hidrocarburos, dieléctricos, impermeables y puntera de acero o composite.

Todo estos deben estar con su aprobación del Instituto de Salud Pública acorde al DS n 18 del Ministerio de Salud Pública.

Teniendo un coste de 184.392-. pesos chilenos por colaborador, considerando una compra al detalle de estos elementos en el Anexo 1 página 68.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ÍNDICE DE FUEGO Y EXPLOSIÓN DE DOW CHEMICAL

Introducción

En el ámbito de la prevención de riesgos, es fundamental realizar evaluaciones exhaustivas de los diferentes combustibles utilizados en la industria minera, con el objetivo de identificar y minimizar los posibles peligros asociados. En este contexto, se propone utilizar la metodología del índice de fuego y explosión de Dow Chemical para comparar el comportamiento del hidrógeno en relación con otros combustibles ampliamente empleados en esta industria, como el diésel y el gas natural. Para llevar a cabo esta comparación, se han seleccionado tres procesos clave relacionados con el uso de un vehículo

2.1 Índice de Fuego y Explosión de Dow

Para realizar la comparación del Hidrógeno con otros combustibles usados en la industria minera como lo son el Diésel y el Gas Natural (GN) se sugirió realizar una evaluación a los 3 combustibles mencionados anteriormente en 3 procesos que son propios del uso de un vehículo, en este caso, una camioneta pick-up minera genérica. Las tareas escogidas son las más significativas y recurrentes, por ende, en las que tenemos que poner énfasis. Como primer proceso se identifica al vehículo estacionado con el motor apagado, donde éste solo va a cumplir la labor de almacenar el combustible, ya sea en un estanque a presión normal o comprimido en una celda de combustible, se identificó con el nombre de “storage on-board”. El siguiente proceso identificado corresponde a la “carga de combustible” o llenado del estanque o celda, también el vehículo se encuentra con el motor apagado, pero al manipular el combustible este actúa como sustancia dentro del proceso. Y, por último, el tercer proceso corresponde al vehículo en funcionamiento u “operación, donde el estanque o celda va a ser vaciado según requerimiento del usuario y nuevamente el combustible es el que será parte del proceso.

Al igual que al hacer una evaluación como una empresa aseguradora, desde el punto de vista de la prevención de riesgos hay que tomar el peor caso posible, por esto motivo las evaluaciones a hacer corresponden a un vehículo en una mina con faena subterránea.

2.2 Introducción al análisis cuantitativo de riesgos

El sistema de análisis de riesgos del índice de fuego y explosión es un paso a paso cuyo objetivo de evaluación es el potencial real de fuego, explosión o reactividad de un equipo

de procesos y lo que contiene, en este caso uno de estos tres combustibles; hidrógeno, diésel y GN.

El propósito del sistema del Índice de Fuego y Explosión es:

- 1-. Cuantificar el daño esperado de fuego, explosión o reactividad en termino de incidentes posibles.
- 2-. Identificar el equipamiento que se espera que pueda contribuir a la creación o aumento de un incidente
- 3-. Comunicar el F&EI potencial de riesgo a la administración.

Pero por sobre todos los números y formulas el objetivo más importante es “hacer al ingeniero consiente de la pérdida potencial de cada área de proceso” y ayudar al ingeniero a identificar maneras de disminuir la severidad y su resultado de pérdidas potencial en incidentes de manera eficiente y efectiva.

2.3 Procedimiento

Para realizar un F&EI, tal como indica en la introducción, hay que seguir un paso a paso dado por este flujograma de la figura 2-1.

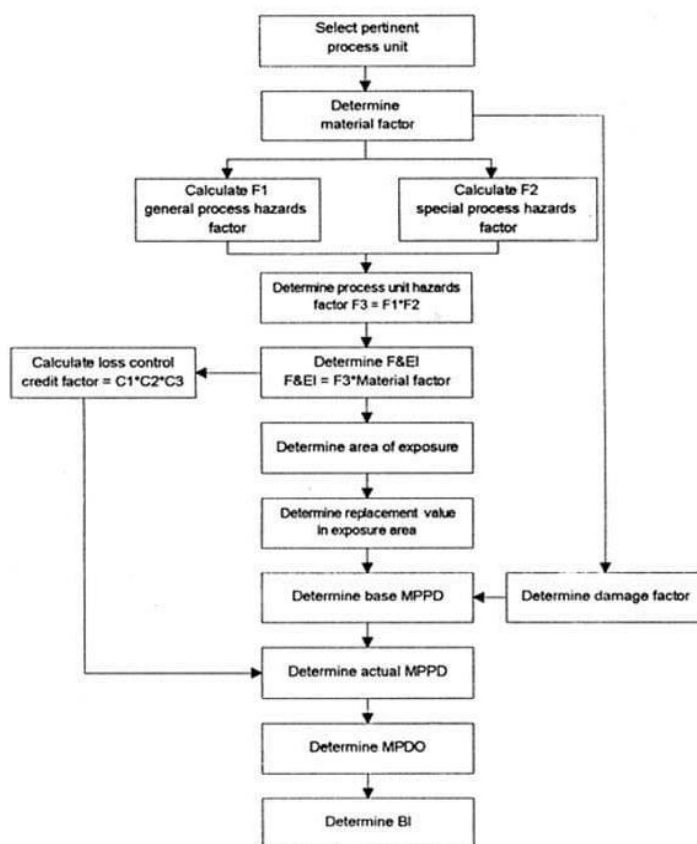


Figura 2-1: Proceso para calcular el índice de fuego y explosión, y el análisis de información de otros riesgos

El paso a paso a seguir es el siguiente:

- Seleccionar la unidad de proceso.
- Calcular el Factor de Material (FM).
- Evaluar factores de riesgo (F₁ y F₂).
- Calcular Factor de Riesgo (F₃) y Factor de Daño (FD).
- Determinar el Índice de Incendio y Explosión (IIE).
- Radio (RE) y Área de Exposición (AE).
- Calcular valor de sustitución del equipo (VS).
- Calcular el Daño Máximo Probable a la Propiedad (MPPD) tanto básico como real (FB y FBE).
- Determinar los Máximos Días de Interrupción (MPDO), con Costes de Paralización de la Actividad (BI).

El análisis F&EI considera la cuantificación de tanto los daños estructurales como económicos, los cuales no serán considerados en el desarrollo de este documento, ya que el objetivo simplemente es establecer un punto comparativo cuantitativo entre los tres combustibles de interés. Por otro lado, los controles de falla, que son los que contribuyen a la ocurrencia de un incidente, no son relevantes, debido a que la experiencia minera chilena en los vehículos que son impulsados por hidrógeno es escasa, por lo reciente en su tecnología.

Finalmente, la ecuación que determina el F&EI es:

$$MF * F_3 = F\&EI$$

donde:

MF : Factor del Material.

F₃ : Factor de Riesgo.

F&EI : Fire & Explosion Index

2.3.1 Unidad de proceso

El primer paso para realizar el cálculo requiere determinar que unidad del proceso será estudiada, éste es definida como el componente mayor del equipo de proceso. Se debe considerar una serie de factores a la hora de determinar la unidad de proceso pertinente para nuestro análisis, estos son:

- a. Potencial de energía química (Factor Material).
- b. Cantidad de material peligroso en la unidad de proceso.
- c. Presión y temperatura del proceso.

Y las consideraciones a tener son las siguientes:

- a. El Índice de Fuego y Explosión asume que la unidad mínima de uso es de 5,000 lb (2,268 kg), o 600 gal (2.27 m³) de un material inflamable, combustible o reactivo. De ser menos el riesgo será sobre estimado, sin embargo, el IF&E entrega resultados significativos para pilotos si se usan al menos 1,000 lb (454 kg) o 120 gal (0.454 m³).
- b. Se tienen que realizar evaluaciones a las unidades de proceso que sin ser las principales a estudiar se pueden ver afectadas por una reacción en cadena o por la falta o una mala aislación.
- c. También es muy importante considerar el estado o punto de la operación. Por su naturaleza estas etapas son comunes como *arranque*, *operación*, *apagado*, *llenado*, *vaciado*, *etc.* que crean condiciones únicas en el impacto del análisis del IF&E.

Generalmente el buen juicio permite la selección de momentos críticos en la operación.

La unidad de proceso que será estudiada corresponde a una camioneta pick-up “genérica” usada en faenas mineras, ya que los valores manejados en el estanque de este tipo de vehículos son inferiores al sugerido por las consideraciones del IF&E se decidió en conjunto, realizar un análisis considerando el valor mínimo sugerido (454 kg) para los 3 combustibles, y considerando 3 puntos de la operación; *Storage on-board*, *Carga combustible* y *Operación*.

2.3.2 Determinación del Factor Material

El Factor Material es el valor básico de partida, ya que es la medida de radio intrínseco a la energía desprendida generada por fuego o explosión producida por combustión o reacción química. Este factor es obtenido del facto de inflamabilidad (N_F) y reactividad (N_R) clasificaciones de la NFPA que entregan información de la inflamabilidad y reactividad (inestabilidad) de un listado de sustancias, el cual está identificado para cada sustancia en su respectiva hoja de datos de seguridad y tiene un valor que oscila de 1 a 40.

