



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA QUÍMICA**



**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DEL USO DE HIDRÓGENO Y AMONÍACO  
VERDES EN TRANSPORTES DE FERROCARRILES EN CHILE**

POR

**<Mario Alfonso Bao Mora>**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción  
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesor Guía:  
Dr. Fernando Márquez  
Dr. Juan Carraco

Profesor Comisión:  
Dr. Andrés Mejía

Marzo 2025  
Concepción (Chile)

© 2025 Mario Alfonso Bao Mora

© 2025 Mario Alfonso Bao Mora Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta memoria de título.

A mis profesores guías, el Dr. Fernando Márquez, el Dr. Juan Carraco, y también al ingeniero Thor Gallardo por su constante apoyo, orientación y valiosos consejos a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos y experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A la empresa Ferrocarril Antofagasta Bolivia (FCAB) y a la empresa de Amogy por facilitarme información fundamental en el desarrollo de esta memoria de título

A mis padres y familia por su incondicional apoyo, comprensión y motivación durante todos estos años de estudio. Sin su respaldo, este logro no habría sido posible.

Finalmente, a mis amigos, en especial a Ángela y Marcelo por compartir momentos de esfuerzo y alegrías, y por ser un pilar fundamental en este camino.

A todos, muchas gracias.

*Esta memoria está dedicada...*

A mis familiares que están en el cielo. También, a mis caballos me entregaron una motivación gigantesca durante estos años de carrera.

## **Resumen**

En esta memoria de título se realiza un estudio técnico-económico de la utilización de hidrógeno y amoníaco verdes como combustibles en el transporte de ferrocarriles en el norte de Chile.

Este estudio se basa en búsquedas bibliográficas, realizando con ellos balances de energías, cálculos de consumo de combustible y cálculos de costos de equipos para su debida implementación, y de esta manera realizar una comparación entre los tres combustibles.

Este estudio se basa en parte en el tren de FCAB, de donde se rescatan las características más importantes de este tren, como su potencia, peso, velocidad, recorrido, etc. El tren de hidrógeno verde está compuesto por un sistema de pilas de combustible y de baterías de potencia. Por su parte, el tren de amoníaco verde está formado principalmente con un sistema llamado Amogy Powerpack, que es un sistema integrado de reactor de craqueo, un absorbedor y celdas de combustibles.

El hidrógeno verde presenta una eficiencia energética del 59%, siendo muy superior a las eficiencias del amoníaco verde y del diésel, esto se ve reflejado en la baja cantidad de kilogramos de hidrogeno verde que se necesitan para realizar cierto recorrido.

En temas de costos anuales de combustible y de su transporte, el amoníaco verde es el que presenta mayores valores para estos costos anuales. Para los costos de equipos y de estanque específicos para cada tren, el que presenta mayores costos es el hidrógeno verde y esto se debe en gran parte por la alta presión en la que se almacena este combustible.

A pesar de los desafíos técnicos y económicos identificados, los resultados de este estudio demuestran que la adopción de hidrógeno y amoníaco verde en el transporte ferroviario del norte de Chile representa una alternativa viable y sostenible con el tiempo.

## **Abstract**

This thesis presents a technical-economic study of the use of green hydrogen and ammonia as fuels in railway transport in northern Chile.

This study is based on bibliographic searches, carrying out energy balances, fuel consumption calculations and equipment cost calculations for their proper implementation, and in this way making a comparison between the three fuels.

This study is based in part on the FCAB train, from which the most important characteristics of this train are extracted, such as its power, weight, speed, travel, etc. The green hydrogen train is composed of a fuel cell system and power batteries. For its part, the green ammonia train is mainly made up of a system called Amogy Powerpack, which is an integrated system of a cracking reactor, an absorber and fuel cells.

Green hydrogen has an energy efficiency of 59%, which is much higher than the efficiencies of green ammonia and diesel, as reflected in the low number of kilograms of green hydrogen needed to make a certain journey.

In terms of annual fuel costs and their transportation, green ammonia is the one with the highest values for these annual costs. For the costs of equipment and tanks specific to each train, the one with the highest costs is green hydrogen, and this is largely due to the high pressure at which this fuel is stored.

Despite the technical and economic challenges identified, the results of this study demonstrate that the adoption of green hydrogen and ammonia in rail transport in northern Chile represents a viable and sustainable alternative over time.

## Tabla de Contenidos

Resumen .....	I
Abstract.....	II
Lista de Tablas .....	VI
Lista de Figuras .....	VIII
Nomenclatura.....	X
1. Introducción .....	1
1.1. Marco teórico.....	2
1.1.1. Hidrógeno .....	2
1.1.2. Tipos de Hidrógenos.....	2
1.1.3. Obtención de Hidrógeno Verde.....	2
1.1.4. Almacenamiento de Hidrógeno Verde .....	3
1.1.5. Pilas de combustible y baterías de potencia .....	3
1.2. Amoníaco .....	3
1.2.1. Tipos de amoníaco.....	4
1.2.2. Amoníaco Verde.....	4
1.2.3. Obtención de Amoníaco .....	4
1.2.4. Almacenamiento de Amoníaco Verde.....	4
2. Objetivos .....	6
2.1. Objetivo General.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. Metodología .....	7
3.1. Estudio técnico de combustibles .....	7
3.1.1. Características generales y ubicación del proyecto .....	7
3.1.2. Balance de Energía para un tren.....	8
3.1.3. Consumo de combustible para tren de diésel .....	9
3.1.4. Consumo de combustible para tren de hidrógeno verde.....	10
3.1.5. Consumo de combustible para tren de amoníaco verde .....	13

3.1.6.	Eficiencia energética de los combustibles .....	16
3.1.7.	Infraestructura y logística para el suministro de combustibles.....	16
3.2.	Estudio económico de los combustibles.....	16
4.	Resultados y discusión .....	18
4.1.	Resultados técnicos .....	18
4.1.1.	Balance de energía del ferrocarril.....	18
4.1.2.	Consumo de combustible de cada ferrocarril .....	19
4.1.3.	Eficiencia energética de los combustibles .....	20
4.1.4.	Espacio ocupado por los equipos al interior del ferrocarril.....	20
4.1.5.	Análisis de riesgo en la utilización de hidrógeno y amoníaco verde.....	21
4.2.	Resultados económicos .....	22
4.2.1.	Costos de combustible de cada ferrocarril.....	22
4.2.2.	Costos de transporte de combustible de cada ferrocarril.....	23
4.2.3.	Costos de estanques en la zona de repostaje para cada ferrocarril .....	24
4.2.4.	Costos de estanques al interior de cada tren .....	24
4.2.5.	Costos de equipos para los trenes de hidrógeno y amoníaco verde .....	25
4.2.6.	Resumen de costos anuales.....	29
4.2.7.	Resumen de costos de los equipos.....	30
4.2.8.	Costos de hidrógeno y amoníaco verde para el 2030 .....	33
4.3.	Análisis técnico-económico de los combustibles .....	34
5.	Conclusiones .....	37
6.	Referencias .....	39
7.	Anexos.....	41
7.1.	Anexo A.....	41
7.1.1.	Propiedades del hidrógeno.....	41
7.1.2.	Electrolizadores .....	41
7.1.3.	Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.....	43
7.1.4.	Propiedades del amoníaco .....	46
7.1.5.	Tipos de amoníaco.....	47
7.1.6.	Proceso de producción de amoníaco verde.....	47

7.1.7.	Ferrocarriles y consumo de energético en el norte de Chile.....	48
7.1.8.	Recorrido tren FCAB .....	50
7.1.9.	Catálogo pilas de hidrógeno Hydrogenics - Cummins.....	50
7.2.	Anexo B.....	51
7.2.1.	Balance de energía del ferrocarril.....	51
7.2.2.	Consumo de combustible para una locomotora a diésel.....	52
7.2.3.	Consumo de combustible para tren de hidrógeno verde.....	53
7.2.4.	Consumo de combustible para tren de amoníaco verde .....	56
7.2.5.	Eficiencia energética de los combustibles .....	60
7.2.6.	Estimación de costos de combustible para tren a diésel.....	62
7.2.7.	Estimación de costos de combustible para tren de hidrógeno verde .....	62
7.2.8.	Estimación de costos de combustible para tren de amoníaco verde.....	63
7.2.9.	Estimación de costos de transporte de diésel .....	63
7.2.10.	Estimación de costos de transporte de hidrógeno verde.....	64
7.2.11.	Estimación de costos de transporte de amoníaco verde .....	65
7.2.12.	Estimación de costos de estanque de diésel en zona de repostaje .....	65
7.2.13.	Estimación de costos de estanque de hidrógeno verde en zona de repostaje.....	67
7.2.14.	Estimación de costos de estanque de amoníaco verde en zona de repostaje .....	69
7.2.15.	Estimación de costo de estanque de tren de diésel .....	70
7.2.16.	Estimación de costo de estanque de tren de hidrógeno verde .....	71
7.2.17.	Estimación de costo de estanque de tren de amoníaco verde.....	73
7.2.18.	Estimación de costos de equipos para el tren de hidrógeno verde .....	74
7.2.19.	Estimación de costos de equipos para el tren de amoníaco verde.....	77
7.2.20.	Estimación de costos de combustible para tren de hidrógeno verde para el año 2030	81
7.2.21.	Estimación de costos de combustible para tren de amoníaco verde para el año 2030	81
7.3.	Resumen FI.....	83

## Lista de Tablas

Tabla 3-1: Características generales del tren de hidrógeno de FCAB. ....	7
Tabla 3-2: Especificaciones AKASYSTEM 9 AKM 150 CYC (Borgwarner, s. f.). ....	12
Tabla 4-1: Valores de las resistencias para el tren de FCAB. ....	18
Tabla 4-2: Resistencia total y potencia de las resistencias del tren de FCAB. ....	18
Tabla 4-3: Consumo de combustible de tren diésel para un recorrido de 150 km. ....	19
Tabla 4-4: Consumo de combustible de tren hidrógeno verde para un recorrido de 150 km. .....	19
Tabla 4-5: Consumo de combustible de tren amoníaco verde para un recorrido de 150 km. .....	20
Tabla 4-6: Eficiencias energéticas de los combustibles. ....	20
Tabla 4-7: Volumen de los equipos principales al interior del tren de hidrógeno verde. ....	20
Tabla 4-8: Volumen de los equipos principales al interior del tren de amoníaco verde. ....	21
Tabla 4-9: Resumen de consumo y costo de diésel. ....	22
Tabla 4-10: Resumen de consumo y costos de hidrógeno verde. ....	23
Tabla 4-11: Resumen de consumo y costos de amoníaco verde. ....	23
Tabla 4-12: Costo anual de transporte para cada combustible. ....	23
Tabla 4-13: Costo de compra y costos instalado para estanques de repostaje para cada combustible. ....	24
Tabla 4-14: Costo de compra y costos instalado para estanque al interior de cada combustible. .....	25
Tabla 4-15: Costos de compra y costos instalado para el compresor de hidrógeno de 50 bar a 350 bar del tren de hidrógeno verde. ....	25
Tabla 4-16: Costos de compra y costos instalado para las pilas de combustible del tren de hidrógeno verde. ....	26
Tabla 4-17: Costos de compra y costos instalado para las baterías del tren de hidrógeno verde. .....	26
Tabla 4-18: Resumen de costos totales de compra e instalado de los equipos del tren de hidrógeno verde. ....	26
Tabla 4-19: Costos de compras y costos instalados del intercambiador de calor, el ventilador y las resistencias en el tren de amoníaco verde. ....	27

Tabla 4-20: Costos de compras y costos instalados del Amogy Powerpack en el tren de amoníaco verde.....	28
Tabla 4-21: Costos de compra y costos instalado para las baterías del tren de amoníaco verde. ....	28
Tabla 4-22: Resumen de costos totales de compra e instalado de los equipos del tren de amoníaco verde.....	28
Tabla 4-23: Resumen de costos anuales de los combustibles.....	29
Tabla 4-24: Resumen de los costos de los estanques de almacenamiento para los combustibles.....	30
Tabla 4-25: Resumen de los costos de los equipos anexados para los trenes de hidrógeno y amoníaco verde.....	31
Tabla 4-26: Costos de hidrógeno y amoníaco verde para el 2030.....	33
Tabla 4-27: Comparación de costos de hidrógeno y amoníaco entre el año 2024 y 2030. ...	33
Tabla 7-1: Propiedades del hidrógeno en comparación con el GN (Induambiente, s. f.).....	41
Tabla 7-2: Tipos de electrolizadores. (REPSOL, s. f.) .....	41
Tabla 7-3: Resumen de las características de las diferentes tecnologías utilizadas para almacenar hidrógeno (AlZohbi et al., 2023). ....	43
Tabla 7-4: Propiedades del amoníaco como combustible (Ministerio de Energía, 2022a). .	46
Tabla 7-5: Consumo de diésel en transporte ferroviario en regiones del norte del país (Ministerio de Energía, 2022b).....	48
Tabla 7-6: Datos técnicos de modelo HD 30. (Hydrogenics, s. f.).....	54
Tabla 7-7: Especificaciones AKASYSTEM 9 AKM 150 CYC. (Borgwarner, s. f.) .....	55
Tabla 7-8: Características de Amogy Powerpack (Amogy, 2023).....	56
Tabla 7-9: Características físicas de Amogy Powerpack modificado. (elaboración propia)	57
Tabla 7-10: Características principales del intercambiador de calor del amoníaco. (Elaboración propia).....	59
Tabla 7-11: Características principales de las resistencias utilizadas para calentar el aire ambiental. (elaboración propia).....	59

## Lista de Figuras

Figura 3-1: Esquema del proceso del tren de hidrógeno verde. (Elaboración propia) .....	11
Figura 3-2: Esquema del proceso del tren de amoníaco verde. (Elaboración propia).....	14
Figura 3-3: Equipo Amogy Powerpack (Amogy, 2023).....	14
Figura 4-1: Comparación de costos totales anuales por combustible.....	29
Figura 4-2: Comparación de costos instalados totales de estanques de almacenamiento de los combustibles. ....	31
Figura 4-3: Comparación de costos de los equipos anexados para los trenes de hidrógeno y amoníaco verde.....	32
Figura 4-4: Comparación de costos anuales de hidrógeno y amoníaco verde, entre el año 2024 y 2030. ....	33
Figura 7-1: Electrolizador Alcalino (Alianza Hidrógeno Verde, 2024).....	42
Figura 7-2: Electrolizador PEM (Alianza Hidrógeno Verde, 2024).....	43
Figura 7-3: Electrolizador de Óxido-sólido (SOEC) (Alianza Hidrógeno Verde, 2024). ....	43
Figura 7-4: Colores del amoníaco (Ministerio de Energía, 2022a). ....	47
Figura 7-5: Proceso convencional para la producción de amoníaco (Ministerio de Energía, 2022a).....	47
Figura 7-6: Esquema simplificado de las etapas del proceso de producción de amoníaco (Ministerio de Energía, 2022a).....	48
Figura 7-7: Red ferroviaria en el norte de Chile (Paredes, 2025).....	49
Figura 7-8: Recorrido de tren FCAB.....	50
Figura 7-9: Catálogo pilas de hidrógeno Hydrogenics – Cummins. (Hydrogenics, s. f.) ....	50
Figura 7-10: Triángulo rectángulo con la distancia y diferencia de altura del recorrido del tren. (elaboración propia) .....	51
Figura 7-11: Coeficientes para el cálculo de costo de transporte de hidrógeno y amoníaco en USD/kg. (Ministerio de Energía, 2024).....	64
Figura 7-12: Distintas configuraciones y dimensiones de los cabezales de los estanques. (DISEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES, 2023).....	66
Figura 7-13: Relación óptima de longitud / diámetro (L/D) para distintos rangos de potencias. (DISEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES, 2023).....	66
Figura 7-14: Factores de material para recipientes a presión. ....	67

Figura 7-15: Factores de presión para recipientes a presión. ....	67
Figura 7-16: Características y rangos de operación para compresores tipos M y MB. (Elliot, s. f.).....	75
Figura 7-17: Factores de material para intercambiadores de calor. (Márquez, s. f.).....	77
Figura 7-18: Factores de presión y diseño para intercambiadores de calor. (Márquez, s. f.)	77
Figura 7-19: Factores para la correlación de Towler. (Sinnott, 2013).....	79

## Nomenclatura

### Glosario

A	: Aceleración [m/s <sup>2</sup> ]
A <sub>f</sub>	: Área frontal del vehículo [m <sup>2</sup> ]
ALK	: Alkaline Electrolysis (Electrólisis Alcalina)
C <sub>c</sub>	: Costo de compra [USD]
C <sub>i</sub>	: Costo instalado [USD]
C <sub>x</sub>	: Coeficiente de resistencia aerodinámica
E	: Energía requerida [kWh]
FCAB	: Ferrocarril Antofagasta Bolivia
Fr	: Coeficiente de resistencia a la rodadura
H <sub>2</sub>	: Hidrógeno
Kg	: Kilogramo
Km	: Kilómetro
kW	: Kilovatios
L	: Longitud del recorrido [km]
LHV	: Lower Heating Value (Valor calorífico inferior)
M	: Masa del sólido [kg]
NH <sub>3</sub>	: Amoníaco
P	: Peso del sistema [N]
P <sub>c</sub>	: Potencia de combustión [kW]
PCI	: Poder Calorífico Inferior
PEM	: Proton Exchange Membrane (Membrana de Intercambio de Protones)
Q	: Cantidad de calor [MJ]
SOEC	: Solid Oxide Electrolysis Cell (Celda de Electrólisis de Óxido Sólido)
T	: Temperatura [°C]
T	: Toneladas
USD	: Dólares estadounidenses
V	: Velocidad [m/s]
V	: Volumen [m <sup>3</sup> ]
H	: Eficiencia del sistema [%]
P	: Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]

## 1. Introducción

La creciente inquietud mundial por el cambio climático ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles que favorezcan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El sector del transporte es uno de los mayores responsables de estas emisiones, por lo que, enfrenta el desafío de adoptar soluciones energéticas renovables. En este contexto, el hidrógeno y el amoníaco verdes surgen como alternativas viables para la descarbonización del transporte de ferrocarriles.

Tanto el hidrógeno y el amoníaco verdes son vectores energéticos, es decir, que requiere de un proceso químico para su producción (Acciona, 2024). El hidrógeno verde se obtiene a partir de la electrólisis del agua utilizando energía renovable, mientras que el amoníaco verde se produce combinando hidrógeno verde con nitrógeno mediante el proceso Haber-Bosch. Estos combustibles no generan emisiones directas de dióxido de carbono durante su uso. Sin embargo, presentan desafíos importantes en términos de almacenamiento, transporte, seguridad y costos de implementación, aspectos que requieren un análisis detallado para evaluar su viabilidad en el transporte ferroviario.

Chile posee un notable potencial para la producción de hidrógeno y amoníaco verdes, gracias a su abundante capacidad de generación de energías renovables. Según el Ministerio de Energía, el país cuenta con un potencial energético superior a 1.800 gigavatios (GW), superando ampliamente la demanda interna (Banco Central Chile, 2025).

Ferrocarril Antofagasta Bolivia (FCAB) inauguró la primera locomotora a hidrógeno verde en América Latina a fines del 2024. Esta locomotora, con una potencia de 1.000 kW y sistemas de almacenamiento de hidrógeno a bordo, operará inicialmente en rutas de carga y maniobras internas en Antofagasta (H2LAC, 2024). Del proyecto de FCAB se obtuvo información específica del tren y también de su recorrido, para realizar esta memoria de título.

Esta investigación tiene como objetivo realizar un estudio técnico-económico del uso de hidrógeno y amoníaco verdes en el transporte ferroviario en el norte de Chile. Se busca comparar el rendimiento energético, los costos de implementación y los riesgos asociados al

uso de estos combustibles, con el fin de determinar cuál representa la opción más viable para contribuir a la descarbonización del norte de Chile.

## **1.1. Marco teórico**

### **1.1.1. Hidrógeno**

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, es el elemento químico más ligero que existe, su átomo está formado por un protón y un electrón y es estable en forma de molécula diatómica ( $H_2$ ). En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, y es insípido, incoloro e inodoro. (Centro Nacional del Hidrógeno, 2024). Las propiedades del hidrógeno se presentan en la Tabla 7-1.

### **1.1.2. Tipos de Hidrógenos**

Los tipos de hidrógeno principales son (Acciona, 2024):

Hidrógeno Gris: se obtiene mediante el reformado de combustibles fósiles, siendo el gas natural el más común. Es el hidrógeno más barato por el momento, y el proceso emite una gran cantidad de  $CO_2$  a la atmosfera.

Hidrógeno Azul: también se obtiene de combustibles fósiles, pero con técnicas capaces de capturar y almacenar las emisiones de  $CO_2$  que se producen.

Hidrógeno Verde: se consigue mediante electrólisis del agua. Lo más determinante es que este proceso se alimenta en su totalidad por energía renovable, por eso no se genera por ningún tipo de emisión contaminante a la atmosfera.

### **1.1.3. Obtención de Hidrógeno Verde**

La obtención de Hidrógeno Verde se realiza mediante un proceso químico conocido como electrólisis. Este método utiliza la corriente eléctrica para separar el hidrógeno del oxígeno que hay en el agua, por lo que, si esa electricidad se obtiene de fuentes renovables, se producirá energía sin emitir dióxido de carbono a la atmósfera (Iberdrola, 2024).

El electrolizador consta de dos electrodos, un ánodo (o electrodo negativo) y un cátodo (o electrodo positivo), que son los encargados de hacer pasar la corriente eléctrica por el agua y llevar a cabo el proceso de rotura de las moléculas, conocido como electrólisis (Repsol, 2024).

Actualmente existen tres tecnologías mayormente desarrolladas: electrólisis alcalina (ALK), electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) y celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC). Los diagramas de los electrolizadores se presentan en el anexo 7.1.2 y en la Tabla 7-2, se presenta una tabla comparativa entre los electrolizadores.

#### **1.1.4. Almacenamiento de Hidrógeno Verde**

Las tecnologías que se utilizan para almacenar hidrógeno se clasifican en tecnologías físicas o basadas en materiales. En la categoría física, el hidrógeno puede almacenarse en estado líquido o gaseoso, mientras que en la categoría de materiales el hidrógeno se almacena en forma sólida (AlZohbi et al., 2023). En la Tabla 7-3 del anexo 7.1.3, se presenta un resumen de las tecnologías de almacenamiento.

#### **1.1.5. Pilas de combustible y baterías de potencia**

Pilas de combustible: un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Parte de hidrógeno y de un comburente (en muchos casos oxígeno) para producir agua y electricidad en forma de corriente continua y calor (3M Chile, 2025).

Baterías de potencia: son una serie de dispositivos que permiten almacenar energía y liberarla de forma controlada. Existen las baterías primarias y secundarias. Las primarias no se recargan porque sus reacciones son irreversibles y las baterías secundarias son recargables por sus reacciones reversibles (LibreTexts Español, 2022).

### **1.2. Amoníaco**

El amoníaco es un compuesto formado por un átomo de nitrógeno y tres de hidrógeno de acuerdo con la fórmula  $\text{NH}_3$ . Se trata de un gas incoloro, de olor muy penetrante, bastante soluble en agua, y en estado líquido es fácilmente evaporable. Se caracteriza porque es una base fuerte, corrosiva y que reacciona violentamente con ácidos, oxidantes fuertes y halógenos (PRTR España, 2024). Este compuesto es producido mediante la reacción entre hidrógeno y nitrógeno, utilizando un proceso llamado Haber-Bosch (Ministerio de Energía, 2022a). Las propiedades del amoníaco se presentan en la Tabla 7-4.

### 1.2.1. Tipos de amoníaco

El color del amoníaco se determina según la procedencia de la fuente de energía primaria y los procesos por los cuales se obtiene el producto final. Los tipos de amoníaco se presentan en la Figura 7-4, del anexo 7.1.5.

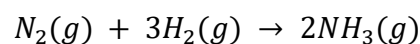
### 1.2.2. Amoníaco Verde

Para producir amoníaco verde se utiliza hidrógeno verde y nitrógeno en un proceso industrial ya existente que se conoce como Haber-Bosch (Plan de acción de Hidrógeno Verde, 2024). Hoy en día prácticamente no se produce amoníaco verde en ningún sitio, no obstante, esto se espera que cambie durante la próxima década.

### 1.2.3. Obtención de Amoníaco

El proceso que se utiliza para obtener amoníaco es el proceso de Haber-Bosch, este proceso consiste en la reacción de nitrógeno e hidrógeno en forma gaseosa. El nitrógeno proviene de la atmósfera mientras que el hidrógeno proviene de la electrolisis realizada con energías renovables.

Para la fase de síntesis de amoníaco, el proceso de Haber-Bosch requiere niveles de temperatura y presión entre los 350 y 500 °C, y 150 a 300 bar respectivamente, y realiza la síntesis de amoníaco a través de la siguiente reacción química (Ministerio de Energía, 2022a):



Para que la reacción sea más rápida se utiliza un catalizador y de esta forma se aumenta la presión y la temperatura hasta que se consigue el amoníaco (Fluideco, 2025).

En la Figura 7-5 se presenta el proceso de obtención de amoníaco, y en la Figura 7-6 se presenta un esquema simplificado de las etapas del proceso de producción de amoníaco.

### 1.2.4. Almacenamiento de Amoníaco Verde

El amoníaco normalmente se puede almacenar en estado líquido o gaseoso, para esto se puede optar entre las siguientes opciones:

- Almacenamiento refrigerado a presión atmosférica en estado líquido (-33°C y 1 bar);

- Almacenamiento presurizado a temperatura ambiente en estado líquido (30 bar y temperatura máxima de 50°C);
- Almacenamiento refrigerado a baja presión en estado líquido (< 10 bar);
- Almacenamiento a baja presión y temperatura ambiente en estado gaseoso (< 10 bar).

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Análisis del uso de Hidrógeno y Amoníaco verdes en el transporte de ferrocarril en Chile.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Analizar el potencial del uso de Hidrógeno y Amoníaco verdes en el transporte por ferrocarriles en la zona norte de Chile.
- Investigar tecnologías de uso de Hidrógeno y Amoníaco Verde puro en locomotoras.
- Análisis técnico entre actuales costos energéticos del transporte por ferrocarril y futuros costos por el uso del Hidrógeno y Amoníaco Verde.
- Estudio económico de la alternativa de Hidrógeno y Amoníaco Verde en transporte por ferrocarril.
- Revisar el riesgo del uso de Hidrógeno y Amoníaco Verde en ferrocarriles.

### 3. Metodología

La metodología utilizada en esta memoria de título se basa inicialmente en una búsqueda bibliográfica, buscando antecedentes teóricos del hidrógeno y amoníaco verde, conociendo de esta manera su producción, almacenamiento y utilizaciones posteriores, etc.

#### 3.1. Estudio técnico de combustibles

En el estudio técnico de la viabilidad de la implementación de combustibles como el hidrógeno y el amoníaco verdes en ferrocarriles, se establecerán las características generales del ferrocarril base, la ubicación y recorrido del proyecto, se calculará la cantidad de combustible necesario para el recorrido, el espacio de los equipos al interior de los ferrocarriles y la eficiencia energética de los combustibles.

##### 3.1.1. Características generales y ubicación del proyecto

Se estableció que se trabajaría con las condiciones similares a la primera locomotora de hidrógeno verde en Chile y Sudamérica, esta locomotora fue lanzada por FCAB, en noviembre del 2024. Los datos de la Tabla 3-1 fueron consultados directamente a la empresa FCAB:

**Tabla 3-1: Características generales del tren de hidrógeno de FCAB.**

<b>Características generales del tren de hidrógeno de FCAB</b>	
Potencia [kW]	1.000
Baterías de potencia [kW]	600
Pilas de combustible [kW]	400
Ancho [m]	2,8
Altura [m]	4,2
Largo [m]	16,9
Área frontal [m <sup>2</sup> ]	11,8
Peso del tren [kg]	64.000
Velocidad a la que opera [km/h]	60
Lugar inicio recorrido	Antofagasta FCAB Patio Grande
Lugar fin de recorrido	Sierra Grande FCAB Train
Altura inicio recorrido [m]	38
Altura fin de recorrido [m]	1.661
Distancia del recorrido [km]	150

El recorrido del tren de FCAB se presenta en la Figura 7-8.

### 3.1.2. Balance de Energía para un tren

Características del movimiento (Calvo Casas, 2021)

Todo cuerpo obedece la segunda ley de Newton, la cual expresa que para que un sistema modifique su estado de equilibrio debe estar sometido a la acción de un sistema de fuerzas, y se expresa en la Ecuación (1):

$$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1)$$

Donde, m: masa del sólido y a: aceleración.

- Resistencia a la rodadura (García & Franco, 2021):

Esta resistencia se presenta cuando existe contacto entre dos superficies (la rueda y el carril).

La resistencia a la rodadura se expresa con la Ecuación (2):

$$R_r = P \cdot f_r \quad (2)$$

Donde, P: peso del sistema y fr: coeficiente de resistencia a la rodadura.

- Resistencia aerodinámica (García & Franco, 2021):

La resistencia es la fuerza que se opone al movimiento del tren mientras se desplaza a través del aire. La resistencia aerodinámica se calcula mediante la Ecuación (3):

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v^2 \quad (3)$$

Donde,  $\rho$ : densidad del aire,  $C_x$ : coeficiente de resistencia aerodinámica,  $A_f$ : área frontal del vehículo y v: velocidad.

- Resistencia gravitatoria (García & Franco, 2021):

Esta resistencia se manifiesta cuando un vehículo se encuentra en un plano inclinado, de manera que, al descomponer su peso en dos componentes ligadas a un sistema de coordenadas solidario a la rampa, se obtiene una fuerza a lo largo del eje longitudinal ( $P_x$ ).

La resistencia gravitatoria se presenta en la Ecuación (4):

$$R_g = P_x = P \cdot \sin\theta \quad (4)$$

Conociendo todas las resistencias al movimiento, se puede estimar la potencia necesaria para recorrer un tramo en particular, ya que para mantener la velocidad constante se sabe que el

equilibrio de fuerzas debe ser nulo. De esta forma la potencia puede calcularse a través de la Ecuación (5):

$$Potencia = R_t \cdot v \quad (5)$$

Con:

$$R_t = R_r + R_a + R_g \quad (6)$$

### 3.1.3. Consumo de combustible para tren de diésel

Considerando las mismas características generales del tren de hidrógeno de FCAB, se desarrolla lo siguiente para obtener el consumo de combustible para un tren a diésel (Golato & Cárdenas, 2024) :

Capacidad de carga (T), está definida por la Ecuación (7):

$$T = \text{vagones} \cdot t [t] \quad (7)$$

Donde, vagones: cantidad de vagones y t: peso en toneladas de cada vagón.