La tabla 2-1 enseña la metodología de determinación del Factor Material, según los factores anteriormente mencionados:

Tabla 2-1: Valores de factor del material

			Reactividad o Inestabilidad				
Líquidos & Inflamabilidad Combustibilidad	Gases o	NFPA 704	N _R = 0	N _R = 1	N _R = 2	N _R = 3	N _R = 4
No Combustible		N _F = 0	1	14	24	29	40
F.P > 200°F		N _F = 1	4	14	24	29	40
100 °F< F.P < 200 °F		N _F = 2	10	14	24	29	40
73 °F <F.P > 100°F or F.P < 73 °F and BP ≥ 100 °F		N _F = 3	16	16	24	29	40
F.P < 73 °F & BP < 100 °F		N _F = 4	21	21	24	29	40
Polvo o Neblina Combustible							
St-1 (Kst ≤ 200 bar m/sec)			16	16	24	29	40
St-2 (Kst = 201-300 bar m/sec)			21	21	24	29	40
St-3 (Kst > 300 bar m/sec)			24	24	24	29	40
Combustibles Sólidos							
Dense > 40 mm thick		N _F = 0	4	14	24	29	40
Open < 40 mm thick		N _F = 1	10	14	24	29	40
Foam, Fiber, Powder, etc		N _F = 2	16	16	24	29	40

Para el caso de estudio los 3 combustibles a evaluar son los de la figura 2-2.

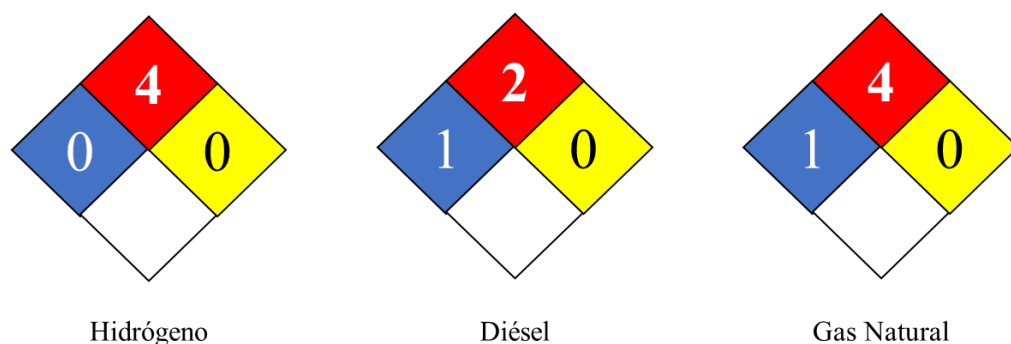


Figura 2-2: Rombos NFPA-704 para los combustibles en estudio (Hojas de seguridad)

La identificación de la figura 2-2 representa El rombo NFPA 704 consta de cuatro secciones de colores y números, que representan los siguientes elementos:

- Sección Azul (Salud): Representa el peligro para la salud asociado con el material. Se clasifica en una escala del 0 al 4, donde 0 indica ningún peligro y 4 indica un peligro severo para la salud. Indica los riesgos de toxicidad, irritación, sensibilización, corrosividad y otros efectos adversos para la salud.
- Sección Roja (Inflamabilidad): Representa el peligro de inflamabilidad del material. También se clasifica en una escala del 0 al 4, donde 0 indica ningún peligro de inflamabilidad y 4 indica un peligro extremo de incendio. Indica los riesgos de inflamabilidad, punto de inflamación, temperatura de autoignición y otros aspectos relacionados con la combustión.
- Sección Amarilla (Reactividad): Representa el peligro de reactividad del material. Nuevamente, se clasifica en una escala del 0 al 4, donde 0 indica ninguna reactividad y 4 indica un peligro extremo de reactividad. Indica los riesgos de explosividad, sensibilidad al impacto, reacciones químicas peligrosas y otros aspectos relacionados con la reactividad del material.
- Sección Blanca (Otros): Esta sección proporciona información adicional sobre otros riesgos especiales asociados con el material, como el uso de agua, radiactividad, oxidantes, corrosividad y otros peligros específicos.

Cada sección del rombo NFPA 704 se puede llenar con un número del 0 al 4, donde 0 indica ausencia de peligro y 4 indica un peligro extremo. Esta clasificación proporciona a los bomberos, personal de emergencia y otras personas información valiosa sobre los riesgos asociados con los materiales presentes en una ubicación determinada, lo que les permite tomar las medidas de seguridad adecuadas

Tomando en consideración la tabla 2-2, obtendremos los valores de Factor Material para nuestras sustancias de interés de estudio, el hidrógeno al tener un factor de inflamabilidad correspondiente al valor 4 y un índice de reactividad 0 se le otorga el valor 21 como Factor Material. De esta misma forma se procede con el diésel y el gas natural, para el caso del diésel tiene un factor de inflamabilidad de 2 y 0 de reactividad dando un FM de 10. Y

finalizando con el gas natural que su índice de inflamabilidad es 4 y el de reactividad es 0 se obtiene el mismo valor que se asignó al hidrógeno como FM, 21.

Tabla 2-2: Factor de material de los combustibles en estudio

Sustancia	Factor Material (FM)
Hidrógeno	21
Diésel	10
Gas Natural	21

2.3.3 Factor de riesgo de la Unidad de Proceso

El factor de riesgo para la unidad a estudiar del proceso, identificado como F₃, incorpora todos los factores que pueden llegar a contribuir en la ocurrencia de eventos que den como resultado incendios y explosiones en la unidad designada de procesos. Esto se obtiene como resultado de la siguiente ecuación:

$$F_3 = F_1 * F_2$$

Donde:

F₃ : *Factor de Riesgo de la Unidad de Proceso*

F₁ : *Factor de Riesgos Generales*

F₂ : *Factor de Riesgos Especiales*

2.3.4 Factor de Riesgos Generales (F₁)

Los factores de riesgos generales son los que juegan un rol primario en determinar la magnitud de un incidente.

Para la obtención de este factor hay una lista con 6 ítems que deben ser completados según corresponda para contribuir a un valor realista para su análisis.

2.3.4.1 Reacciones químicas exotérmicas

Esta penalización se aplica solamente se la unidad de proceso a estudiar corresponde a un reactor en el que reacciones químicas toman lugar.

Tabla 2-3: Penalización de reacciones químicas exotérmicas

Penalización	Tipo de reacción
0.30	Reacción Leve (hidrogenación, hidrólisis, isomeración, neutralización, etc)
0.50	Reacción Moderada (oxidación, polimerización, condensación, etc)
1.00	Reacción Crítica de Controlar (halogenación)
1.25	Reacción Particularmente Sensible (nitración)

Ya que la unidad de proceso de interés a estudiar no corresponde a un reactor que permita una reacción exotérmica, si no un vehículo, este valor será 0 para nuestras 3 sustancias.

2.3.4.2 Procesos Endotérmicos

Se considera una penalización de 0.20 si existe energía generada de un proceso endotérmico. En caso de esta energía ser proveniente de la combustión de un combustible, la penalización se ve incrementada a 0.40. Bajo estas consideraciones y teniendo en conocimiento el funcionamiento del vehículo impulsado por estos 3 tipos de combustibles se asignaron las penalizaciones:

Tabla 2-4: Penalización de procesos endotérmicos

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Storage on board	0	0	0

Carga combustible	0	0	0
Operación	0.20	0.40	0.40

Cuando se considera la penalización como 0 es debido a que no existe ningún tipo de reacción que se vea involucrado en el proceso, donde la unidad está actuando como almacenaje, y en el siguiente proceso está siendo cargado, ya sea el estanque o celda. Y donde si existen las penalizaciones es en la operación del vehículo, para el hidrógeno se asigna una penalización de 0.20 debido a que su operación es impulsada por la electrólisis, para el diésel y gas natural se asigna el valor de 0.40, ya que para su impulso debe ocurrir una combustión.

2.3.4.3 Manipulación y Transferencia de Materiales

Este ítem es evaluado considerando el potencial de fuego involucrado en la unidad de proceso durante su manipulación, transferencia y bodegaje de materiales.

- a. Cualquier carga o descarga donde un inflamable clase I o tipo GLP (gas licuado de petróleo) donde las líneas son conectadas desconectadas recibe una penalización de 0.50.
- b. También se debe considerar las penalizaciones basadas en los rangos establecidos por los límites de inflamabilidad:

Tabla 2-5: Penalización acorde al índice de inflamabilidad

Penalización	N _F
0.85	3 o 4 líquidos o gases inflamables
0.65	3 combustibles sólidos
0.40	2 combustibles sólidos
0.25	Combustible líquido, cuyo punto de inflamabilidad este entre 100 ° F y 140 ° F

Para los combustibles a estudiar el análisis que se realizó tomando como referencia el rombo de la NFPA 704 y al ser intrínseco para todos los procesos se asignan los valores de penalización de 0.85 al hidrógeno y al gas natural, mientras que al diésel recibe una penalización de 0.25 en los procesos de *Storage on board* y *Operación*, mientras que en el de *Carga combustible* sube a 0.50 debido al punto a. y el propio proceso, como se observa en la tabla a continuación:

Tabla 2-6: Evaluación de combustibles y tareas del proceso

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Storage on board	0.85	0.25	0.85
Carga combustible	0.85	0.50	0.85
Operación	0.85	0.25	0.85

2.3.4.4 Unidades encerradas o cubiertas

Evalúa la capacidad de mantener una estructura de libre ventilación que permita la rápida disipación de los materiales inflamables propios de la unidad, se considera por definición un área encerrada, cualquier espacio con techo y más de 3 muros o una estructura sin techo y 4 muros. Con esto las penalizaciones de interés son; se considera con una penalización de 0.60 cualquier proceso donde sean manejados líquidos o gases inflamables, donde un correcto diseño de ventilación mecánica permite reducir la penalización un 50%.

Ya que el espacio donde se encuentra la unidad es el mismo para las 3 unidades de procesos y los 3 combustibles se clasifican en la misma categoría el valor que se asigna es de 0.30 en todos los casos. Esto es debido a que se considera la disminución de 50% porque la unidad de proceso se encuentra en una mina subterránea donde por normativa existe una adecuada ventilación. Siendo reflejado en la tabla 2-7 que se presenta a continuación:

Tabla 2-7: Penalización por características de la unidad

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
--	-----------	--------	-------------

Storage on board	0.30	0.30	0.30
Carga combustible	0.30	0.30	0.30
Operación	0.30	0.30	0.30

2.3.4.5 Accesos

La penalización única es de 0.35 que debe ser aplicada en caso de que la unidad de proceso tenga como mínimo 2 accesos y al menos un acceso cercano a un camino. Debido a esto para todos los procesos y todos los combustibles como se encuentran en un espacio de difícil acceso, se otorga una penalización de 0.35, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2-8: Penalización por dificultad de acceso a la unidad

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Storage on board	0.35	0.35	0.35
Carga combustible	0.35	0.35	0.35
Operación	0.35	0.35	0.35

2.3.4.6 Drenajes y control de derrames

Este ítem evalúa las condiciones de diseño de los equipos participes de la unidad de proceso que podrían ocasionar grandes pozas de combustible líquido. Esta penalización va de 0.25 a 0.50 y como hace la salvedad de indicar que aplica para combustibles líquidos, se observa que en la tabla 2-9, el diésel es el único que recibe esta penalización y debido al sistema que emplea se considera la penalización como su valor mínimo, ya que los otros 2 combustibles son gaseosos, no aplica.

Tabla 2-9: Penalización por posibles derrames y fugas por el diseño de la unidad

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural

Storage on board	0	0.25	0
Carga combustible	0	0.25	0
Operación	0	0.25	0

Esta asignación de penalización corresponde a los riesgos generales del proceso (F1) entregando como resultado la siguiente tabla resumen:

Tabla 2-10: Riesgos generales del proceso

	F1		
	Storage on board	Carga combustible	Operación
H2	2.50	2.50	2.70
GN	2.50	2.50	3.20
Diésel	2.15	2.40	2.55

2.3.5 Riesgos especiales del proceso

Los riesgos especiales del proceso son factores que contribuyen a la evaluación del análisis, estas consisten en condiciones específicas del proceso que pueden provocar el aumento de un incendio o explosión. Existen 12 ítems que se dividen en las secciones a continuación.

2.3.5.1 Materiales tóxicos

La penalización asignada se basa en el factor de daño a la salud de la NFPA 704, donde el valor correspondiente (N_H) es multiplicado por un factor de 0.2 con el fin de obtener la penalización. Al ser un valor intrínseco a la tarea que se realice con el material, el valor será el mismo. El único combustible afectado es el gas natural, según indica su rombo acorde a la norma americana NFPA 704 tiene un riesgo a la salud de 1, que siguiendo la formula seria:

$$N_H * 0.20 = Penalización\ Materiales\ Tóxicos$$

Dando como resultado una penalización de 0.20 que afecta exclusivamente al gas natural, ya que, los rombos de los combustibles restantes no se identifican como un riesgo para la salud.

Tabla 2-11: Penalización por toxicidad del material

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Penalización	0	0	0.2

2.3.5.2 Presión subatmosférica

Esta sección solo aplica a procesos donde el ingreso de aire al sistema pueda crear un riesgo. La penalización es aplicada solamente si la presión absoluta del sistema es inferior a los 500 mm Hg, la cual es de 0.50.

Si la penalización es aplicada, no se debe duplicar o repetir la penalización, incluye a las secciones 2.2.6.3 “Operaciones dentro o cercanas al rango de inflamabilidad” y 2.2.6.5 “Presión de operación”.

Al no contar con procesos o sistemas que trabajen con una presión inferior a los 500 mm Hg, la penalización correspondiente es 0.00.

2.3.5.3 Operaciones dentro o cercanas al rango de inflamabilidad

Existen ciertas condiciones de operación las cuales pueden causar que aire ingrese al sistema. El ingreso de aire puede llevar a la formación de una mezcla inflamable y generar un riesgo. Esta sección trata de considerar las condiciones descritas a continuación:

- a. Almacenamiento de índice de inflamabilidad (N_F) 3 o 4 de líquidos inflamables, donde la penalización es de 0.50.
- b. Equipo de procesos o tanques de almacenamiento que se basa en un proceso de purga para evitar un riesgo generado de una mezcla inflamable y también aplica a los tanques de automóviles o barcas, conlleva una penalización de 0.30.

- c. Procesos u operaciones que por su naturaleza siempre estar dentro o cercanas al rango de inflamabilidad, ya que el sistema cuente con un sistema de purga o no, recibe una penalización de 0.80.

Para estos ítems la penalización aplicada será de 0.30 pero no se aplica en el “*Storage on board*”, ya que en el sistema no hay ningún tipo de operación para ninguno de los combustibles. Mientras que para la “*Carga combustible*” y “*Operación*”, se aplica la penalización de 0.30 por definición.

Tabla 2-12: Penalización por operación dentro o cercana al rango de inflamabilidad de la sustancia

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Storage on-board	0	0	0
Carga combustible	0.30	0.30	0.30
Operación	0.30	0.30	0.30

2.3.5.4 Explosiones de polvo

Este ítem tiene como fundamento entregar penalización de los polvos aplicados a cualquier unidad de proceso, tales como, transferencia, mezcla, molienda, empaque, etc. Mientras más grande sea la partícula la penalización que esta tenga será menor como muestra la tabla 2-13 Esta penalización es disminuida al 50% si se trata de un gas inerte.

Tabla 2-13: Penalización de polvo por tamaño de la partícula

Tamaño de la partícula (micrones)	Penalización
175 o mayor	0.25
150 a 175	0.50
100 a 150	0.75
75 a 100	1.25
Menor que 75	2.00

Debido a que ninguno de los combustibles de los sistemas a analizar se encuentra en formato de polvo, la penalización no aplica, por ende, ésta corresponde a 0.

2.3.5.5 Presión de operación

Al existir un sistema de equipos de procesos o almacenamiento en el que se encuentre una sustancia a presión mayor aumenta de manera directa con la criticidad de éste y que genere un riesgo. Con el fin de obtener el valor de la penalización de este se utiliza la ecuación que se muestra para la obtención de la presión absoluta del sistema:

$$y = 0.435 \log (P) * (1.2)$$

Donde:

P : presión absoluta (bar)

y : penalización

Se especifica un factor adicional a la penalización de 1.2 para gases comprimidos, el que se muestra en la fórmula anterior.

Considerando la presión con la está una celda de hidrógeno que es de 700 bar, la penalización corresponde a 1.50 en los procesos. Para el diésel esta penalización no aplica debido que los tanques no están a presión. Y en el caso del gas natural que se encuentra en el sistema sometido a 350 bar su penalización es de 1.30.

Tabla 2-14: Penalización por presión de la operación

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Storage on board	1.50	0	1.30
Carga combustible	1.50	0	1.30
Operación	1.50	0	1.30

2.3.5.6 Baja temperatura

Hace énfasis a la posibilidad que el acero carbono u otros metales del sistema del proceso se encuentren sometidos a bajas temperaturas que en ciertas condiciones puedan afectar la ductilidad o fragilidad del metal.

Las penalizaciones aplican si:

- a. El sistema del proceso utiliza una estructura de acero al carbono y es operada a la temperatura de transición de ductilidad / fragilidad, recibe una penalización de 0.30. Si no existe información disponible la temperatura de transición será asumida a 10 °C
- b. El material de construcción no es acero al carbono y opera a una temperatura igual o inferior a su temperatura de ductilidad / fragilidad, se aplica una penalización de 0.20.

Para el caso de los 3 combustibles, solamente se consideraría para el hidrógeno licuado, ya que para su condensación se requieren temperaturas de alrededor de los 20,28 grados Kelvin (−252,87 grados celsius/−423,17 grados fahrenheit), debido a que solo hace referencia al hidrógeno comprimido, por lo tanto, es una penalización de 0 para los 3.

2.3.5.7 Cantidad del producto (inflamable o inestable)

Esta sección considera la exposición adicional de áreas que contiene material inflamable o inestable en la unidad de proceso.

Para realizar este cálculo se acordó realizar una equivalencia de los combustibles tomando en consideraciones los valores mínimos que sugiere el IF&E para un adecuado cálculo del índice.