Además, tenemos que la potencia efectiva, está definida por la Ecuación (8):

$$N_e = 0,75 \cdot N_{m\acute{a}x} [kW] \quad (8)$$

Donde,  $N_{m\acute{a}x}$  = potencia máxima

La potencia específica de transporte queda definida por la Ecuación (9):

$$N_{et} = \frac{N_e}{T} \left[ \frac{kW}{t} \right] \quad (9)$$

El consumo específico de transporte, se define con la Ecuación (10):

$$B_{et} = N_{et} \cdot b_e \left[ \frac{g}{t \cdot h} \right] \quad (10)$$

Donde,  $b_e = 227 \left[ \frac{g}{kWh} \right]$  (consumo específico de motor a diésel)(Golato & Cárdenas, 2024)

Su equivalente en volumen se obtiene aplicando la Ecuación (11):

$$B'_{et} = \frac{B_{et}}{\rho_{comb}} \left[ \frac{L}{t \cdot h} \right] \quad (11)$$

Donde,  $\rho_{comb} = 850 \left[ \frac{g}{L} \right]$  (densidad del diésel).

Para el consumo específico de la carga, cada 100 km de recorrido y moviéndose a una velocidad  $v$  constante, se calcula con la Ecuación (12):

$$B = \frac{B_{et} \cdot 100}{v \cdot \rho_{comb}} \left[ \frac{L}{t \cdot 100 \text{ km}} \right] \quad (12)$$

Para el volumen de combustible total necesario para transportar una determinada carga cada 100 km puede determinarse con la Ecuación (13):

$$V_{comb} = B \cdot T \left[ \frac{L}{100 \text{ km}} \right] \quad (13)$$

A través de la Ecuación (14) obtendremos la cantidad en volumen de combustible diésel que se necesita para cumplir este recorrido:

$$V'_{comb} = V_{comb} \cdot L [L] \quad (14)$$

Donde,  $L$ = recorrido completo del tren.

Finalmente, el consumo de combustible en kg se calcula con la Ecuación (15):

$$V''_{comb} = V'_{comb} \cdot \rho_{comb} [kg] \quad (15)$$

#### **3.1.4. Consumo de combustible para tren de hidrógeno verde**

Para el tren de hidrógeno se tendrá un sistema compuesto por estanques de hidrógeno verde, con ello un sistema de pilas de hidrógeno, un sistema de baterías de potencia, que son los responsables de generar la energía para que el tren se mueva (Calvo Casas, 2021). En la Figura 3-1 se representa un diagrama del sistema de la conversión de amoníaco líquido hasta convertirse en energía:

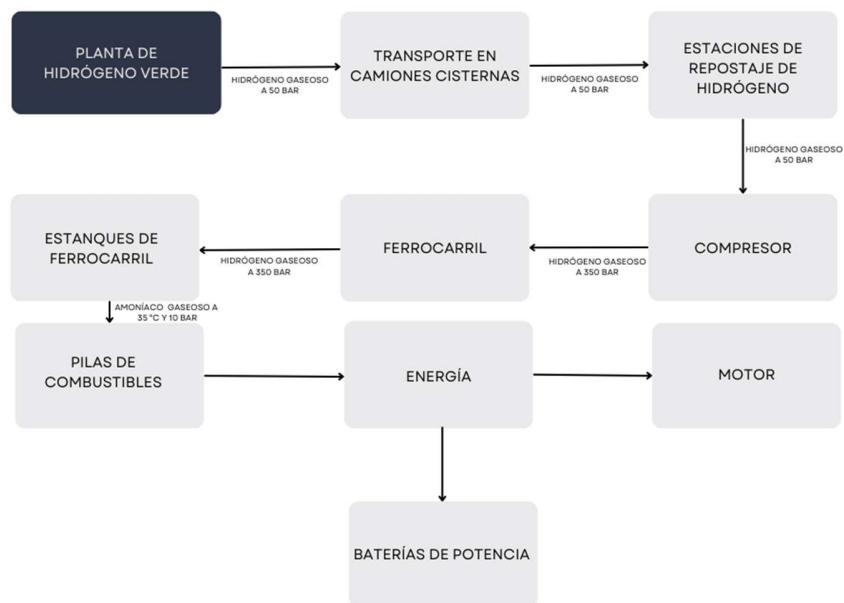


Figura 3-1: Esquema del proceso del tren de hidrógeno verde. (Elaboración propia)

### Pilas de hidrógeno

Hydrogenics es un desarrollador y fabricante de productos basados en el hidrógeno. Su actividad se centra en la generación de hidrógeno mediante procesos de electrólisis y la fabricación de pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) (Cummins, 2021). El catálogo de pilas de hidrógeno que ofrece actualmente este fabricante se presenta en la Figura 7-9.

Teniendo la pila seleccionada, se puede obtener cuantas pilas son necesarias para cumplir con los requerimientos energéticos con la Ecuación (16):

$$Cantidad\ de\ pilas = \frac{400\ kW}{Potencia\ de\ pila\ seleccionada} \quad (16)$$

Se tiene que la potencia total de las pilas de hidrógeno está dada por la Ecuación (17):

$$Potencia\ total = Cantidad\ de\ pilas \cdot Potencia\ de\ pila\ seleccionada \quad (17)$$

### Baterías de potencia

Su principio de funcionamiento se basa en una reacción redox, en la que un cátodo que se reduce y un ánodo que se oxida se encuentran en el seno de un electrolito, permitiendo que los iones viajen entre los dos electrodos, dando así lugar a una corriente eléctrica durante el proceso.

Para la selección de la batería, se eligió una batería en específico, que cumple con los requisitos generales que se necesitan para el tren de hidrógeno. El sistema elegido es el AKASYSTEM 9 AKM 150 CYC, de la compañía Akasol, ahora parte de BorgWarner (BorgWarner, 2024).

Este sistema de baterías se forma por celdas cilíndricas, y se caracteriza por tener un ciclo de vida medio, un muy bajo costo y estar diseñadas por su aplicación en aplicaciones de largo alcance y potencia media (BorgWarner, 2024).

**Tabla 3-2: Especificaciones AKASYSTEM 9 AKM 150 CYC (Borgwarner, 2024).**

<b>Modelo</b>	<b>Energía</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ciclos de vida</b>	<b>Peso</b>	<b>Dimensiones (l x a x h)</b>
9 AKM 150 CYC	98 kWh	148 Ah	4.000	535 kg	1.720x700x300 mm

Teniendo la batería seleccionada, se puede obtener cuantas unidades son necesarias para cumplir con los requerimientos energéticos con la Ecuación (18):

$$Cantidad\ de\ baterías = \frac{600\ kW}{Potencia\ de\ batería\ seleccionada} \quad (18)$$

Se tiene que la potencia total de baterías de potencia está dada por la Ecuación (19):

$$Potencia\ total = Cantidad\ de\ baterías \cdot Potencia\ de\ batería\ seleccionada \quad (19)$$

Cantidad de hidrógeno verde requerido

Se tiene que el tiempo en horas requerido en alcanzar el recorrido esta dado por la Ecuación (20):

$$t = \frac{d}{v} [h] \quad (20)$$

Con,  $d$  = distancia y  $v$  = velocidad

La energía requerida para realizar cierto recorrido se obtiene con la Ecuación (21):

$$Energía\ requerida = Potencia\ total\ tren \cdot t [kWh] \quad (21)$$

El consumo de hidrógeno en kg, lo podemos encontrar con la Ecuación (22):

$$Consumo\ de\ H_2\ verde\ en\ kg = \frac{Energía\ [kWh]}{PCI_{H_2} \left[ \frac{kWh}{kg} \right]} \cdot \frac{1}{\eta_{pila}} [kg] \quad (22)$$

Donde, Energía: es la energía requerida para desarrollar un recorrido específico, PCI H<sub>2</sub>: es el poder calorífico del hidrógeno y  $\eta_{pila}$ : es la eficiencia de la pila seleccionada

El consumo de hidrógeno en m<sup>3</sup>, lo podemos encontrar con la Ecuación (23):

$$Volumen\ de\ H_2\ verde\ en\ m^3 = \frac{Consumo\ [kg]}{\rho_{H_2\ a\ 350\ bar} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} [m^3] \quad (23)$$

Con  $\rho_{H_2}$ :  $25 \frac{kg}{m^3}$  (a 350 bar).

### 3.1.5. Consumo de combustible para tren de amoníaco verde

Para el caso del tren de amoníaco verde, tendrá ciertas diferencias en comparación al tren de hidrógeno. La diferencia principal es la utilización de un reactor para realizar el craqueo del amoníaco, y reconvertirlo nuevamente a hidrógeno y nitrógeno. En la Figura 3-2 se representa un diagrama del sistema de la conversión de amoníaco líquido hasta convertirse en energía:

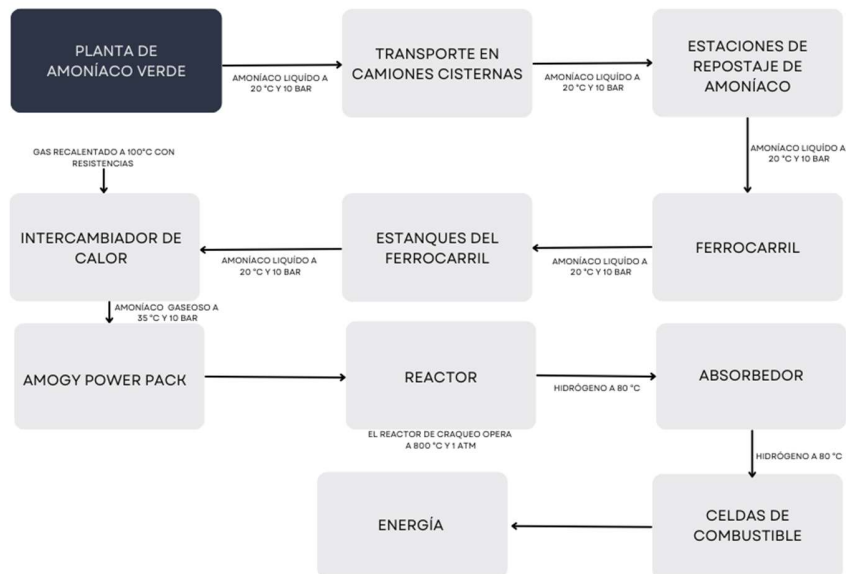


Figura 3-2: Esquema del proceso del tren de amoníaco verde. (Elaboración propia)

### Amogy Power Pack

Amogy ha desarrollado un proceso de craqueo de amoníaco para crear hidrógeno a demanda, lo que permite su uso en una pila de combustible para la generación de energía para camiones de carretera propulsados por amoníaco, vehículos todoterreno y, potencialmente, barcos y embarcaciones propulsados por amoníaco (Riviera Maritime Media, 2024).

El Amogy Powerpack es un sistema integrado, que tiene un reactor, un adsorbedor y una celda de combustible de 200 kW, tal como se visualiza en la Figura 3-3:

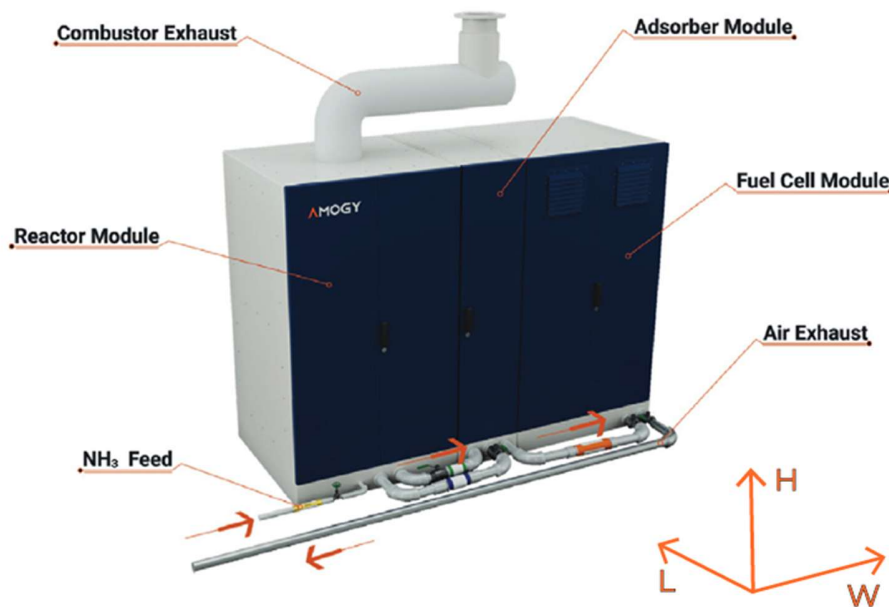


Figura 3-3: Equipo Amogy Powerpack (Amogy, 2023).

Como se mencionó anteriormente, la celda de combustible es de 200 kW, por lo tanto, se necesitan dos celdas de combustible, para cumplir los requerimientos energéticos de 400 kW. No ocuparemos dos Amogy Superpack, por un tema de espacio en el tren por lo que solo se añadirá otra celda de combustible, creando así de esta manera un sistema modificado de Amogy Superpack.

Otro alcance que se tiene es que el amoníaco entra en estado líquido a 20 °C y 10 bar, y por otro lado el Amogy Superpack tiene como requisito de que el combustible debe entrar en

estado gaseoso a 35 °C y 10 bar. Es por esto, que se tiene que instalar un intercambiador de calor, que permita el aumento de temperatura y el cambio de estado del amoníaco.

El amoníaco será calentado con aire recalentado. Este aire se obtendrá desde el ambiente con ayuda de un ventilador, y será calentado por resistencias instaladas previamente al intercambiador de calor.

### Baterías de potencia

Se utilizará el mismo modelo de batería mencionado para el tren de hidrógeno, que es el AKASYSTEM 9 AKM 150 CYC, de la compañía Akasol, ahora parte de BorgWarner (BorgWarner, 2024).

### Cantidad de amoníaco verde requerido (Amogy, 2023)

Del catálogo de Amogy Powerpack (Tabla 7-8), se tiene que:

$$\text{Consumo de amoníaco en } \frac{kg}{kWh} = 0,6 \left[ \frac{kg}{kWh} \right]$$

También, se tiene que el tiempo de recorrido (t) es igual a lo presentado en la Ecuación (24):

$$t = \frac{d}{v} [h] \quad (24)$$

Donde, v: velocidad del tren [km/h], d: distancia del recorrido [km]

Luego, se tiene que la energía requerida está dada por la Ecuación (25):

$$\text{Energía requerida} = \text{Potencia total del tren [kW]} \cdot t [h] [kWh] \quad (25)$$

Para obtener la cantidad de amoníaco requerido en kg para cumplir cierto recorrido, se calcula con la Ecuación (26):

$$\text{Consumo de } NH_3 = \text{Consumo de amoníaco} \left[ \frac{kg}{kWh} \right] \cdot \text{Energía requerida [kWh]} [kg] \quad (26)$$

Finalmente, para obtener la cantidad de hidrogeno verde en  $m^3$ , necesario para recorrer cierta distancia, se calcula con la Ecuación (27):

$$\text{Volumen de } NH_3 \text{ verde en } m^3 = \frac{\text{Consumo [kg]}}{\rho_{NH_3 \text{ a } 10 \text{ bar y } 20^\circ C} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} [m^3] \quad (27)$$

Donde,  $\rho_{NH_3}$ :  $610,52 \frac{kg}{m^3}$  (a 10 bar y 20 °C)

### 3.1.6. Eficiencia energética de los combustibles

La eficiencia energética de los combustibles se calculará con la Ecuación (28):

$$\eta = \frac{E_{util}}{E_{combustible}} \quad (28)$$

Donde la energía del combustible se calcula como se presenta en la Ecuación (29):

$$E_{combustible} = PCI_{combustible} \cdot consumo \text{ de combustible en kg} \quad (29)$$

### 3.1.7. Infraestructura y logística para el suministro de combustibles

Se supondrá una planta productora de combustibles ubicada a 100 km de distancia del punto de repostaje, en donde dispondrá en un caso hipotético de diésel, hidrógeno y amoníaco verdes.