Existen 3 categorías y cada una tiene una formula independiente con la cual se calcula el factor de penalización.

1. Para los líquidos y gases inflamables o reactivos que se encuentran en proceso en la unidad de proceso se calcula usando la formula:

$$\log (y) = 0.305 * \log (e * Q) - 2.965$$

Donde:

e : calor de combustión (kJ / kg)

Q : cantidad de material inflamable o reactivo (kg)

y : penalización

Esta penalización aplicará tal como se muestra en la tabla 2-15 acorde al criterio del punto a. y el que de igual manera lleva un factor adicional a la penalización cuando la sustancia es un gas comprimido de 1.2.

2. Para los líquidos o gases inflamables o reactivos cuando estos se encuentran almacenados y se calcula con la formula:

$$y = \sqrt{185 - (\log \log \left(\frac{eQ * 10^{-9}}{700000} \right))^2} - 11.45$$

Donde:

e : calor de combustión (kJ / kg)

Q : cantidad de material inflamable o reactivo (kg)

y : penalización

Esta penalización aplicará tal como se muestra en la tabla acorde al criterio del punto b. y el que de igual manera lleva un factor adicional a la penalización cuando la sustancia es un gas comprimido de 1.2.

3. La última categoría corresponde a los materiales solidos combustibles inflamables o reactivos presentes en la unidad de proceso, que el factor de penalización se calculara en base a la fórmula:

$$y = \sqrt{55 - (\log \log \left(\frac{eQ * 10^{-9}}{270} \right))^2} - 6.4$$

Donde:

e : calor de combustión (kJ / kg)

Q : cantidad de material inflamable o reactivo (kg)

y : penalización

Tomadas todas las consideraciones de evaluaciones acorde a las características de los combustibles en las diferentes unidades dentro de las 3 categorías presentas tenemos como resultado la siguiente tabla:

Tabla 2-15: Penalización por la cantidad de producto (combustible o inestable) dentro de la unidad de proceso

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Storage on board	0.2	0.4	0.4
Carga combustible	0.7	0.6	0.7
Operación	0.7	0.6	0.7

2.3.5.8 Corrosión y erosión

A pesar del buen diseño que permite cierta corrosión y erosión, algunos de estos problemas pueden seguir ocurriendo en ciertas unidades de proceso generando un riesgo a considerar.

Las penalizaciones que se deben aplicar dependerán de los rangos de corrosión de la unidad del sistema:

- a. Para rangos de corrosión menores a 0.127 mm/año con riesgo de erosión local, la penalización es de 0.10.
- b. Para rangos de corrosión sobre 0.127 mm/año e inferior a 0.254 mm/año, la penalización es de 0.20.
- c. Para rangos de corrosión superiores a 0.254 mm/año, la penalización es de 0.50.
- d. Si existe un posible riesgo de desarrollar una ruptura, se aplica una penalización de 0.75.
- e. En caso de existir instrucciones de prevención de corrosión, se penaliza con un factor de 0.20. Sin embargo, si es solamente para proteger la unidad de proceso de desarrollar color no es necesario considerar una penalización.

Esta penalización solo va a ser considerada para el diésel con el factor de 0.10, debido a que, si aplica el rango de corrosión para aplicar esta penalización, mientras tanto los otros 2 combustibles al no ser considerados como elementos corrosivos su factor corresponderá a 0.

2.3.5.9 Fugas en uniones y empaquetaduras

La importancia del sellado de la uniones o empaquetaduras pueden ser fuente de fuga a su vez pudiendo generar un riesgo, se debe considerar un factor de penalización solamente si en la unidad de proceso se presenta alguna de las siguientes situaciones:

- a. La unidad de proceso que puedan dar lugar a fugas de pequeña importancia aplica una penalización de 0.10.
- b. Todos los procesos que normalmente producen problemas de fugas en las uniones, se aplica una penalización de 0.20.
- c. Las unidades de proceso en que los fluidos por naturaleza son penetrantes o dispersiones abrasivas que causen problemas de estanqueidad, penalización de 0.40.
- d. Ventanillas de observación, dispositivos de fuelles y juntas de dilatación deben considerar una penalización de 1.50.

En este ítem por la naturaleza de los combustibles analizados, al único que se le considerará una penalización será para el diésel en sus 3 tareas. Por otro lado, al ser combustibles gaseosos que se encuentra a presión y por el diseño del sistema se tomaran los valores de la siguiente tabla:

Tabla 2-15: Penalización por fugas en uniones o empaquetaduras de las sustancias en la unidad de proceso

	Hidrógeno	Diésel	Gas Natural
Storage on board	0	0.10	0
Carga combustible	0	0.20	0
Operación	0	0.10	0

2.3.5.10 Uso de equipo encendido

Esta penalización considera a las unidades de proceso que se identifican como equipos de combustión y como afecta la distancia de otros materiales combustibles cercanos a ésta. Se determina la penalización en base a la siguiente figura:

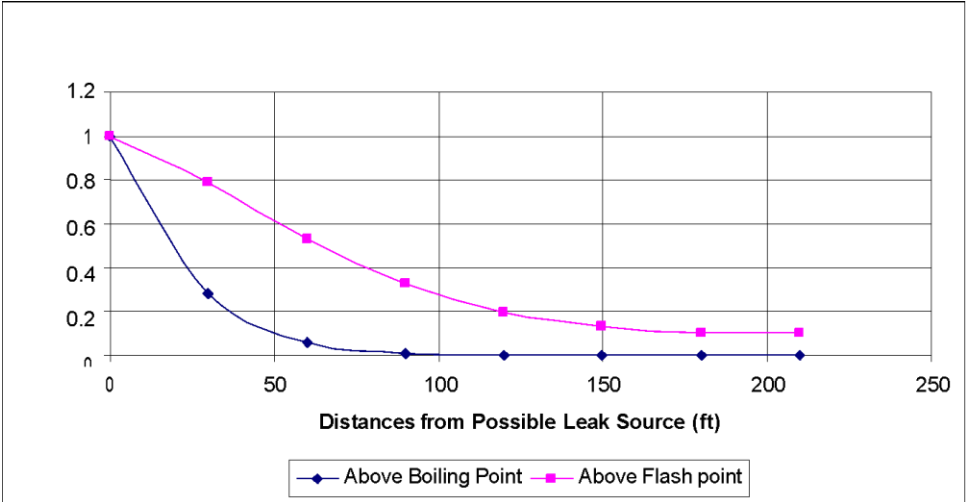


Figura 2-3: Curva de penalización de unidades de proceso identificada como equipos de combustión y la distancia de la unidad que afecta

Donde las curvas están determinadas por las siguientes características de aplicación acorde a las siguientes formulas, respectivamente:

- La primera curva se utiliza cuando existen sustancias liberadas por sobre su punto de inflamación y también considera el polvo combustible:

$$\log (y) = -3.3243 \left(\frac{x}{210}\right) + 3.7512 \left(\frac{x}{210}\right)^2 - 1.42523 \left(\frac{x}{210}\right)^3$$

- Y la segunda corresponde a una sustancia que este siendo liberada sobre su punto de ebullición:

$$\log (y) = -0.3745 \left(\frac{x}{210}\right) - 2.70212 \left(\frac{x}{210}\right)^2 + \left(\frac{x}{210}\right)^3$$

Donde, en ambas formulas:

y : penalización

x : distancia del pies (ft.)

2.3.5.11 Sistemas intercambio de aceite térmico

Partiendo desde que la mayoría del intercambio térmico de aceite caliente se quemará y frecuentemente son usados en la industria por sobre su punto de ignición o punto de ebullición, el cual representa un riesgo adicional que debe ser considerado en el análisis de la unidad de proceso. Para la cuantificación de esta penalización se hace referencia a la cantidad de material y temperatura de proceso:

Tabla 2-15: Penalización por cantidad de material y temperatura alcanzada con respecto a la sustancia en la unidad de proceso

Cantidad (gal)	Over Flash Point	Over Boiling Point
Menor a 5000	0.10	0.25
5000 a 10000	0.30	0.45
10000 a 25000	0.50	0.75
Mayor a 25000	0.75	1.50

Esta penalización no es considera para ninguna de las unidades de proceso de combustible, por lo que el factor de la penalización a aplicar a los 3 combustibles es 0, considerando los 3 tipos de operaciones.

2.3.5.12 Equipos rotativos

Esta sección reconoce el riesgo que tienen las unidades de proceso con exposición de largas piezas de equipo rotativo. La penalización para considerar es de 0.50 para todos los casos presentados a continuación:

- a. Compresor por sobre los 600 caballos de fuerza (hp).
- b. Bomba por sobre los 75 hp.

- c. Agitadores o mezcladores y bombas circulantes en la cual su fallo pueda provocar un proceso exotérmico debido a la falta de refrigerantes.
- d. Otros equipos rotativos de alta velocidad con un historial de pérdida importante.

La penalización para equipos rotativos no será considera, por ende, el factor a aplicar es 0.

Una vez cuantificados como penalización todos los riesgos de los ítems anteriormente presentados, se procede a realizar su sumatoria, el que nos entrega un valor que representa el F₂ de riesgos especiales del proceso, el cual se muestra en la tabla 2-16 de resumen:

Tabla 2-16: Penalización de los riesgos especiales del proceso.

	F2		
	Storage on board	Carga combustible	Operación
H2	2,66	3,44	3,44
GN	2,81	3,46	3,46
Diésel	1,77	2,41	2,31

2.4Factor de riesgo de la unidad

Con los factores F₁ y F₂, ya es posible calcular el factor F₃ de riesgo de la unidad de proceso y ocupando las fórmulas presentadas en la continuación de la introducción se muestra la tabla correspondiente a F₃:

Tabla 2-17: Resultado del índice F₃ de fuego y explosión

F3			
	Storage on board	Carga combustible	Operación
H2	6,65	8,60	9,29
GN	7,02	8,65	11,07
Diésel	3,80	5,79	5,90

2.5Resultado del análisis cuantitativo de riesgos

El cálculo del Índice de fuego y Explosión se usa para estimar el daño que podría resultar probable de un incidente en la unidad de proceso. Para este resultado se consideran varios factores que fueron previamente abordados en los puntos anteriores, el documento utilizado para la evaluación de este índice cuenta con una tabla de grados de peligro.

Los resultados obtenidos del índice son:

Tabla 2-18: Resultado de IF&E

F&EI Dow			
	Estacionado	Carga combustible	Operación
H2	140	181	195
GN	147	182	232
Diésel	38	58	59

Clasificados con referencia a la siguiente tabla:

Tabla 2-19: Grados de riesgos para el IF&E

Rango	Grado de Peligro
1 a 60	Liviano
61-96	Intermedio
97-158	Fuerte
>159	Severo

Que como se puede observar el diésel, por sus propiedades y características de almacenamiento y operación, se escapa definitiva de competencia en seguridad en comparación a los otros 2, debido a que son gases se encuentran sometidos a presión lo cual hace que las penalizaciones se disparen, entregando valores con un grado de peligro severo.

Ya descartando el diésel de la comparación con el hidrógeno por los bajos valores de peligro que presenta, como se aprecia en la tabla 2-18 que los valores del GN y H₂ son similares y pero de igual manera el hidrógeno es más competente por entregar resultados inferiores en las evaluaciones de las 3 tareas en el IF&E.

Por lo que intrínsecamente el uso de H₂ con las medidas de seguridad y preventivas correspondientes en el “storage on-board”, “carga combustible” y el vehículo en “operación” tiene la misma seguridad o incluso más que los vehículos que actualmente funcionan a través de gas natural

Los controles y gestión de los riesgos deben estar basados en estándares relevantes y procesos establecidos, como los mencionados y establecidos en este documento. Esto conlleva a que:

El diseño, infraestructura y equipos sean seguros;

El personal involucrado en los proyectos sea capacitado en seminarios de formación;

Se empleen planes de trabajo y de emergencia;

Se desarrollen medidas de seguridad preventivos y correctivos.

Es de clave importancia que la gestión no podrá ser llevada a cabo sin que todos los peligros del uso de hidrógeno en minería sean identificados, evaluados y controlados, a nivel normativo comparando lo que existe actualmente, con lo que han desarrollado otros países más avanzados para facilitar la explotación de investigación de esta implementación tan nueva en Chile.

Capítulo 3: ARMONIZACIÓN DE LA LEGISLACIÓN PARA EL USO SEGURO DE HIDRÓGENO

Introducción

La armonización de la legislación para el uso seguro del hidrógeno es esencial para desbloquear todo el potencial de esta fuente energética, garantizando al mismo tiempo la protección de las personas, el medio ambiente y los activos. Al establecer un marco regulatorio coherente y riguroso, se sientan las bases para una transición energética exitosa y sostenible, impulsando así el avance hacia un futuro más limpio y resiliente.

3.1 Normativas nacionales

Las normas nacionales son estatutos jurídicos que son creados por una necesidad de regular algún aspecto que la voluntad soberana quiera regular, es decir, el poder ejecutivo y judicial, en acuerdo con la Constitución. Estas regulaciones son de mandar, prohibir o permitir. Las normas se encargan de esta regulación de conducta, tanto de personas naturales o jurídicas.

Y por parte del INN, que es el Instituto Nacional de Normalización, es el encargado de la elaboración de normas que regulen cierta área en específico y siempre deben tener en cuenta las normas internacionales. Esto con el fin que el organismo pueda contribuir a la sociedad con el aseguramiento y mejora de la calidad a través del desarrollo de normas técnicas, acreditación de evaluación de la conformidad y certificaciones.

Con estas normas se debe buscar impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías y disposición de fondos para ser un líder en exportación y en la implementación del hidrógeno en la red principal de consumo de combustible y otras energías provenientes de fuentes de recursos finitos.

3.1.1 Ley n° 18410:1985

El objetivo de esta ley del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción es crear el organismo de la Superintendencia de Electricidad y Combustible como un servicio autónomo bajo el alero del Ministerio de Energía, sus principales actividades son el fiscalizar y supervigilar el cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentarias, y normas técnicas sobre la generación, producción, almacenamiento, transporte y distribución de combustibles líquidos, gas y electricidad, para así poder verificar que la calidad de los servicios que se presten a los usuarios sean señaladas en dichas

disposiciones legales o normativas antes que las operaciones y usos de los recursos energéticos constituyan un peligro para las personas o activos.

3.1.2 Ley n° 20417:2010

Esta ley del Ministerio Secretaría General de la Presidencia crea y establece la Superintendencia del Medio Ambiente, como un servicio público descentralizado, dotado de personalidad jurídica y patrimonio propio, bajo el alero del Presidente de la República a través del Ministerio del Medio Ambiente. Los organismos fiscalizadores que someterán a evaluación ambiental estratégica las políticas y planes de carácter normativo general, así como sus modificaciones sustanciales, que tengan impacto sobre el medio ambiente o la sustentabilidad.

3.1.3 Ley n° 19300:1994

Esta ley del Ministerio General de la Presidencia tiene como objetivo que los ciudadanos que residen en nuestro país tengan el derecho de vivir en un medioambiente protegido y libre de contaminación. También regula la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental. Estableciendo la regulación de los instrumentos de gestión ambiental como lo son, la “Evaluación Ambiental Estratégica” y el acceso a la información ambiental, además indica las responsabilidades por daño ambiental, cómo y quién fiscalizará lo previamente mencionado. E indica el fondo de protección ambiental en conjunto con la institución ambiental en nuestro país.

3.1.4 Decreto Supremo n° 132 del Ministerio de Minería, año 2004

Este decreto del Ministerio de Minería es el marco regulatorio general al que deben someterse las faenas de extracción minera a nivel nacional. Indica que cada faena quedará a cargo entre otras materias, del transporte dentro de las instalaciones, por otro lado, indica que los equipos mecanizados de cualquier naturaleza y envergadura deberán ser regulados por un reglamento establecido por la Administración de la faena, siendo avalada por el Servicio.

Quedando en manifiesto que el organismo regulador deja su función en manos de los titulares del proyecto el autorregularse mediante la elaboración de reglamentos internos.

3.1.5 Decreto Supremo n° 298 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, año 1995

Este decreto del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones es el documento que reglamenta y establece las condiciones, normas y procedimientos que son aplicables cuando se realiza el transporte de carga, por calles y caminos, de sustancias o productos que por sus propiedades y características sean peligrosas o representen algún tipo de riesgo para la salud de las personas, para la seguridad pública o el medioambiente.

Se consideran sustancias peligrosas las establecidas en las normas técnicas nacional NCh 382:2021 y Nch 2120.

Entrega directrices con respecto a las consideraciones básicas que debe tener u vehículo que transporte este tipo de sustancias tanto de la propia circulación de este, como del estacionamiento adecuado. Identificando a las personas que participan de dichas operaciones de transporte y de cuáles son las obligaciones y responsabilidad del trasportista. Además de cómo y quiénes puede realizar las fiscalizaciones, en este caso:

- Carabineros de Chile.
- Inspectores fiscales.
- Municipalidades.

3.1.6 Decreto Supremo n° 43 del Ministerio de Salud, año 2015”

La normativa que regula el almacenamiento de hidrógeno es el D.S. n° 43/ 2015 del Ministerio de Salud que aprueba el “Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas”. Considerando las características del hidrógeno es una sustancia identificada clase 2 que corresponde a “gases comprimidos, licuados, disueltos a presión o criogénicos” y por este mismo motivo es que son aplicables las regulaciones establecidas. Según lo establecido en esta regulación, toda instalación que almacene sustancias peligrosas por sobre las 10 *ton* de sustancias inflamables o 30 *ton* de otras clases de sustancias peligrosas requerirá de una autorización sanitaria para poder operar.

Establece que, para el almacenamiento de gases en cilindros, como el caso del hidrógeno (comprimido o criogénico), se deberá solicitar una autorización sanitaria si el área real destinada para el almacenamiento de cilindros llenos es superior a los 30 m^2 . Sumado a esto, se destaca en el reglamento que solamente las sustancias peligrosas se pueden almacenar en lugares especiales, los que se señalan en este mismo reglamento, de acuerdo a la cantidad que se almacene, la clase y su división de peligrosidad, según lo establece la NCh382:2021. Las sustancias peligrosas que sean almacenadas deben estar contenidas en

envases diseñados para impedir las pérdidas de contenido, deben ser adecuados para su conservación y ser de un material químicamente compatible con la sustancia, de difícil ruptura y que minimice eventuales accidentes.