Para el caso del transporte para el diésel, se transportará en camiones cisterna de 30 toneladas a condiciones ambientales. Para el caso del transporte del hidrógeno verde se transporta en camiones cisterna a 50 bar. Y para el caso del transporte del amoníaco verde se transportará en camiones cisterna a 10 bar.

La zona de repostaje será solo una, y se ubicará al inicio del recorrido, en donde se encontrarán 2 estanques de almacenamiento de  $30 m^3$  cada uno. Para el caso del hidrógeno verde, se implementará un sistema intermedio de compresores para aumentar la presión del hidrógeno de 50 bar a 350 bar, que es lo que se necesita al interior del ferrocarril de hidrógeno verde.

## 3.2. Estudio económico de los combustibles

Se estimarán los costos de las cantidades necesarias de combustible, los costos de transporte, los estanques de almacenamiento en la zona de repostaje, los estanques al interior para los trenes de diésel, de hidrógeno verde y de amoníaco verde. Y también, se estimarán los costos de los equipos especiales para el funcionamiento del tren de hidrógeno verde y el tren de amoníaco verde.

Se dará una base de cálculo, en donde cada tren realizará 2 viajes en el día, ida y vuelta, y hará su recorrido 300 días al año:

$$\text{cantidad de km en un año} = \frac{150 \text{ km}}{\text{ida}} \cdot \frac{2 \text{ ida}}{1 \text{ vuelta}} \cdot \frac{2 \text{ vuelta}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{300 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 180.000 \frac{\text{km}}{\text{año}}$$

Esta base de cálculo se utilizará para los costos de cantidad de combustible y los costos de transporte de los combustibles.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Resultados técnicos

#### 4.1.1. Balance de energía del ferrocarril

El balance de energía se resolvió con las ecuaciones mencionadas en 3.1.2, en donde su desarrollo se encuentra en el anexo 7.2.1. En donde se obtuvieron los siguientes resultados para el balance de energía para los tres trenes:

Tabla 4-1: Valores de las resistencias para el tren de FCAB.

Resistencias	Fuerza [N]
R. a la rodadura	3.139
R. aerodinámica	588
R. gravitatoria	6.793

Tabla 4-2: Resistencia total y potencia de las resistencias del tren de FCAB.

Parámetro	Valor
Resistencia total [N]	10.520
Potencia [kW]	175

Se tiene que

$$1.000 \text{ kW} > 175 \text{ kW}$$

Por lo tanto, el tren tiene potencia suficiente para superar las resistencias (rodadura, aerodinámica, gravedad) y le sobra potencia para cumplir con sus funciones operativas.

#### 4.1.2. Consumo de combustible de cada ferrocarril

##### 4.1.2.1. Consumo de combustible para una locomotora a diésel

El consumo de combustible para el tren a diésel se resolvió con las ecuaciones mencionadas en 3.1.3, en donde su desarrollo se encuentra en el anexo 7.2.2. De donde se obtuvieron los siguientes resultados para el consumo de combustible para un tren a diésel, para un trayecto de 150 km:

**Tabla 4-3: Consumo de combustible de tren diésel para un recorrido de 150 km.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Volumen de diésel [ $m^3$ ]	0,5
Masa de diésel [kg]	426

##### 4.1.2.2. Consumo de combustible para tren de hidrógeno verde

El consumo de combustible para el tren de hidrógeno verde se resolvió con las ecuaciones mencionadas en 3.1.4, en donde su desarrollo se encuentra en el anexo 7.2.3. De donde se obtuvieron los siguientes resultados para el consumo de combustible para un tren de hidrógeno verde, para un trayecto de 150 km:

**Tabla 4-4: Consumo de combustible de tren hidrógeno verde para un recorrido de 150 km.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Volumen de hidrógeno verde [ $m^3$ ]	5
Masa de hidrógeno verde [kg]	127

##### 4.1.2.3. Consumo de combustible para tren de amoníaco verde

El consumo de combustible para el tren de amoníaco verde se resolvió con las ecuaciones mencionadas en 3.1.5 en donde su desarrollo se encuentra en el anexo 7.2.4 De donde se obtuvieron los siguientes resultados para el consumo de combustible para un tren de amoníaco verde, para un trayecto de 150 km:

**Tabla 4-5: Consumo de combustible de tren amoníaco verde para un recorrido de 150 km.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Volumen de amoníaco verde [ $m^3$ ]	2,5
Masa de amoníaco verde [kg]	1.500

#### **4.1.3. Eficiencia energética de los combustibles**

La eficiencia energética se calculó en el anexo 7.2.5, entregando los siguientes resultados:

**Tabla 4-6: Eficiencias energéticas de los combustibles.**

<b>Combustible</b>	<b>Eficiencia energética</b>
Diésel	37 %
Hidrógeno verde	59 %
Amoníaco verde	32 %

La eficiencia energética del tren a diésel es la esperada para los sistemas de combustión interna, en donde gran parte de la energía se disipa en forma de calor. La eficiencia energética del tren de hidrógeno verde también es el esperado, ya que las pilas de hidrógeno tienen ese tipo de eficiencias. La eficiencia energética del tren del amoníaco verde es baja en comparación al de hidrógeno, y esto se debe a las pérdidas de calor en el craqueo, en la purificación y en las pilas de combustible del Amogy Powerpack.

#### **4.1.4. Espacio ocupado por los equipos al interior del ferrocarril**

El espacio ocupado en el tren de hidrógeno verde, por los principales equipos se muestran en la Tabla 4-7:

**Tabla 4-7: Volumen de los equipos principales al interior del tren de hidrógeno verde.**

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Volumen de una pila	0,076	[ $m^3$ ]

Cantidad de pilas	13	[Unidades]
Volumen total pilas	0,99	[m <sup>3</sup> ]
Volumen una batería	0,36	[m <sup>3</sup> ]
Cantidad de baterías	7	[Unidades]
Volumen total baterías	2,5	[m <sup>3</sup> ]
Volumen estanque	11,3	[m <sup>3</sup> ]
Volumen total	14,8	[m <sup>3</sup> ]

El espacio ocupado en el tren de amoníaco verde, por los principales equipos se muestran en la Tabla 4-8:

**Tabla 4-8: Volumen de los equipos principales al interior del tren de amoníaco verde.**

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Volumen de Amogy Power Pack	9,24	[m <sup>3</sup> ]
Volumen una batería	0,36	[m <sup>3</sup> ]
Cantidad de baterías	7	[Unidades]
Volumen total baterías	2,5	[m <sup>3</sup> ]
Volumen estanque	5,46	[m <sup>3</sup> ]
Volumen total	17,2	[m <sup>3</sup> ]

El tren de hidrógeno verde requiere mayor espacio para el estanque, ya que el hidrógeno tiene baja densidad energética y necesita un mayor volumen de almacenamiento. El tren de amoníaco verde requiere más espacio para el Amogy Power Pack. Pero, en si el volumen total de los equipos principales es similar para ambos trenes, donde levemente es superior el volumen de los equipos del tren de amoníaco en un 16 %.

#### **4.1.5. Análisis de riesgo en la utilización de hidrógeno y amoníaco verde**

El hidrógeno forma una mezcla inflamable con aire para concentraciones entre 4% y 74%. La energía requerida para iniciar la combustión es mucho más baja que para otros combustibles, por lo que una pequeña chispa puede iniciar la combustión.

La combustión de hidrógeno da origen a una llama invisible para el ojo humano, por lo que se usan detectores de gas y de llama y cámaras de visión térmica para poder identificarla. Puede resultar en quemaduras graves cuando las personas no se percatan de la presencia de una llama y entran en contacto con ella (Cabello, 2024).

El amoníaco es una sustancia que presenta varios riesgos significativos. Es altamente tóxico, y la exposición a sus vapores puede causar irritación y daños en los ojos, nariz, garganta y pulmones; en concentraciones elevadas, puede ser letal. Además, es un gas inflamable, con un rango de inflamabilidad en el aire entre el 14% y el 32.5% en volumen, y una temperatura de ignición de 630 °C de gases, equipos de protección personal adecuados y protocolos de manejo seguro, para mitigar estos riesgos y proteger tanto a las personas como al entorno (Draeger, 2025).

Es por esto, que ambos combustibles requieren de medidas de seguridad estrictas tanto como en el transporte de estos combustibles, en los estanques de almacenamiento y en el interior de los trenes en donde se utilicen.

## **4.2. Resultados económicos**

### **4.2.1. Costos de combustible de cada ferrocarril**

#### **4.2.1.1. Estimación de costos de combustible para tren a diésel**

Para una base de cálculo de 180.000 km de recorrido al año para el tren de diésel se obtienen los siguientes valores que fueron calculados en el anexo 7.2.6:

**Tabla 4-9: Resumen de consumo y costo de diésel.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Consumo de diésel por km	2,8	[kg/km]
Consumo de diésel anual	510.750	[kg/año]
Costo de diésel anual	569.921	[USD/año]

#### 4.2.1.2. Estimación de costos de combustible para tren de hidrógeno verde

Para una base de cálculo de 180.000 km de recorrido al año para el tren de hidrógeno verde se obtienen los siguientes valores que fueron calculados en el anexo 7.2.7:

**Tabla 4-10: Resumen de consumo y costos de hidrógeno verde.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Consumo de hidrógeno verde por km	0,85	[kg/km]
Consumo de hidrógeno verde anual	152.558	[kg/año]
Costo de hidrógeno verde anual	1.144.182	[USD/año]

#### 4.2.1.3. Estimación de costos de combustible para tren de amoníaco verde

Para una base de cálculo de 180.000 km de recorrido al año para el tren de amoníaco verde se obtienen los siguientes valores que fueron calculados en el anexo 7.2.8:

**Tabla 4-11: Resumen de consumo y costos de amoníaco verde.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Consumo de amoníaco verde por km	10	[kg/km]
Consumo de amoníaco verde anual	1.800.000	[kg/año]
Costo de amoníaco verde anual	1.800.000	[USD/año]

#### 4.2.2. Costos de transporte de combustible de cada ferrocarril

Los costos de transporte anuales de diésel, de hidrógeno verde y amoníaco, fueron calculados en los anexos 7.2.9, 7.2.10 y 7.2.11 respectivamente. En donde se obtuvieron los siguientes costos de transporta anual:

**Tabla 4-12: Costo anual de transporte para cada combustible.**

<b>Combustible</b>	<b>Costo anual de transporte [USD/año]</b>
Diésel	5.150

Hidrógeno verde	412.692
Amoníaco verde	29.304

El diésel es el que presenta menor costo anual de transporte, y, por otro lado, el hidrógeno es el que presenta mayor costo anual de transporte, se debe a que su transporte es más complejo por la presión a la que este se traslada el hidrógeno verde como gas. Y el amoníaco verde, es el que se encuentra en un punto intermedio, ya que el amoníaco se encuentra líquido y a una presión no tan alta, lo que facilita su transporte en comparación con el hidrógeno verde.

#### 4.2.3. Costos de estanques en la zona de repostaje para cada ferrocarril

En la zona de repostaje, se encuentran dos estanques de 30 m<sup>3</sup> cada uno, los costos de compra y los costos instalados se calcularon con las correlaciones de Guthrie (Márquez, 2025) en los anexos 7.2.12, 7.2.13 y 7.2.14, y los resultados se presentan en la Tabla 4-13:

**Tabla 4-13: Costo de compra y costos instalado para estanques de repostaje para cada combustible.**

Combustible	Cc estanque repostaje [USD]	Ci estanque repostaje [USD]	Cc 2 estanque repostaje [USD]	Ci 2 estanque repostaje [USD]
Diésel	47.370	150.636	94.740	301.272
Hidrógeno verde	188.060	295.948	376.121	591.895
Amoníaco verde	73.423	176.690	146.847	353.379

#### 4.2.4. Costos de estanques al interior de cada tren

Al interior de cada tren, se encuentran estanques de almacenamientos que permiten realizar el recorrido ida y vuelta de cada tren. Cada estanque presenta un volumen distinto y condiciones diferentes de presión de almacenamiento. Los costos de compra y los costos

instalados se calcularon en los anexos 7.2.15, 7.2.16 y 7.2.17, y los resultados se presentan en la Tabla 4-14:

**Tabla 4-14: Costo de compra y costos instalado para estanque al interior de cada combustible.**

<b>Combustible</b>	<b>Volumen estanque [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cc estanque tren [USD]</b>	<b>Ci estanque tren [USD]</b>
Diésel	1,1	8.935	28.412
Hidrógeno verde	11,3	130.983	198.970
Amoníaco verde	5,5	30.987	74.568

#### **4.2.5. Costos de equipos para los trenes de hidrógeno y amoníaco verde**

##### **4.2.5.1. Estimación de costos de equipos para el tren de hidrógeno verde**

El tren de hidrógeno verde con pilas de combustibles necesita una serie de equipos para su funcionamiento. Se estiman los costos de los principales equipos que son los compresores a la salida de los estanques de repostaje, las pilas de combustible y las baterías de potencia.

##### Compresores

Los costos del compresor se calcularon en el anexo 7.2.18. En donde se necesitaba comprimir el hidrógeno gaseoso de 50 bar a 350 bar, que es lo que se requería al ingreso del tren de hidrógeno verde. Estos costos se visualizan en la Tabla 4-15:

**Tabla 4-15: Costos de compra y costos instalado para el compresor de hidrógeno de 50 bar a 350 bar del tren de hidrógeno verde.**

<b>Equipo</b>	<b>Cc [USD]</b>	<b>Ci [USD]</b>
Compresor (50 a 350 bar)	1.100.799	3.400.489

##### Pilas de combustible

Los costos de las pilas de combustible se calcularon en el anexo 7.2.18. Se tiene que la pila de combustible elegida tiene una potencia de 31 kW, y en total se necesitan 13 pilas de combustible para el requerimiento energético. A continuación, se presenta la Tabla 4-16 con los costos de las pilas de combustible:

**Tabla 4-16: Costos de compra y costos instalados para las pilas de combustible del tren de hidrógeno verde.**

<b>Equipo</b>	<b>Cc [USD]</b>	<b>Ci [USD]</b>
1 pila de combustible	46.500	65.100
Total, de pilas de combustible	604.500	846.300

#### Baterías de potencia

Los costos de las baterías de potencia se calcularon en el anexo 7.2.18. Se tiene que la batería seleccionada tiene una energía de 98 kWh, y en total se necesitan 7 baterías de potencia. A continuación, se presenta la Tabla 4-17 con los costos de las pilas de combustible:

**Tabla 4-17: Costos de compra y costos instalados para las baterías del tren de hidrógeno verde.**

<b>Equipo</b>	<b>Cc [USD]</b>	<b>Ci [USD]</b>
1 batería	13.622	16.346
Total, de baterías	95.354	114.425

#### Resumen de costos de equipos de tren de hidrógeno verde

El resumen de los costos totales de los equipos del tren de hidrógeno verde se presenta a continuación en la Tabla 4-18:

**Tabla 4-18: Resumen de costos totales de compra e instalados de los equipos del tren de hidrógeno verde.**

<b>Equipos</b>	<b>Cc [USD]</b>	<b>Ci [USD]</b>
----------------	-----------------	-----------------

Compresores	1.100.799	3.400.489
Pilas de combustible	604.500	846.300
Baterías de potencia	95.354	114.425
Total	1.800.653	4.361.213

#### 4.2.5.2. Estimación de costos de equipos para el tren de amoníaco verde

El tren de amoníaco verde necesita una serie de equipos para su funcionamiento. Se estima los costos de los principales equipos, que son el intercambiador de calor, el ventilador, las resistencias, el Amogy Superpack y las baterías de potencia.