Como requisito de las instalaciones de almacenamiento de sustancias peligrosas, están deberán tener un acceso controlado de personas, maquinarias y productos, que ingresan y salen.

Finalmente, todos los colaboradores de la instalación deben estar en conocimiento de los procedimientos de operación de la instalación, dejando registro por escrito disponible para cuando la autoridad fiscalizadora lo requiera.

3.1.7 Norma técnica nacional NCh 382:2021

La norma del INN establece la norma de clasificación de las mercancías peligrosas en clases y divisiones, presentando 2 listas para las mercancías peligrosas, el primero ordenado por la numeración entregada por las Naciones Unidas y las segunda entregando un listado por orden alfabético, indicando su peligro primario y cuando corresponda su peligro secundario. Y el número de guía GRE 2016 que da las recomendaciones de las primeras acciones a seguir en caso de presentarse alguna emergencia.

Como modo de información el siguiente listado entrega las mercancías peligrosas, abarcando mezclas y soluciones, incluidas en esta norma se clasifican en una de las 9 clases, consecuente al peligro inherente o los peligros mas significativos que representen, estos pudiendo tener consecuencias negativas para la salud de las personas, el medioambiente y/o la propiedad:

- Clase 1 – Explosivos, división desde el 1.1 a 1.6.
- Clase 2 – Gases, división del 2.1 a 2.3 (la identificación del H₂ es 2.1, es decir gas, división gas inflamable).
- Clase 3 – Líquidos inflamables.
- Clase 4 – Sólidos inflamables; sustancias que pueden experimentar combustión espontánea, sustancias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables, siendo las divisiones 4.1; 4.2; y 4.3 identificadas respectivamente.
- Clase 5 – Sustancias Comburentes y peróxidos orgánicos, teniendo las divisiones 5.1 y 5.2 respectivamente.

- Clase 6 – Sustancias tóxicas y sustancias infecciosas, siendo estas divisiones 6.1 y 6.2 respectivamente.
- Clase 7 – Materiales radiactivos.
- Clase 8 – Sustancias corrosivas.
- Clase 9 - Sustancias y objetos peligrosos varios, incluidas las sustancias peligrosas para el medioambiente.

3.1.8 Norma técnica nacional NCh 1377:1990

Establece, según el INN un sistema de marcas para la identificación del gas comprimido para uso industrial, contenido en cilindros: establece también las marcas para la identificación de las clases de riesgos y la forma en que deben presentarse las principales precauciones en los que respecta a la seguridad. Dentro de las consideraciones que las marcas deben incluir es:

- Nombre y fórmula química del producto o mezcla de gases del cilindro.
- Color correspondiente al contenido o colores acorde a los gases de la mezcla de su contenido.
- Las clases de riesgos a los que los usuarios del gas contenido se pueden encontrar expuestos y la forma en la que debe presentarse las principales precauciones de seguridad.
- La identificación del proveedor ya sea este cilindro de producción nacional o importado, incluyendo números de contacto de consultoría técnica durante las 24 horas.
- Un espacio para el número telefónico del centro de información toxicológica oficial, para los gases con riesgo de toxicidad.

El alcance de esta norma aplica a los cilindros destinados a contener gases para uso industrial, correspondientes a la clase 2 de las normas técnicas nacionales NCh382:2021 y NCh 2120/2.

3.1.9 Norma Chilena Oficial NCh 385:1955

Esta norma del Instituto Nacional de Normalización establece cuales son las medidas que se deben adoptar al realizar el transporte de materiales inflamables y explosivos. Señala además que la responsabilidad del cumplimiento de esta norma serán únicamente los jefes de las entidades transportadoras de este tipo de sustancias o mezclas. Además de amparar a los transportes por vías marítimas y fluviales entregando medidas de seguridad y consideraciones para su transporte seguro.

Dentro de los aplicables se consideran los siguientes lineamientos mandatorios, todo vehículo que transporte explosivos o materias inflamables deberá ser provisto de dos o más extinguidores tipo multipropósito de polvo químico seco y deberá arrastrar una cadena de hierro, los individuos no deben llevar consigo sustancias inflamables, y los envases en que se transporten explosivos deberán llevar un letrero bien visible, que advierta a todos el peligro inherente.

3.1.10 Norma Chilena Oficial NCh 1411/4:2000

La 4^{ta} parte de esta norma del Instituto Nacional de Estandarización se centra en establecer los riesgos relacionados con la salud, inflamabilidad y la reactividad de los materiales relacionando los riesgos que se pueden presentar al corto plazo por exposiciones agudas a estos. Entrega un método de identificación bastante simple y fácil reconocimiento, para así proporcionar una señalización apropiada y la información correspondiente para cuidar de la vida de los colaboradores, incluyendo emergencias y retiro de este tipo de residuos.

Para la aplicación de esta norma se consideran cualquier tipo de instalación que fabrique, procese, utilicen o almacenen estos materiales peligrosos. No aplicando para casos de exposiciones crónicas o exposiciones ocupacionales no asociadas al manejo de emergencias.

3.1.11 Norma Chilena Oficial NCh 2120/2:2004

La 2^{da} parte de la norma del INN considera un listado de los gases que se clasifican como sustancia peligrosa de la Clase 2, acorde a lo previamente establecido a la NCh382, junto con indicar las clases y divisiones, riesgo secundario, grupo de embalaje o envase, disposiciones especiales y el número de guía GRE (Guía de Respuesta en caso de Emergencia). La aplicación de esta norma se limita al transporte terrestre por territorio nacional, almacenamiento y manipulación asociados al transporte de los gases mencionados en el listado de sustancias peligrosas de la clase 2 y sus divisiones, con la finalidad de propender la seguridad de los colaboradores, infraestructura y medioambiente.

Clase 2.1 - Gases inflamables (Hidrógeno).

Clase 2.2 – Gases no inflamables, no tóxicos.

Clase 2.3 – Gases tóxicos.

3.1.12 Norma Chilena Oficial NCh 2190:2019

Esta norma del INN establece los requisitos de los distintivos de seguridad con los cuales se deberán identificar los peligros que presentan las mercancías peligrosas, esto incluye requisitos con respecto a las características de las marcas, etiquetas y rótulos, y como estos deben o no deben ser usados. Indica donde deberán ser dispuestos en el envase y en la unidad que lo transporta. Esta norma solamente aplica a las mercancías definidas por la NCh 382, exclusivamente transportadas por vías terrestres.

3.1.13Norma Chilena Oficial NCh 2245:2021

Esta norma del INN se encarga de definir las secciones, contenido y formato a nivel general de la Hoja De Seguridad (HDS) para todos los productos químicos, sustancias o mezclas dentro del territorio nacional. Aplica a las HDS que se deben preparar por los proveedores de productos químicos que ingresen sus productos a Chile.

Dentro de los requisitos se contemplan los siguientes puntos, el proveedor debe mantener las HDS actualizadas y proporcionar al receptor la edición más reciente. Cuando se trata de un kit, se debe generar y entregar una HDS para cada uno de los productos químicos que lo componen.

3.2Matriz legal nacional

Entrega una visión general de esta valiosa herramienta, resaltando su importancia para el cumplimiento normativo, la identificación de obligaciones legales y la promoción de la seguridad y la salud en el trabajo.

NORMA	TÍTULO	AÑO DE EMISIÓN	ORGANISMO	RESUMEN
Ley n° 18.410	Crea la Superintendencia de Electricidad y Combustibles	1985	Ministerio de Economía	Crear servicio autónomo y sus actividades son el fiscalizar y supervigilar el cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentarias, y normas técnicas sobre la generación, producción, almacenamiento, transporte y distribución de combustibles líquidos, gas y electricidad.

Ley n° 20.417	Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente	2010	Ministerio Secretaría General de la Presidencia	Crea un servicio público descentralizado, de fiscalizadores que someterán a evaluación ambiental estratégica las políticas y planes de carácter normativo general, así como sus modificaciones sustanciales, que tengan impacto sobre el medio ambiente o la sustentabilidad.
Ley n° 19.300	Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente	1994	Ministerio Secretaría General de la Presidencia	Regulaciones que respectan al cuidado entregando el derecho a un medioambiente libre de contaminación, regula y establece una “Evaluación Ambiental Estratégica” para su gestión. Indicando responsabilidades por daño ambiental y quien fiscaliza.
Decreto 43	Aprueba el reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas	2015	Ministerio de Salud	Establece las normas, condiciones y requisitos con las que deben constar los lugares de almacenamiento de sustancias peligrosas que se identifican acorde a la NCh 382.
Norma Chilena 382	Mercancías peligrosas - Clasificación	2021	Instituto Nacional de Normaliza ción	Establece una clasificación de las mercancías peligrosas en clase y división, de acuerdo al peligro más significativo que presentan en el

				transporte terrestre en territorio nacional. la identificación del H₂ es 2.1, es decir gas, división gas inflamable
Norma Chilena	Gases comprimidos – Cilindros de gas para uso industrial – Marcas para identificación del contenido y riesgos inherentes	1990	Instituto Nacional de Normalización	Considera las marcas, Nombre y formula química del producto o mezcla de gases del cilindro, Color o colores correspondiente al contenido, las clases de riesgos expuestos y las principales precauciones de seguridad, la identificación del proveedor y un espacio para el número telefónico del centro de información toxicológica oficial.
Norma Chilena 385	Medidas de seguridad en el transporte de materiales inflamables y explosivos	1955	Instituto Nacional de Normalización	Establece las medidas a adoptar todo vehículo que transporte explosivos o materias inflamables, este deberá tener dos o más extintores y deberá arrastrar una cadena de hierro, los individuos no deben llevar consigo sustancias inflamables, además, en el camino hay que apagar previamente todo fuego y cigarrillos.
Norma Chilena 2120/2	Sustancias peligrosas – Parte 2: Clase 2 - Gases	2004	Instituto Nacional de Normalización	Entrega el listado de los gases clasificados como sustancia peligrosa en la Clase 2, de acuerdo a NCh382, ordenado alfabéticamente, donde

				encuentra el hidrógeno. Y los clasifica en Gases inflamables, no inflamables, no tóxicos y tóxicos.
Norma Chilena 2190	Transporte de sustancias peligrosas – Distintivos para identificación de riesgos	2019	Instituto Nacional de Normalización	Indica requisitos de los distintivos de seguridad con los cuales se deberán identificar los peligros que presentan las mercancías peligrosas, esto incluye requisitos con respecto a las características de las marcas, etiquetas y rótulos, y como estos deben o no deben ser usados. Esta norma solamente aplica a las mercancías definidas por la NCh 382, exclusivamente transportadas por vías terrestres.
Norma Chilena 2245	Hoja de datos de seguridad para productos químicos – Contenido y orden de las secciones	2021	Instituto Nacional de Normalización	Define las secciones, contenido y formato a nivel general de la Hoja De Seguridad (HDS) para todos los productos químicos, sustancias o mezclas dentro del territorio nacional. Aplica a las HDS que se deben preparar por los proveedores de productos químicos que ingresen sus productos a nuestro país.

3.3 Normativas internacionales

Para este apartado lo que se hizo fue realizar un análisis de las normas internacionales en lo que respecta a la seguridad en el uso del hidrógeno como combustible y que a su vez podrían ser usadas en el país.

Donde de almacenamiento, que es definido como el proceso de guardar hidrógeno en cualquier estado y por cualquier periodo. Incluye los procedimientos, instalaciones y equipos necesarios para recibir y guardar cantidades determinadas de hidrógeno. se destacan regulaciones norteamericanas en lo que respecta al apoyo que ofrecen. Donde destaca el:

- Estudiar y actualizar la regulación chilena de ambientes de trabajo con atmosfera explosiva, equipos a presión, fluidos criogénicos e hidrógeno,
- Estudiar la regulación del uso de hidrógeno en celdas de combustible,
- Estudiar y, eventualmente actualizar la regulación chilena de almacenamiento de sustancias peligrosas
- Contemplar la posibilidad de unificar un reglamento para todos los tanques o celdas de combustibles.

De los documentos a tomar en consideración está el NFPA (por sus siglas en inglés, que significa en español Asociación Nacional de Protección contra el Fuego) 2, que es el código de tecnologías del hidrógeno, donde este código provee las salvaguardas fundamentales para la generación, instalación, almacenamiento, tuberías, uso y manipulación del hidrógeno en formato de gas comprimido o liquido criogénico; ASME (Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos) y BPVC (Código ASME de calderas y recipientes a presión), que es el código para calderas y recipientes a presión estandarizado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos, donde se regula el diseño y la construcción de recipientes a presión; CGA H-2, es la guía para clasificación y etiquetado de sistema de almacenamiento de hidrógeno con hidrógeno absorbido en híbridos de metales reversibles de la Asociación de Gases Comprimidos; EIGA 100/11 de la Asociación Europea de Gases Industriales que describe las experiencias industriales con cilindros de hidrógeno y tanques de transportes y provee un numero de recomendaciones para la especificación, manufactura, prueba, mantenimiento y armado de los cilindros y tanques; ISO 16111:2018 (Organización Internacional de Normalización) que habla de los dispositivos de almacenamiento en el transporte de gas, específicamente del hidrógeno absorbido en hidruro metálico reversible; Directiva de equipos a presión transportables

2010/35/UE (Unión Europea), unifica y regula la seguridad de las condiciones de transporte de mercancías peligrosas en la Unión Europea

Por otro lado, se propone buscar puntos de acercamiento con Uruguay en la implementación de la estrategia País de Hidrógeno Verde, figura3-1, en lo que es:

- Comité de trabajo bilateral para el intercambio de información.
- Compartir experiencia respecto de la búsqueda, generación e implementación de la normativa técnica.
- Intercambio de lecciones aprendidas en la aplicación de la normativa técnica al desarrollo de proyectos durante la etapa de transición mientras se genera la normativa.
- Intercambio de experiencias en la aplicación del mapa de ruta y su evolución en el tiempo.
- Trabajo interministerial para generación de la nueva normativa y todo otro que pueda ser de beneficio para ambos países.



Figura 3-1: Estrategia país de hidrógeno verde Uruguay – H2Uruguay.

En ese análisis se puede visibilizar el camino y el foco que debe tomar Chile para poder posicionarse como uno de los líderes exportadores de esta energía en los inicios del boom. Además, al ser un tema que aún no tiene una fuerte regulación vigente, queda adaptar lo actual e incluir las nuevas experiencias para desarrollar normativas que aborden temáticas de exportación, fiscalización de las empresas asociados a este nuevo rubro y seguridad para los colaboradores y usuarios que a diario se ven expuestos a los riesgos inherente del manejo de hidrógeno comprimido.

En Chile, la legislación relacionada con el hidrógeno se basa en leyes y regulaciones que abarcan aspectos como la protección ambiental, la energía renovable y la eficiencia energética. Estos marcos legales incluyen principios para la protección ambiental y evaluación de impacto ambiental, regulación del sector eléctrico, promoción de energías renovables no convencionales y fomento de la eficiencia energética. Además, la Comisión Nacional de Energía ha establecido normativas y lineamientos específicos, como la "Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde", para impulsar la producción y uso de hidrógeno verde en el país.

En Uruguay, la legislación relacionada con el uso de hidrógeno se enmarca en la política energética y ambiental del país. Existen leyes y regulaciones que promueven y desarrollan fuentes de energía renovable, sin mencionar explícitamente al hidrógeno. Estas leyes incluyen incentivos fiscales y beneficios para la generación de energía renovable. También hay legislación que regula la generación, transmisión y comercialización de energía eléctrica, aunque no se centra específicamente en el hidrógeno. Además, se cuenta con una ley que establece procedimientos para evaluar el impacto ambiental de proyectos, lo que podría incluir aquellos relacionados con el hidrógeno.

Entregando donde Chile debe apuntar si desea impulsar el hidrógeno como combustible para transformarlo en una alternativa real de combustible alternativa no tan solo para la industria minera, si no que emplearlo en todo nivel, desde uso industrial al uso cotidiano.

Conclusión

Acorde a lo desarrollado en el presente trabajo de título se puede concluir que los pasos claves para los análisis es de identificación de riesgos y evaluación de peligros, caracterizando al hidrógeno que es un combustible en implementación en Chile, como un gas que se disipa rápidamente en una atmosfera normal debido a que es uno de los elementos mas livianos de la tabla periódica, que presenta un amplio rango de inflamabilidad entre 4% y 75% , y además en el formato a usar en el proyecto viene presurizado a valores entre los 350 – 700 bar. Y al ser comparado con los 2 combustibles más usados en faenas mineras, Diesel y gas natural, se ve como un candidato mas sustentable ni tan peligroso como se supone con las debidas medias para su uso seguro.

Esta premisa establecida de la comparación de las características de estos combustibles se debía sustentar en una base cuantitativa, al realizar el análisis del Índice de Fuego y Explosión de Dow Chemical se consideraron 3 tareas reales de la operación de un vehículo y nuevamente se comparó con los otros 2 combustibles, al tener la limitante de las tareas se consideró, el almacenamiento, la carga de combustible y el vehículo encendido. Donde los resultados evidenciaron que el riesgo asociado al hidrógeno según los grados de riesgo era similar al Gas Natural, pero se distancian del diésel debido al formato usado, que son gases comprimidos. Pero por otro lado el riesgo consecuencia de una ignición por las características del diésel hace que sea imposible controlar una fuga con simples sistemas de ventilación como los que ya se tienen implementados por norma en minería.

La armonización vislumbro que aun no existe normativa aplicable de manera directa al uso del hidrógeno como combustible y menos aun una que regule su uso para vehículos usados en faenas mineras, específicamente en túneles mineros subterráneos, al contemplar las normativas internacionales, ya existen planes de regulación de uso de este gas y estrategias de desarrollo para países que todavía no desarrollan la legislación competente. Conjunto con esto se entregan recomendaciones de medidas de mitigación de riesgos en base a la pirámide de jerarquización de control, para el uso seguro del hidrógeno a bordo de vehículos de operación minera subterránea.