##### Intercambiador de calor, ventilador y resistencias

El intercambiador de calor, el ventilador y las resistencias son los equipos encargados de elevar la temperatura del amoníaco verde, para que entre en óptimas condiciones al Amogy Powerpack. Los cálculos de los costos de estos equipos fueron calculados en el anexo 7.2.19, y sus resultados se presentan en la Tabla 4-19:

**Tabla 4-19: Costos de compras y costos instalados del intercambiador de calor, el ventilador y las resistencias en el tren de amoníaco verde.**

<b>Equipos</b>	<b>Cc [USD]</b>	<b>Ci [USD]</b>
Intercambiador de calor	15.492	50.968
Ventilador	58.574	123.591
Resistencia	22.838	31.974
Total, de los equipos	96.904	206.533

##### Amogy Powerpack:

El Amogy Powerpack, está conformado por el reactor, el absorbedor y las pilas de combustible. Los cálculos de los costos de estos equipos fueron calculados en el anexo 7.2.19, y sus resultados se presentan en la Tabla 4-20:

**Tabla 4-20: Costos de compras y costos instalados del Amogy Powerpack en el tren de amoníaco verde.**

<b>Equipos</b>	<b>Cc [USD]</b>	<b>CI [USD]</b>
Reactor	174.110	696.440
Absorbedor	39.739	78.242
Pilas de combustible	600.000	840.000
Total, Amogy Powerpack	813.849	1.614.683

### Baterías de potencia

Los costos de las baterías de potencia se calcularon en el anexo 7.2.19. Se tiene que la batería seleccionada tiene una energía de 98 kWh, y en total se necesitan 7 baterías de potencia. A continuación, se presenta en la Tabla 4-21 con los costos de las pilas de combustible:

**Tabla 4-21: Costos de compra y costos instalado para las baterías del tren de amoníaco verde.**

	<b>Cc [USD]</b>	<b>Ci [USD]</b>
1 batería	13.622	16.346
Total, de baterías	95.354	114.425

### Resumen de costos de equipos de tren de amoníaco verde

El resumen de los costos totales de los equipos del tren del amoníaco verde se presenta a continuación en la Tabla 4-22:

**Tabla 4-22: Resumen de costos totales de compra e instalado de los equipos del tren de amoníaco verde.**

<b>Equipos</b>	<b>Cc [USD]</b>	<b>Ci [USD]</b>
I.C, ventilador y resistencias	96.904	206.533
Amogy Powerpack	813.849	1.614.683

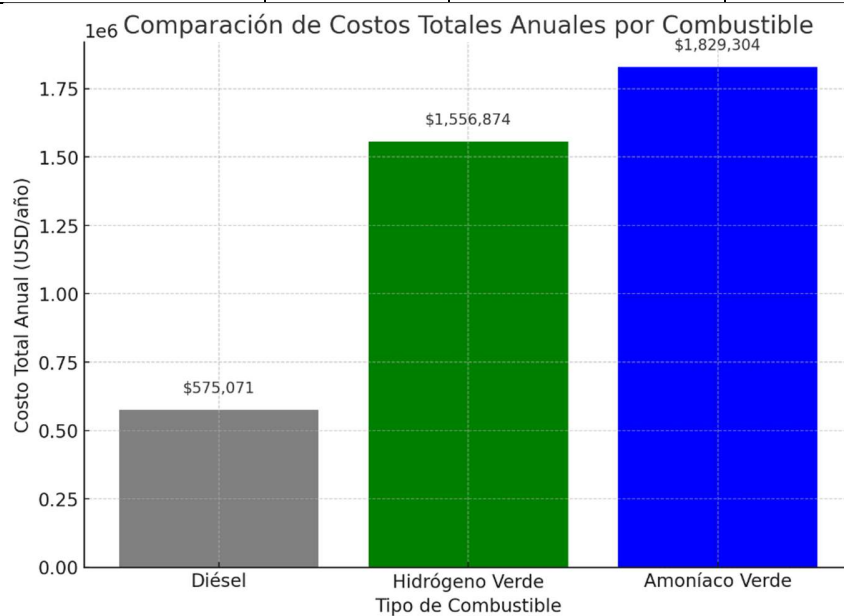
Baterías de potencia	95.354	114.425
Total	1.006.108	1.935.641

#### 4.2.6. Resumen de costos anuales

Para el resumen de costos anuales, se considera solamente los costos de combustible y los costos de transporte para los tres combustibles, tal como se presenta en la Tabla 4-23 y Figura 4-1:

**Tabla 4-23: Resumen de costos anuales de los combustibles.**

Costos	Diésel	Hidrógeno Verde	Amoníaco Verde
Costo combustible [USD/año]	569.921	1.144.182	1.800.000
Costo de transporte de combustible [USD/año]	5.150	412.692	29.304
Costo total anual [USD/año]	575.071	1.556.874	1.829.304



**Figura 4-1: Comparación de costos totales anuales por combustible.**

Era de esperar que los costos anuales del diésel fueran significativamente más bajos en comparación al hidrógeno y el amoníaco verde, esto se debe principalmente a los bajos costos de producción y transporte en comparación a los demás combustibles, ya que, el diésel presenta una infraestructura consolidada con los años. Y por su parte el hidrógeno y el amoníaco verde son combustibles que recién están emergiendo en los mercados, y sus costos de producción y de transporte aún son elevados.

Por otro lado, se tiene que el hidrógeno verde presenta un menor costo total anual en comparación al amoníaco verde, esto se debe en gran parte, a que el hidrógeno presenta una mayor densidad energética másica, por lo que necesita menos cantidad en kilogramos de hidrógeno para los requerimientos energéticos.

#### **4.2.7. Resumen de costos de los equipos**

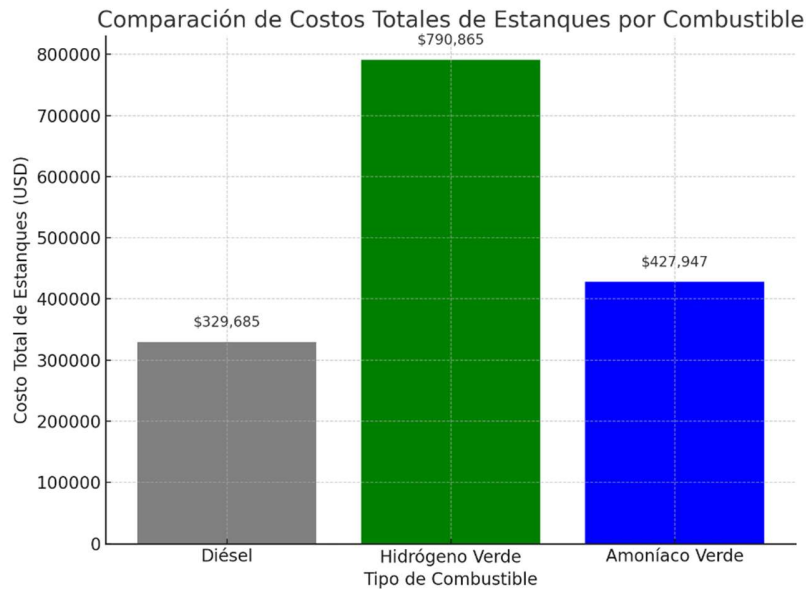
##### **4.2.7.1. Resumen de los costos de los estanques para los tres combustibles**

En la Tabla 4-24 se resumen los costos de los estanques de almacenamiento en la zona de repostaje y en los interiores de los trenes:

**Tabla 4-24: Resumen de los costos de los estanques de almacenamiento para los combustibles.**

<b>Costos</b>	<b>Diésel</b>	<b>Hidrógeno verde</b>	<b>Amoníaco verde</b>
Cc 2 estanque repostaje [USD]	94.740	376.121	146.847
Ci 2 estanque repostaje [USD]	301.272	591.895	353.379
Cc estanque tren [USD]	8.935	130.983	30.987
Ci estanque tren [USD]	28.412	198.970	74.568
Cc total de estanques [USD]	103.674	507.104	177.833
Ci total de estanques [USD]	329.685	790.865	427.947

En la Figura 4-2, se muestran gráficamente los costos instalados totales de los estanques de almacenamiento:



**Figura 4-2: Comparación de costos instalados totales de estanques de almacenamiento de los combustibles.**

Se tiene que el hidrógeno verde tiene un costo total de sus estanques notoriamente superior a los demás combustibles, y esto se debe principalmente a su baja densidad energética volumétrica en comparación a los otros combustibles, y también a que los estanques de hidrógeno verde tuvieron que ser calculados a presiones muy superiores en comparación a la presión de los estanques de los demás combustibles.

Por otro lado, los costos de los estanques de amoníaco verde son levemente superior en comparación a los del diésel y se debe a que presenta una menor densidad energética volumétrica en comparación al del diésel, y también, que los estanques del amoníaco verde, se dimensionaron a presiones un poco más altas que la atmosférica.

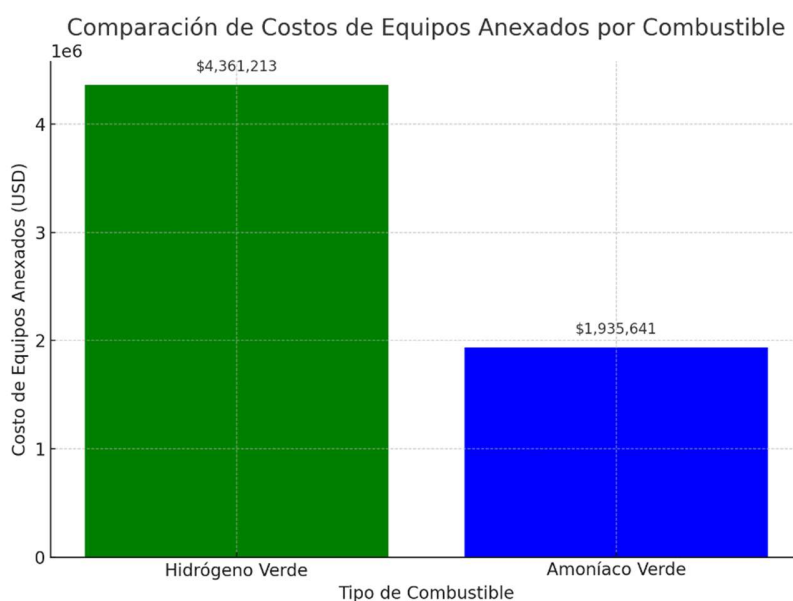
#### **4.2.7.2. Resumen de los costos de los equipos del tren de hidrógeno y amoníaco verde**

Resumen de los costos de los equipos anexados para los funcionamientos especializados para el tren de hidrógeno verde y el tren de amoníaco verde. En la Tabla 4-25 se presenta este resumen:

**Tabla 4-25: Resumen de los costos de los equipos anexados para los trenes de hidrógeno y amoníaco verde.**

Costos	Hidrógeno verde	Amoníaco verde
Cc equipos anexados [USD]	1.800.653	1.006.108
Ci equipos anexados [USD]	4.361.213	1.935.641

En la Figura 4-3, se muestran gráficamente los costos instalados totales de los equipos anexados para cada tren:



**Figura 4-3: Comparación de costos de los equipos anexados para los trenes de hidrógeno y amoníaco verde.**

De aquí se tiene que los costos de los equipos anexados del tren de hidrógeno verde son superiores notablemente a los del tren de amoníaco verde. Esta gran diferencia se debe al gran costo del compresor, que es el encargado de comprimir el hidrógeno gaseoso de 50 bar a 350 bar. También, se tiene otra consideración, la cual es que no se sabe con exactitud el valor del equipo Amogy Powerpack correspondiente al equipo principal del tren de amoníaco verde, por lo que su costo se estimó por partes, por lo que se prevé que su costo debe ser superior.

#### 4.2.8. Costos de hidrógeno y amoníaco verde para el 2030

De los anexos 7.2.20 y 7.2.21 , se tiene que los valores de costo de los combustibles para el 2030, para una base de cálculo de 180.000 km/año:

Tabla 4-26: Costos de hidrógeno y amoníaco verde para el 2030.

	Hidrógeno verde	Amoníaco verde
Costo de combustible anual [USD/año]	305.115	1.080.000

#### 4.2.8.1. Comparación de costos de hidrógeno y amoníaco verde entre 2024 y 2030

En la Tabla 4-27 se presenta una comparación de costos de hidrógeno y amoníaco entre el año 2024 y el año 2030, para una base de cálculo de 180.000 km/año:

Tabla 4-27: Comparación de costos de hidrógeno y amoníaco entre el año 2024 y 2030.

Año	Hidrógeno Verde [USD/año]	Amoníaco Verde [USD/año]
2024	1.144.182	1.800.000
2030	305.115	1.080.000

Esta tabla se representa gráficamente en la Figura 4-4:

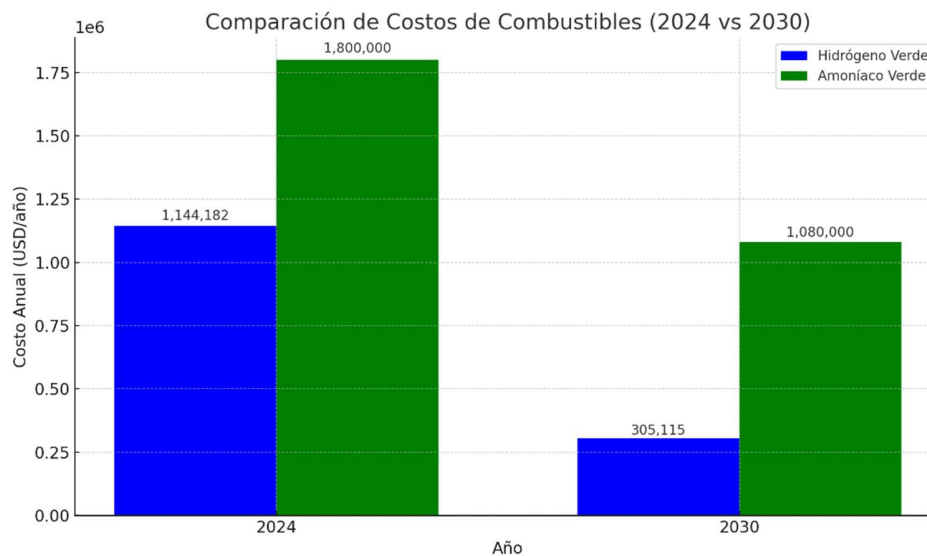


Figura 4-4: Comparación de costos anuales de hidrógeno y amoníaco verde, entre el año 2024 y 2030.

Primero que todo, se tiene una disminución de los costos de hidrógeno y amoníaco verdes en USD/kg. Se tiene que el costo anual de hidrógeno verde presenta una reducción significativa desde el 2024 al 2030, y por su lado, el costo anual de amoníaco verde disminuye, pero de una forma más moderada. Esto último se debe a la gran densidad energética másica que tiene el hidrógeno verde en comparación a la del amoníaco verde, siendo la cantidad de kilogramos de combustible el factor principal del costo anual de este mismo. Y como se ha mencionado anteriormente, la cantidad necesaria de amoníaco verde en kilogramos para recorrer los 180.000 kilómetros anuales es casi 12 veces más grande que la cantidad en kilogramos de hidrógeno verde para recorrer la misma cantidad de kilómetros.

#### **4.3. Análisis técnico-económico de los combustibles**

Aquí se hará un análisis técnico-económico, comparando el hidrógeno verde con el amoníaco verde en diversos aspectos evaluados anteriormente en esta memoria.

##### Consumo de combustible:

El consumo de combustible en volumen es menor el del amoníaco verde en comparación al del hidrógeno verde, y esto se debe a la superior densidad energética por volumen que presenta el amoníaco verde. Para el caso del consumo de combustible en masa, es menor la del hidrógeno verde en comparación a la del amoníaco verde, y esto se debe por la superior densidad energética másica que presenta el hidrógeno verde.

##### Eficiencia energética:

De lo obtenido numéricamente se tiene que el hidrógeno verde presenta una mayor eficiencia energética en comparación al amoníaco verde, que lo que quiere decir que el hidrógeno verde proporciona más energía con menos cantidad de combustible. El amoníaco verde necesita mayor cantidad de combustible para generar la misma potencia.

##### Espacio ocupado por los equipos internos:

El volumen total de los equipos principales al interior de los trenes es similar, levemente superior los equipos del amoníaco verde.

#### Análisis de riesgo:

El hidrógeno verde es más peligroso en términos de inflamabilidad por lo que es de real importancia tener cuidado en el manejo tanto en el transporte, almacenamiento y utilización al interior del tren, por lo que es primordial tener una infraestructura de seguridad de primer nivel. Para el caso del amoníaco verde es altamente tóxico por lo que es importante tener resguardo con las fugas que puedan ocurrir en el transporte, en el almacenamiento y en la utilización al interior del ferrocarril.

#### Costos de combustibles anuales:

Considerando los costos de combustible se tiene que el amoníaco presenta un mayor valor de costo, y esto se debe a que el amoníaco verde presenta un mayor consumo en kilogramo de combustible por kilómetro.

#### Costos de transporte:

El costo de transporte del hidrógeno verde es superior al costo del transporte del amoníaco verde, y esto se debe principalmente a las condiciones que se debe transportar el combustible, que para el caso del hidrógeno verde es a 50 bar, y esto conlleva a una infraestructura especializada y aumentar los requisitos de seguridad.

#### Costos de estanques de repostajes e internos:

El costo de los estanques de repostajes y los estanques internos es más caro sin duda para los estanques de combustible de hidrógeno verde, y esto se debe principalmente a las condiciones de presión en las que deben almacenar el hidrógeno verde.

#### Costos de los equipos internos de los ferrocarriles:

Los costos de los equipos internos son superiores para el tren de hidrógeno, y esto se debe principalmente al costo del compresor de hidrógeno verde, que aumenta la presión del hidrógeno de 50 bar a 350 bar.

#### Costos de los combustibles para el 2030:

Pese a que ambos combustibles disminuirán sus precios para el 2030, el caso del hidrógeno verde será notoriamente más económico que el amoníaco verde, se debe principalmente a la

densidad energética másica superior de parte del hidrógeno verde, por lo que consume menos cantidad de kilogramos por kilómetro en comparación con el amoníaco verde. Es primordial tener en cuenta que el hidrógeno verde en Chile presenta un mayor avance tanto en producción, tecnologías y aspectos legislativos comparado con el amoníaco verde, es de esperarse que en unos años esto se modifique y que el amoníaco verde sea uno de los principales combustibles utilizados en nuestro país.

#### Análisis final:

El hidrógeno verde presenta claras ventajas en eficiencia energética, menor consumo en masa y mejor proyección económica futura. Sin embargo, sus costos actuales de almacenamiento, transporte y seguridad son más altos que los del amoníaco verde. Por su parte, el amoníaco verde es más económico de manejar a nivel de infraestructura, pero requiere mayores cantidades de combustible y presenta riesgos asociados a su toxicidad.

Ambos combustibles son viables, pero la elección dependerá del enfoque del proyecto, si se prioriza la eficiencia y sostenibilidad a largo plazo, el hidrógeno es muy conveniente; si se busca una solución más inmediata el amoníaco verde representa una opción práctica a corto plazo.

## 5. Conclusiones

En la presente memoria de título se presentó un estudio técnico-económico, en donde se evaluó de hidrógeno y amoníaco verde como combustibles alternativos en el transporte de ferroviario en el norte Chile.

Desde el análisis del potencial de ambos combustibles, se concluye que tanto el hidrógeno como el amoníaco verde representan opciones viables para avanzar en la descarbonización del transporte ferroviario. La elección de uno de estos dos combustibles depende del enfoque que se busque en un proyecto, ya que ambos presentan ventajas y desventajas, si se busca una opción más práctica es más conveniente la utilización del amoníaco verde, ya que es más barato a nivel de infraestructura pero requiere mayor cantidad de combustible, por otro lado, si se busca un proyecto mayor sostenibilidad a largo plazo el hidrógeno verde presenta mejor eficiencia energética, menos consumo en masa y mejor proyección económica futura, pero la implementación inicial del sistema es considerablemente superior.

En cuanto a las tecnologías disponibles, se verificó que el hidrógeno verde es utilizado en trenes mediante celdas de combustible tipo PEM, alimentadas por depósitos de hidrógeno comprimido, con sistemas de compresión y apoyo de baterías. El amoníaco verde, por su parte, puede utilizarse en estado líquido a baja presión, y pasando por un sistema de craqueo de amoníaco llamado Amogy Powerpack, que está conformado por un reactor, absorbedor y pilas de combustibles.

Desde el punto de vista técnico, el hidrógeno verde presenta una mayor eficiencia energética (59 %) que el amoníaco verde (32 %), lo que significa una menor masa de combustible necesaria por kilómetro recorrido. No obstante, el amoníaco tiene ventajas en volumen de almacenamiento, ya que posee una mayor densidad energética volumétrica. Del análisis de riesgos, se tiene que el hidrógeno es altamente explosivo e inflamable y por su lado el amoníaco es menos inflamable, pero altamente tóxico. Ambos combustibles requieren de medidas de seguridad estrictas tanto como en el transporte de estos combustibles, en los estanques de almacenamiento y en el interior de los trenes en donde se utilicen.

Desde una perspectiva económica, el hidrógeno verde presenta menores costos operativos anuales debido a su mayor eficiencia energética y menor consumo por kilómetro, pero requiere una mayor inversión inicial en infraestructura y equipos. En cambio, el amoníaco verde tiene menores costos de instalación, pero un mayor consumo de combustible, lo que incrementa sus costos operativos. A futuro, se proyecta una disminución más significativa en el costo del hidrógeno, posicionándolo como la opción más competitiva a largo plazo.

En conclusión, la transición hacia el uso de Hidrógeno y Amoníaco Verde en el transporte ferroviario chileno es viable y representa una oportunidad estratégica para avanzar hacia un modelo de transporte sostenible y con esto reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, es fundamental continuar con estudios de factibilidad, poner en marcha políticas de incentivo y desarrollar infraestructuras seguras para garantizar una implementación exitosa de estas tecnologías con el tiempo.

## 6. Referencias

- 3M Chile. (2025). *Celdas de Combustible—Tecnología del Hidrógeno* | 3M Chile (CL). [https://www.3mchile.cl/3M/es\\_CL/hidrogeno/aplicaciones/celdas-de-combustible-de-hidrogeno/](https://www.3mchile.cl/3M/es_CL/hidrogeno/aplicaciones/celdas-de-combustible-de-hidrogeno/)
- Acciona. (2024). *El hidrógeno verde: La energía del futuro clave en la descarbonización* | ACCIONA. <https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/>
- Alianza Hidrógeno Verde. (2024). *MANUAL DEL HIDRÓGENO VERDE*.
- AlZohbi, G., Almoaikel, A., & AlShuhail, L. (2023). An overview on the technologies used to store hydrogen. *Energy Reports*, 9, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.072>
- Amogy. (2023). *Amogy Powerpack*.
- Banco Central Chile. (2025). *Hidrógeno verde en Chile: Perspectivas de demanda e inversión*. Banco Central de Chile. <https://www.bcentral.cl/web/banco-central/w/hidrogeno-verde-chile>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2020). *Desarrollo del mercado de Hidrógeno verde en Chile*.
- Borgwarner. (2024). *Explore our Technologies 9 AKM 150 CYC for commercial electric vehicles*.
- BorgWarner. (2024). *Sistemas de baterías—BorgWarner*. <https://www.borgwarner.com/technologies/battery-systems>
- Cabello, H. (2024). *Proyectos especiales de Hidrógeno, evaluación de riesgos*.
- Calvo Casas, R. (2021). USOS DE HIDRÓGENO EN TRACCIÓN FERROVIARIA. CASO PRÁCTICO SOBRE TRENES DE ANCHO VARIABLE. 2021.
- Cargopedia. (2025). *Calculadora de precios de transporte (Estimador de precios)*. <https://www.cargopedia.es/calculadora-de-precios-de-transporte?>
- Centro Nacional del Hidrógeno. (2024). *Hidrógeno*. Centro Nacional del Hidrógeno. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- Correa B., F. (2023). *HIDRÓGENO VERDE EN CHILE: CÓMO, CUÁNDO, CUÁNTO Y DÓNDE*. Centro Estudios Financieros.
- Cummins. (2021). *¿Qué es una pila de combustible?* Cummins Inc. <https://www.cummins.com/es/news/2021/10/18/what-fuel-cell>
- DISEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES. (2023). *Depositos y Recipientes de Proceso*.
- Draeger. (2025). *Amoníaco—CleanTech*. [https://www.draeger.com/es\\_es/Safety/Clean-Energy-Solutions/Zero-Carbon-Fuel-Ammonia](https://www.draeger.com/es_es/Safety/Clean-Energy-Solutions/Zero-Carbon-Fuel-Ammonia)
- Elliot. (2025). *Manual Compresores Elliot*.
- EVBoosters. (2024). *Lithium-ion batteries are getting cheaper as supply outpaces demand* | EVBoosters. <https://evboosters.com/> <https://evboosters.com/ev-charging-news/lithium-ion-batteries-are-getting-cheaper-as-supply-outpaces-demand/>
- Fluideco. (2025). *¿Qué es el amoníaco, cómo se obtiene y para qué se utiliza?* Fluideco. <https://fluideco.com/amoniaco-utilidades-usos/>
- García, A., & Franco, I. (2021). *Dinámica de los trenes en alta velocidad*.
- Global Petrol Prices. (2025). *Precios del diesel in Antofagasta, Chile—30-dic-2024*. GlobalPetrolPrices.com. [https://es.globalpetrolprices.com/Chile/Antofagasta/diesel\\_prices/](https://es.globalpetrolprices.com/Chile/Antofagasta/diesel_prices/)
- Golato, M. A., & Cárdenas, G. J. (2024). *Consumo de combustible y energía en el transporte de bioetanol*.

- H2LAC. (2024). Chile: Ferrocarril Antofagasta Bolivia (FCAB) inaugura la primera locomotora a hidrógeno en América Latina. *H2LAC*. <https://h2lac.org/noticias/chile-ferrocarril-antofagasta-bolivia-fcab-inaugura-la-primera-locomotora-a-hidrogeno-en-america-latina/>
- Hydrogenics. (2024). *Todos los catálogos y folletos técnicos Hydrogen Systems*. <https://pdf.directindustry.es/pdf/hydrogen-systems-14703.html>
- Iberdrola. (2024). *El hidrógeno verde: Una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta*. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>
- Induambiente. (2024). *Claves del Hidrógeno Verde—Induambiente*. <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde>
- Keller, G. (2024). *Análisis: Chile y Argentina lideran en Latam por su ventajas en producir de amoníaco verde*. H2news. <https://h2news.cl/2024/08/29/analisis-chile-y-argentina-lideran-en-latam-por-su-ventajas-en-producir-de-amoniaco-verde/>
- LibreTexts Español. (2022, octubre 30). *16.6: Baterías y Pilas de Combustible*. LibreTexts Español. [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica\\_General/Libro%3A\\_Chem1\\_\(Inferior\)/16%3A\\_Electroqu%C3%ADmica/16.06%3A\\_Bater%C3%ADas\\_y\\_Pilas\\_de\\_Combustible](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_General/Libro%3A_Chem1_(Inferior)/16%3A_Electroqu%C3%ADmica/16.06%3A_Bater%C3%ADas_y_Pilas_de_Combustible)
- Márquez, F. (2025). *Correlaciones analíticas actualizadas de método de Guthrie*.
- Ministerio de Energía. (2022a). *Industria del Amoníaco: Estado actual y oportunidades para la descarbonización*.
- Ministerio de Energía. (2022b). *Informe Balance Nacional de Energía 2020*.
- Ministerio de Energía. (2024). *Conceptualización de transporte de hidrógeno y amoníaco*.
- Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2011). *Análisis del transporte ferroviario de carga*.
- Paredes, J. J. (2025). *Gran Mapa Ferroviario de Chile*. <https://amigosdeltren.cl/gran-mapa-ferroviario-de-chile>
- Plan de acción de Hidrógeno Verde. (2024). *Amoníaco Verde un aliado estratégico del Hidrógeno Verde*.
- PRTR España. (2024). *NH3 (Amoníaco) | PRTR España*. <https://prtr-es.es/NH3-amoniaco,15593,11,2007.html>
- Repsol. (2024). *Electrolizador: Qué es, tipos y usos comunes*. REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/electrolizador/index.cshtml>
- Riviera Maritime Media. (2024). *Amogy to supply ammonia powerpack to Norwegian owner*. Riviera. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/amogy-to-supply-ammonia-powerpack-to-norwegian-owner-76692>
- Sinnot, G. (2013). *TEXTO N°4 Capital Cost and Equipment Towler G. Sinnott 2013*.
- s.r.o, V. A. (2025). *Hydrogen Guide: Are Fuel Cell Stacks Really Worth It?* <https://www.horizoneducational.com/hydrogen-guide-are-fuel-cell-stacks-really-worth-it/t1429>
- TuCalentadorEconómico.es. (2025). *Compra Online Kit Resistencia Bridada LAPESA KRB | Eficiencia y Durabilidad*. TuCalentadorEconomico.es. <https://tu calentadoreconomico.es/productos/6099-kit-resistencia-bridada-10-kw-lapesa-krb-100.html?m>

## 7. Anexos

### 7.1. Anexo A

#### 7.1.1. Propiedades del hidrógeno

Tabla 7-1: Propiedades del hidrógeno en comparación con el GN (Induambiente, 2024).