BIBLIOGRAFÍA

1. HAKIM S. Sultan Al-Jibori, et. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects: Case Study in Baghdad-Iraq. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol:14 No:02. 2004
2. RIFKIN, Jeremy. La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la tierra. Cuarta edición. Barcelona. Editorial Paidós, 2002. ISBN 9788449312809.
3. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>
Agencia Internacional de la Energía. Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total). Grupo Banco Mundial. sa.
4. Farrow, A., Miller, K.A. & Myllyvirta, L. Toxic air: The price of fossil fuels. [En línea]. Seoul: Greenpeace Southeast Asia. February 2020.
<<https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2020/02/TOXIC-AIR-Report-110220.pdf>>
5. REN21.2022. Renewables 2022 Global Status Report. [En línea] París, Francia.
<https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf> [2022]
6. La Economía del Hidrógeno Jeremy Rifkin
RIFKIN, Jeremy. La economía del hidrógeno. Cuando se acabe el petróleo. Tercera edición. Barcelona. Ediciones Paidós Ibérica; tra edición. 2007. ISBN 8449319609
7. Fundación Naturgy. Hidrógeno; vector energético de una economía descarbonizada. Segunda edición. Madrid. Fundación Naturgy. 2020. ISBN 978-84-09-22546-0.
8. Revista Azul y Verde. Madrid, España. Enagás, actor relevante en la transición energética. (36). 2019.
9. GOMEZ, Garcia, Karelyn Rincón Bernal, Christian José Banguero Escobar, Rubén Darío. Producción limpia y sustentable: Un análisis a las fuentes de energía renovable. Universidad de Cali. Cali, Colombia. 2019.
10. The Forever Fuel: The Story Of Hydrogen Escrito por Peter Hoffmann
HOFFMANN Peter. The Forever Fuel: The Story Of Hydrogen. Primera edición. Londres. Routledge. 2019. ISBN: 978-0367292256.
11. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. Safe use of hydrogen. Washington. Estados Unidos. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.

12. Dirección General de Comunicaciones. Proyecto de la USM implementa camioneta eléctrica movida por hidrógeno. Santiago, Chile. Cuatro de Noviembre de 2020. Universidad Técnica Federico Santa María.
13. Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile. ¿Quiénes Somos? Ministerio de Energía. 2014.
14. International Union of Pure and Applied Chemistry. Compendium of chemical terminology. Tercera edición. [en línea]. Stuar Chalk. <<https://goldbook.iupac.org>>. [2021].
15. FINESCHI F., Carcassi M. N. Deflagrations of H₂-air and CH₄-air lean mixture in a vented multi/compartment environment. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544204000532?via%3Dihub>>. [2021].
16. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. [En línea]. Volumen n 99. La Rioja, España. Luis Gutierrez Jodra. 2005. <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1974767>>. [2020]. ISSN 1137-214.
17. MATTALIA, Mauricio José; SACCO, Daiana Elizabeth. Producción de hidrógeno por reformado catalítico de glicerol. 2020
18. LÓPEZ, Cayetano. La quimera del hidrógeno. *Boletín CF+ S*, 2008, no 37.
19. EDWARDS R. et al. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context. [En línea]. Edición 2c. Francia. Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission's Joint Research Center. <https://web.archive.org/web/20110720162258/http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/TTW_Report_010307.pdf> . [2020].
20. EMPRESA NACIONAL DEL PETRÓLEO. Petróleo Diesel Grado A1. [En línea]. <https://www.enap.cl/pag/121/1306/petroleo_diesel_grado_a1>. [2020].
21. PINEDO Mikel. Estudio de viabilidad técnico-económica del uso de gases combustibles en el transporte ferroviario. (Ingeniería de los recursos energéticos). Cantabria, España. Universidad de Cantabria. Diciembre de 2019.
22. Scientia et Technica año XV.[En línea]. Edición n 41. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. CARRANZA Yamid, ROMERO Carlos. Mayo de 2009. <<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/2863/1625>>. [2021]. ISSN 0122/1701.
23. METROGAS. Sobre el gas natural: Características. [En línea]. <<http://www.metrogas.cl/industria/caracteristicas>>.
24. DE TROYA José, CARRAL Luis, ALVAREZ Carlos, Rodriguez Maria. [En línea]. La Coruña, España. E.T.S. de Náutica y Máquinas, Universidad de La Coruña. [2021].

25. PONCE Javier. Comparación del coste de la energía. [En línea]. Albacete, España. FormaTec. <<http://javiponce-formatec.blogspot.com/2013/02/comparacion-del-coste-de-la-energia.html>>.[2021].
26. Bansode V., Verma M., Pandhare A., Shinde S. Prediction of cavitation inside mini-sac Diesel injector nozzle using computational fluid dynamics. [En línea]. Journal of mechanical and energy engineering. 2 de Marzo de 2022. Volumen 6. <<https://www.jmee.tu.koszalin.pl/ojs/index.php/jmee/article/view/267>>.
27. INDURA grupo Air Products. Hoja de datos de seguridad: Hidrógeno. [En línea]. Santiago, Chile. 7 de marzo de 2018. <https://www.indura.cl/content/storage/cl/producto/b6be26499348428cb7a9e9f7082eb791.pdf>
28. ESMAS distribución. Hoja de datos de seguridad: diesel. [En línea]. Santiago, Chile. 31 de julio de 2020. <https://www.petrobrasdistribucion.cl/wp-content/uploads/2020/08/HDS_DIESEL.pdf>.
29. INNERGY. Hoja de datos de seguridad: gas natural. [En línea]. <<https://www.innergy.cl/files/Integridad/03.CONAF/Gasoducto%20Innergy/Guías%20Seguridad%20Gasoductos%20GN/HDS%20GAS%20NATURAL.pdf>>.
30. MCCARTHY Kieran. Long/run energy planning of hydrogen/based power and transport sector in Italy. [En línea]. Madrid, España. Escuela tecnica superior de ingenieros industriales, Universidad politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/69601/1/TFM_KIERAN_MCCARTHY_VALDERRAMA.pdf>. [2021].
31. ALVARADO Alfaro, Emanuel Elías. Proyecto de planta de producción de hidrógeno verde para necesidades nacionales (Ingeniero Civil Mecánico). Santiago, Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2022.
32. VACCARO G. Jose Manuel. Hidrógeno verde desde la perspectiva de la seguridad. [Presentación PowerPoint]. Santiago, Chile. Foroenergético - Gremio Prevención. Junio 2021. 44 diapositivas.
33. AGUADO Molina Roque, CASTELEIRO Roca Jose Luis, et. Hidrógeno y su almacenamiento. [En línea]. Coruña, España. <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/27268/Aguado_Molina_2021_Hidrógeno_y_su_almacenamiento.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. [Enero 2021].
34. LIN Zhenhong, OU Shiqui, ELGOWAINY Amgad, et. A method for determining the optimal delivered hydrogen pressure for fuel cell electric

vehicles. [En línea]. Edición 216. Applied Energy.

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918301661>>.

[Enero 2021].

35. QIU Yinan, YANG Huan, et. Research progress of cryogenic materials for storage and transportation of liquid hydrogen. [En línea]. Brest, France.

ARRIGONI Michel. <<https://www.mdpi.com/2075-4701/11/7/1101>>. [Agosto 2021].

ANEXOS



Analysis.xlsx (1).pdf



afiche-20-reglas-de
-oro-original.pdf

Elemento de protección personal	Imagen referencial	Link cotización	Valor (\$CLP)
Casco con barbiquejo y linterna		https://www.steelprosafety.com/casco-mta-abs-portalampara-amarillo-100/p	14500
Lentes de seguridad		https://www.apro.cl/lente-spy-flex-plus/p?idsku=4870&gclid=CjwKCAjwkLCkBhA9EiwAka9QRl5pYd3dYVcVTm5gCGdoPUWx8x920rJX6j5cOxrluf9wPo9NSBiADxoCaswQAvD_BwE	2905
Autorrescatador		https://www.segurycel.cl/autorescatador-kbeen-v-1/p	67793
Respirador medio rostro		https://www.apro.cl/respirador-3m-6300-m-rostro-t-l/p?idsku=4357&gclid=CjwKCAjwkLCkBhA9EiwAka9QRhogiiZhLS9T0cy5v4pCLzwH3sBMhrlqqKt8reZw4MqdAXediYsuXBoC0FwQAvD_BwE	14831
Filtro respirador		https://www.apro.cl/filtro-3m-6003-p?idsku=3172&gclid=CjwKCAjwkLCkBhA9EiwAka9QRsXbNtN4xwhwNzPt-ybPeW_ri7olglH8BYmTWAAbmz2Sy7705soKxRoCWlOQAvD_BwE	16949
Guantes multipropósito		https://www.apro.cl/guante-steelpro-executive-impact/p	14930
Calzado de seguridad		https://www.apro.cl/bota-tecnica-hw-bering-hiker-c-thinsulate/p?idsku=2099&gclid=CjwKCAjwkLCkBhA9EiwAka9QRtNTU6PGH7Yz2-mnNsJ2gqz0xv6Adh5Fdj2xajz1sE2xXqVI6PgzxBoC5wkQAvD_BwE	52484