Propiedad	Valor	Comparación con GN
Densidad (gas)	0,089 [kg/m <sup>3</sup> ]	1/10 del GN
Densidad (líquido)	70,79 [kg/m <sup>3</sup> ]	1/6 del GNL
Temp. de ebullición	-252,76 [°C]	93°C menos que el GN
Velocidad de llama	346 [cm/s]	8 veces la del GN
Rango de ignición	4-77 % en aire	6 veces el del GN
Energía de ignición	0,03 [MJ]	1/10 la del GN
Poder calorífico superior	33,3 [kWh/kg]	3 veces el del GN

#### 7.1.2. Electrolizadores

Tabla 7-2: Tipos de electrolizadores. (Repsol, 2024)

	Electrolizador Alcalino	Electrolizador PEM	Electrolizador de Óxido-sólido
Proceso	Las moléculas de $H_2O$ se rompen y los iones $OH^+$ se transfieren a través de un electrolito alcalino	Las moléculas de $H_2O$ se rompen y los iones $H^+$ se transfieren a través de un electrolito de membrana polimérica.	Las moléculas de $H_2O$ se rompen y los iones $O^{2-}$ se transfieren a través de un electrolito de óxido-sólido.
Eficiencia	60% - 70% (LHV)	55% - 65% (LHV)	70% - 80% (LHV)
Pureza $H_2$	98 - 99,9% ( $H_2$ O, posibles trazas KOH)	99,9 - 99,999% ( $H_2O$ )	Información no disponible
Fortalezas	Tecnología madura, catalizador no noble,	Alta densidad de corriente nominal,	Eficiencias teóricas de hasta 100%,

	<p>vida útil de la pila comparativamente larga, costos comparativamente bajos, tecnología de la pila madura en el rango de los MW.</p>	<p>amplio rango de operación, respuesta dinámica, altas densidades de potencia peak, ausencia de fluidos corrosivos, pureza del gas, diseño compacto del sistema.</p>	<p>catalizadores no nobles, co-electrólisis, operación reversible, altas densidades de corriente, es posible una operación flexible, posiblemente el CAPEX más bajo por <math>Nm_3</math> de <math>H_2</math> al 2030.</p>
<p>Debilidades</p>	<p>Bajas densidades de corriente, cruce de gases, dinámica baja, bajas presiones operacionales, electrolito líquido corrosivo.</p>	<p>Altos costos de los materiales de la pila, vida útil actual de la pila es de 50.000 h, ambiente ácido corrosivo dentro de la pila (pH: 2-4), capacidad de la pila, recientemente en escala MW.</p>	<p>Largos tiempos de encendido y apagado, el tamaño de la celda es limitado, se requiere una fuente de calor adicional.</p>

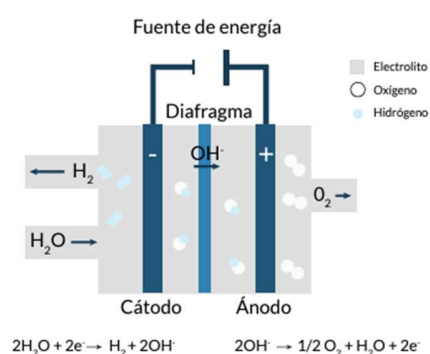


Figura 7-1: Electrolizador Alcalino (Alianza Hidrógeno Verde, 2024).

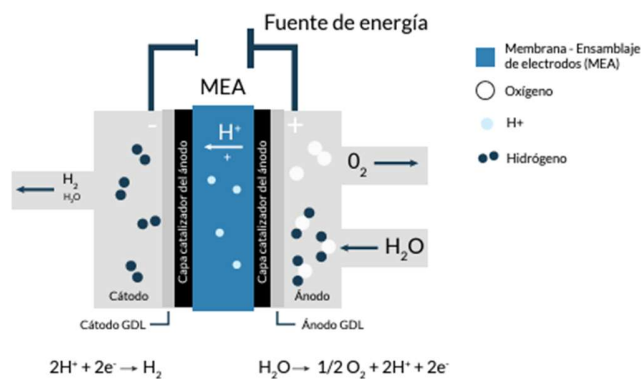


Figura 7-2: Electrolizador PEM (Alianza Hidrógeno Verde, 2024).

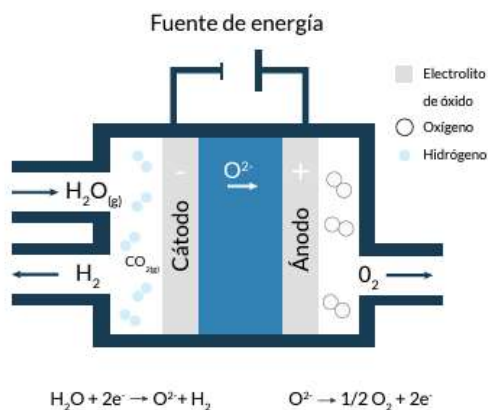


Figura 7-3: Electrolizador de Óxido-sólido (SOEC) (Alianza Hidrógeno Verde, 2024).

### 7.1.3. Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno

Tabla 7-3: Resumen de las características de las diferentes tecnologías utilizadas para almacenar hidrógeno (AlZohbi et al., 2023).

Tecnología de almacenamiento	Contenido de hidrógeno, % en peso	Densidad de energía volumétrica, MJL <sup>-1</sup>	Ventajas	Desventajas
Gas comprimido	2–4 % en peso	25–30 kg/m <sup>3</sup>	Alto rendimiento y tecnología	Rango limitado de almacenamiento

			<p>madura</p> <p>Carga y descarga rápida de hidrógeno</p> <p>Estructura de recipiente simple</p>	<p>de hidrógeno</p> <p>La alta presión puede causar problemas de seguridad</p> <p>Requiere gestión del calor</p>
Hidrógeno líquido	16% en peso	50 kg/m <sup>3</sup>	<p>Mayor densidad gravimétrica y volumétrica que el hidrógeno gaseoso</p> <p>Alta pureza del hidrógeno</p>	<p>Consumo intensivo de energía y de tiempo</p> <p>Costoso</p> <p>Existencia de disipación de hidrógeno</p> <p>Problema de seguridad</p>
Criocomprimido	5% en peso	30 kg/m <sup>3</sup>	Alta densidad volumétrica	Alta energía de compresión y licuefacción.
Material absorbente de fisisorción y a base de carbono	5–9 % en peso	40–60 kg/m <sup>3</sup>	Alta densidad de almacenamiento, luz	Depende de la geometría y la temperatura del absorbente, es pesado, requiere un sistema de enfriamiento y es costoso.
Quimisorción				

Hidruros metálicos	1–2 % en peso	50–175 kg/m <sup>3</sup>	No se requiere alta presión y, por lo tanto, se reduce el costo de inversión inicial; es seguro y se puede utilizar el efecto térmico en el subsistema.	Depende de las propiedades del metal, baja capacidad de almacenamiento de hidrógeno debido al peso de los hidruros metálicos, costosa y alta temperatura de operación para liberar H <sub>2</sub> .
Hidruros químicos	6–8% en peso	Puede alcanzar los 150 kg/m <sup>3</sup> para Mg <sub>2</sub> FeH <sub>6</sub>	Buena densidad volumétrica	Necesidad de gestión térmica y regeneración fuera de borda
LOHC	5,5 % en peso	60 kg/m <sup>3</sup>	Posibilidad de almacenamiento en forma líquida, aprovechamiento de la infraestructura existente Viabilidad de almacenamiento >1 año	Se requiere una gran cantidad de hidrógeno generado para la deshidrogenación.
Amoníaco	17,8 % en peso	107 kg/m <sup>3</sup>	Energía barata, posibilidad de uso directo y	Requiere un tratamiento especial debido a

			aprovechamiento de infraestructuras existentes	su olor y toxicidad. Se necesita alrededor del 13% de H <sub>2</sub> para la deshidrogenación y purificación.
--	--	--	--	---

#### 7.1.4. Propiedades del amoníaco

Tabla 7-4: Propiedades del amoníaco como combustible (Ministerio de Energía, 2022a).

Propiedades	Valor	Unidad
Poder calorífico inferior	18,6	[MJ/kg]
Densidad energética	12,7	[MJ/L]
Índice de Wobbe	18,4	[MJ/Nm <sup>3</sup> ]
Velocidad de llama en aire seco	6	[cm/s]
Peso molecular	17,03	[g/mol]
Densidad en estado líquido	618	[kg/m <sup>3</sup> ]
Temperatura de evaporación a 1 bar	-33,6	[°C]
Temperatura de autoignición	651	[°C]

### 7.1.5. Tipos de amoníaco

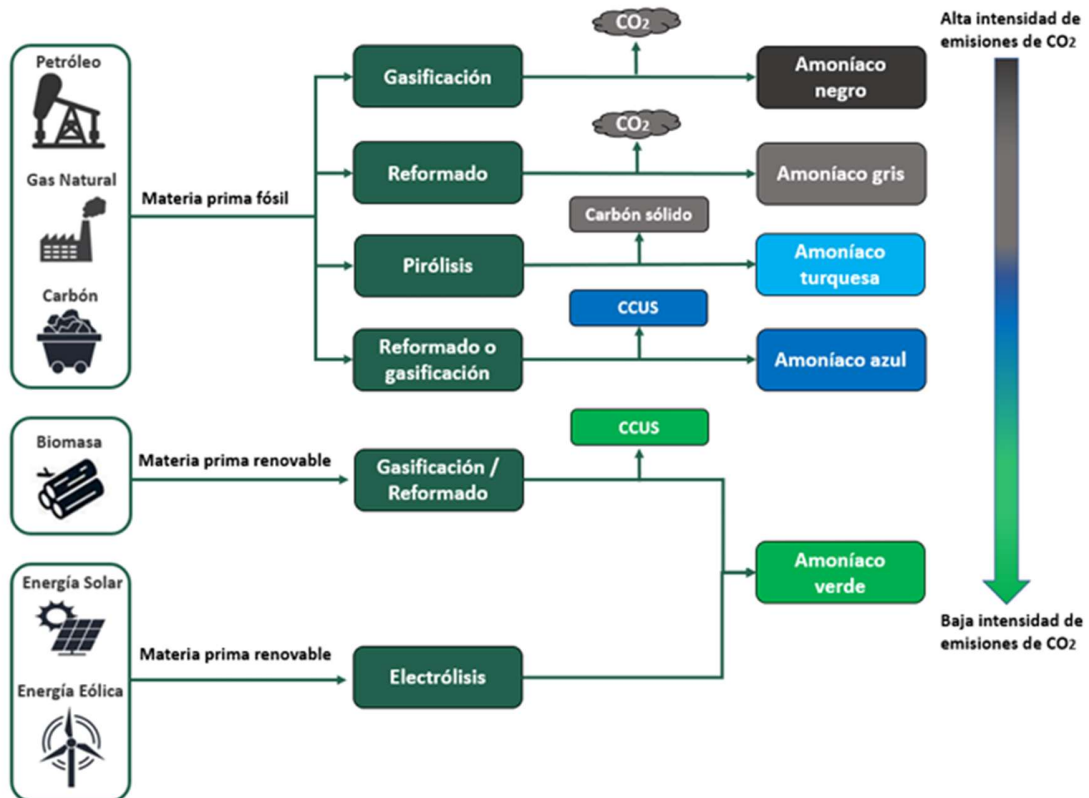


Figura 7-4: Colores del amoníaco (Ministerio de Energía, 2022a).

### 7.1.6. Proceso de producción de amoníaco verde

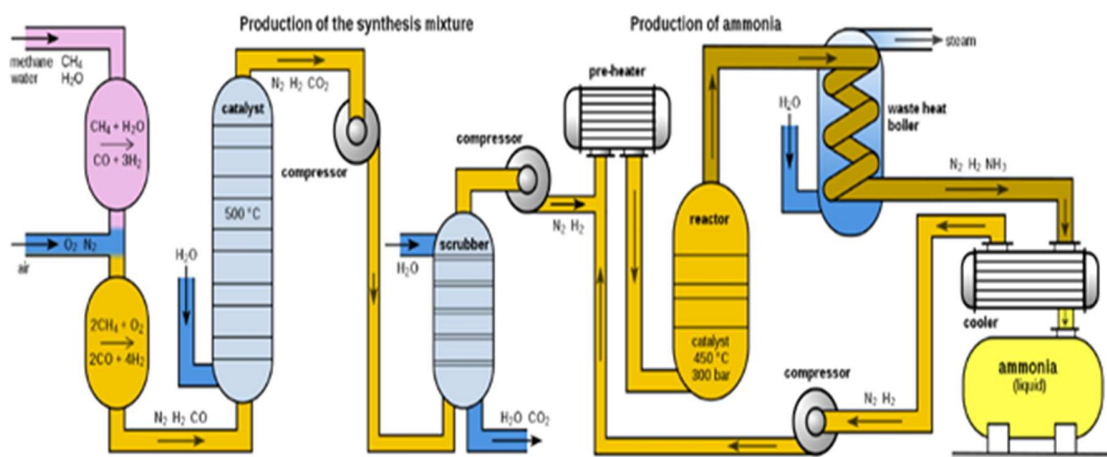


Figura 7-5: Proceso convencional para la producción de amoníaco (Ministerio de Energía, 2022a).

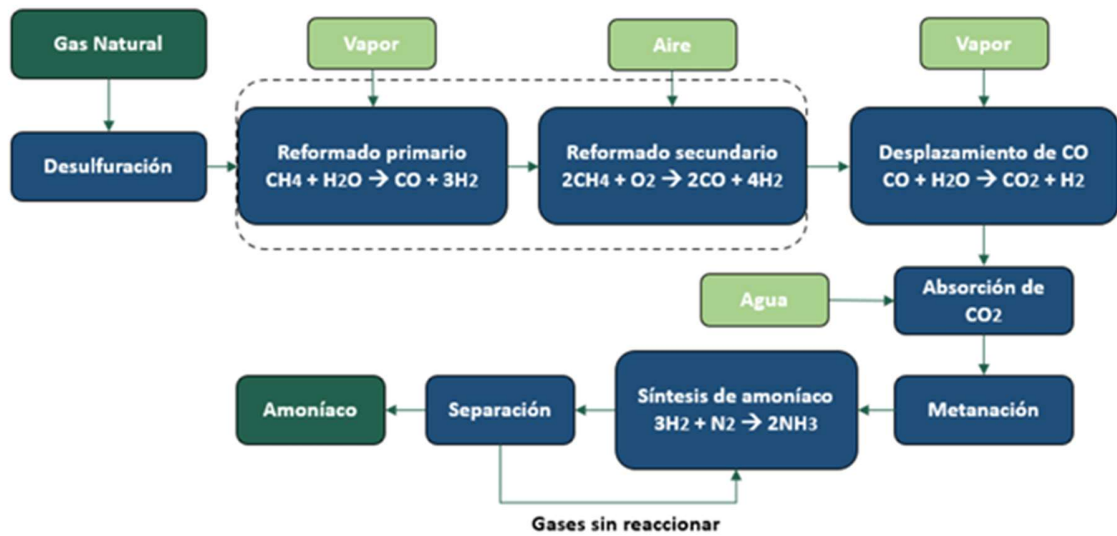


Figura 7-6: Esquema simplificado de las etapas del proceso de producción de amoníaco (Ministerio de Energía, 2022a).

### 7.1.7. Ferrocarriles y consumo de energético en el norte de Chile

Del Informe de Balance Nacional de Energía 2020 (Ministerio de Energía, 2022b), del Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, se tiene que el consumo de diésel para transporte ferroviario en el norte del país está dado en la Tabla 7-5:

Tabla 7-5: Consumo de diésel en transporte ferroviario en regiones del norte del país (Ministerio de Energía, 2022b).

	<b>Arica y Parinacota</b>	<b>Tarapacá</b>	<b>Antofagasta</b>	<b>Atacama</b>	<b>Coquimbo</b>
Consumo de diésel en transporte ferroviario (Teracalorías)	-	0	250	74	0

Del Análisis del transporte ferroviario de carga (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2011), del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones Subsecretaría de Transportes (2011), se tiene que en el mercado de transporte de servicio público de carga por ferrocarril en el norte de Chile se encuentran dos ferrocarriles:

**El Ferrocarril del Norte (Ferronor):** la principal actividad actual de Ferronor es el transporte de minerales de hierro de la mina Los Colorados de CAP. Es fundamental para la logística minera y portuaria, asegurando la conexión entre minas y puertos en el norte de Chile.

**El Ferrocarril de Antofagasta a Bolivia (FCAB):** transporta principalmente productos mineros, va desde Antofagasta hasta Bolivia, cumpliendo un rol clave en la exportación de minerales.

La red ferroviaria del norte de Chile se presenta en la Figura 7-7 (Paredes, 2025).

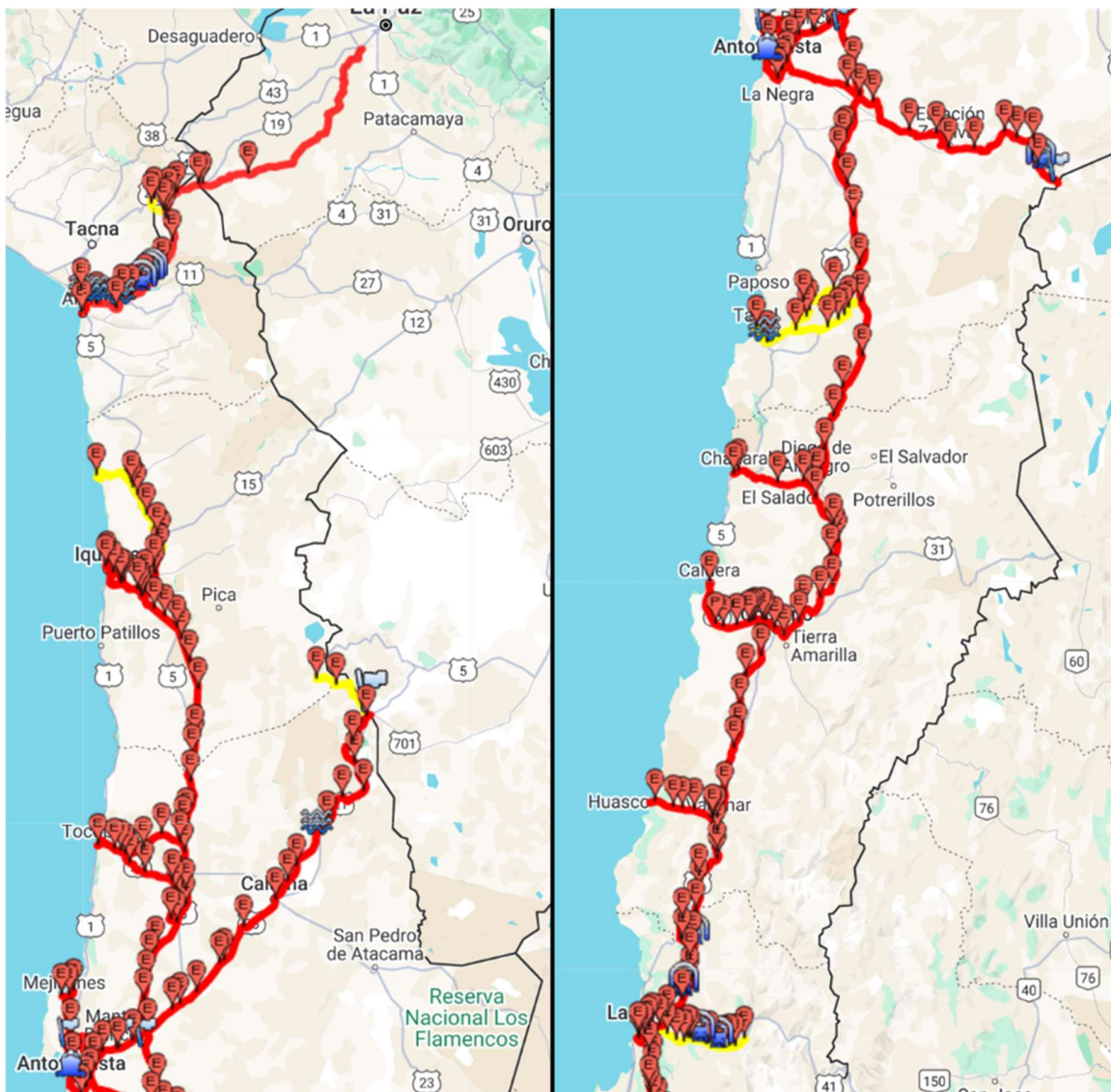


Figura 7-7: Red ferroviaria en el norte de Chile (Paredes, 2025).

### 7.1.8. Recorrido tren FCAB



Figura 7-8: Recorrido de tren FCAB.

### 7.1.9. Catálogo pilas de hidrógeno Hydrogenics - Cummins



Figura 7-9: Catálogo pilas de hidrógeno Hydrogenics – Cummins. (Hydrogenics, 2024)

## 7.2. Anexo B

### 7.2.1. Balance de energía del ferrocarril

Con las ecuaciones descritas en el capítulo 3.1.2 (Calvo Casas, 2021) se obtiene el siguiente desarrollo:

- Resistencia a la rodadura:

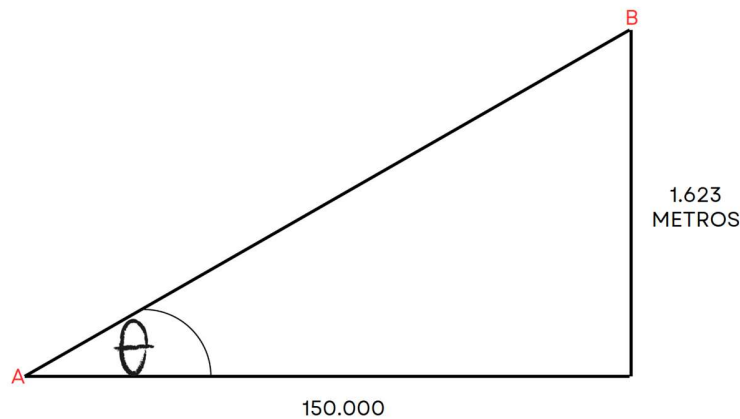
$$R_r = 64.000 [kg] \cdot 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot 0,005 = 3.139 [N]$$

- Resistencia aerodinámica:

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,3 \cdot 11,76 [m^2] \cdot \left( 16,67 \left[ \frac{m}{s} \right] \right)^2 = 588 [N]$$

- Resistencia gravitatoria:

Para el caso de la resistencia gravitatoria se tienen lo siguiente:



**Figura 7-10: Triángulo rectángulo con la distancia y diferencia de altura del recorrido del tren.**  
(elaboración propia)

Realizando el teorema de Pitágoras para este caso, se tiene que:

$$h^2 = 1.623^2 + 150.000^2 = 2,25 \cdot 10^{10}$$

$$h = 150.009 [m]$$

$$\sin \theta = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{hipotenusa}} = \frac{1.623}{150.009} = 0,01$$

De aquí se calcula la resistencia gravitatoria:

$$R_g = P_x = 64.000 [kg] \cdot 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot 0,01 = 6.793 [N]$$

Se tiene que la resistencia total es:

$$R_t = 3.139,2[N] + 588 [N] + 6.793,2 [N] = 10.520 [N]$$

Y, por lo tanto, la potencia necesaria es igual a:

$$Potencia = 10.520,4 [N] \cdot 16,7 \left[ \frac{m}{s} \right] = 175.340 [w] = 175 [kW]$$

Como:

$$1.000 [kW] > 175 [kW]$$

El tren de 1.000 kW es lo suficientemente potente como para moverse.

### 7.2.2. Consumo de combustible para una locomotora a diésel

Con las ecuaciones descritas en el capítulo 3.1.3 (Golato & Cárdenas, 2024) y considerando las mismas características generales del tren de hidrógeno de FCAB, se obtiene los siguientes cálculos para obtener el consumo de una locomotora a diésel:

Capacidad de carga (T), se obtiene con el siguiente calculo:

$$T = 1 [vagón] \cdot 64 [t] = 64 [t]$$

Además, tenemos que la potencia efectiva es:

$$N_e = 0,75 \cdot 1000 [kW] = 750 [kW]$$

La potencia específica de transporte es igual a:

$$N_{et} = \frac{750 [kW]}{64 [t]} = 11,7 \left[ \frac{kW}{t} \right]$$

El consumo específico de transporte queda igual a:

$$B_{et} = 11,7 \left[ \frac{kW}{t} \right] \cdot 227 \left[ \frac{g}{kWh} \right] = 2.660 \left[ \frac{g}{t \cdot h} \right]$$

Su equivalente en volumen es igual a:

$$B'_{et} = \frac{2.660 \left[ \frac{g}{t \cdot h} \right]}{850 \left[ \frac{g}{L} \right]} = 3,1 \left[ \frac{L}{t \cdot h} \right]$$

Para el consumo específico de la carga, cada 100 km de recorrido y moviéndose a una velocidad de 60 km/h constante, se obtiene el siguiente resultado:

$$B = \frac{2.660 \left[ \frac{g}{t \cdot h} \right] \cdot 100}{60 \left[ \frac{km}{h} \right] \cdot 850 \left[ \frac{g}{L} \right]} = 5,2 \left[ \frac{L}{t \cdot 100 km} \right]$$

Para el volumen de combustible total necesario para transportar una determinada carga cada 100 km es igual a:

$$V_{comb} = 5,2 \left[ \frac{L}{t \cdot 100 km} \right] \cdot 64 [t] = 333,8 \left[ \frac{L}{100 km} \right]$$

El volumen de combustible diésel que se necesita para cumplir este recorrido es igual a:

$$V'_{comb} = 333,8 \left[ \frac{L}{100 km} \right] \cdot 150 [km] = 500 [l]$$

El consumo de combustible en kg es igual a:

$$V''_{comb} = 500,7 [L] \cdot 0,850 \left[ \frac{kg}{L} \right] = 425,6 [kg]$$

### 7.2.3. Consumo de combustible para tren de hidrógeno verde

Con las ecuaciones descritas en el capítulo 3.1.4 (Calvo Casas, 2021) y considerando las mismas características generales del tren de hidrógeno de FCAB, se obtiene los siguientes cálculos para obtener el consumo de un tren de hidrogeno verde:

### Selección de pilas de hidrógeno

Del catálogo pilas de hidrógeno de la empresa Hydrogenics – Cummins, se eligió el modelo HD 30, que presenta las siguientes características:

**Tabla 7-6: Datos técnicos de modelo HD 30. (Hydrogenics, 2024)**

<b>Especificaciones técnicas de HD 30</b>	
Potencia continua [kW]	31
Dimensiones [L × A × H, mm]	719 × 406 × 261
Volumen [L]	76
Masa [kg]	72
Corriente operativa [Aop]	0–500
Voltaje operativo [Vop]	60–120
Eficiencia máxima %	59%

Con esta información se pueden obtener la cantidad de pilas que se necesitan:

$$Cantidad\ de\ pilas = \frac{400\ [kW]}{31\ [kW]} = 12,9 \approx 13\ pilas$$

Se tiene que la potencia total de las pilas de hidrógeno es igual:

$$Potencia\ total = 13\ pilas \cdot 31\ [kW] = 403\ [kW]$$

### Selección de Baterías de potencia

El sistema elegido es el AKASYSTEM 9 AKM 150 CYC, de la compañía Akasol, ahora parte de BorgWarner.

**Tabla 7-7: Especificaciones AKASYSTEM 9 AKM 150 CYC. (Borgwarner, 2024)**

Modelo	Energía	Capacidad	Ciclos de vida	Peso	Dimensiones (l x a x h)
9 AKM 150 CYC	98 kWh	148 Ah	4000	535 kg	1720x700x300 mm

Teniendo la batería seleccionada, la cantidad de baterías necesarias se obtienen a continuación:

$$\text{Cantidad de baterías} = \frac{600 [kW]}{98 [kW]} = 6,1 \approx 7 \text{ baterías}$$

Se tiene que la potencia total de las baterías de potencia es igual:

$$\text{Potencia total} = 7 \text{ baterías} \cdot 98 [kW] = 686 [kW]$$

Cantidad de hidrógeno verde requerido

Se tiene que el tiempo requerido en alcanzar el recorrido es igual:

$$t = \frac{150 [km]}{60 \left[ \frac{km}{h} \right]} = 2,5 [h]$$

La energía requerida para realizar cierto recorrido se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\text{Energía requerida} = 1.000 [kW] \cdot 2,5 [h] = 2.500 [kWh]$$

El consumo de hidrógeno en kg es igual a:

$$\text{Consumo de } H_2 \text{ verde en } \frac{kg}{h} = \frac{2.500 [kWh]}{33,3 \left[ \frac{kWh}{kg} \right]} \cdot \frac{1}{0,59} = 127 [kg]$$

La cantidad de hidrógeno requerido en  $m^3$ , es igual a:

$$\text{Volumen de } H_2 \text{ verde en } m^3 = \frac{127 [kg]}{25 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 5,08 [m^3]$$

#### 7.2.4. Consumo de combustible para tren de amoniaco verde

Con las ecuaciones descritas en el capítulo 3.1.5 y considerando las mismas características generales del tren de hidrógeno de FCAB, se obtiene los siguientes cálculos para obtener el consumo de un tren de hidrogeno verde:

##### Amogy Powerpack

En la siguiente tabla se presenta las características del Amogy Powerpack:

**Tabla 7-8: Características de Amogy Powerpack (Amogy, 2023).**

<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Características físicas	Dimensiones del reactor [m]	1,2 × 1,2 × 2,2
	Dimensiones del absorbedor [m]	1,2 × 0,8 × 2,2
	Dimensiones de la pila de combustible [m]	1,2 × 0,75 × 2,2
	Peso seco del Powerpack [kg]	3.500
Características de rendimiento	Potencia bruta de salida [kW]	200
	Voltaje de salida [V]	350–720 DC
	Corriente máxima de salida [A]	450
	Eficiencia térmica del sistema %	40
	Consumo de combustible [kg/kWh]	0,6
	Tiempo de arranque en frío [h]	2
	Rechazo de calor máximo [kW]	350
Combustible (NH <sub>3</sub> )	Temperatura [°C]	35
	Presión [barg]	9
	Flujo máximo [m <sup>3</sup> /h]	190
Entrada de aire	Temperatura [°C]	25

	Flujo máximo [m <sup>3</sup> /h]	1.200
Requisitos de potencia	Potencia máxima [kW]	5
	Voltaje [V]	24 DC / 400 DC
Sistema de escape	Aire del cátodo - Temperatura [°C]	80
	Aire del cátodo - Flujo máx. [m <sup>3</sup> /h]	750
	Aire del combustible - Temperatura [°C]	600–650
	Aire del combustible - Flujo máx. [m <sup>3</sup> /h]	620 (arranque), 260 (normal)
Subproducto H <sub>2</sub> O	Flujo [m <sup>3</sup> /h]	≤ 180
	Temperatura [°C]	80
Protocolo de comunicación		CAN bus (SAE-J1939)

Se tiene para el Amogy Powerpack modificado (considerando dos pilas de combustible) las siguientes características físicas:

**Tabla 7-9: Características físicas de Amogy Powerpack modificado. (elaboración propia)**

<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Características físicas	Dimensiones del reactor [m]	1,2 × 1,2 × 2,2
	Dimensiones del adsorbedor [m]	1,2 × 0,8 × 2,2
	Dimensiones de la pila de combustible [m]	1,2 × 0,75 × 2,2

	Peso seco del Powerpack [kg]	4.455
	Volumen total de Powerpack [m <sup>3</sup> ]	9,24

### Cambio de fase y aumento de temperatura del amoníaco

El amoníaco líquido que ingresa al tren a 20°C y 10 bar es calentado por una corriente de aire sobrecalentado, a través de un intercambiador de calor, para llevarlo a 35°C y 10 bar.

Se tiene que el flujo de amoníaco es de 600 kg/h. La temperatura crítica del amoníaco a 10 bar es de 24,9°C. En este punto es donde ocurre el cambio de estado del amoníaco a esa presión, por lo tanto, el procedimiento es el siguiente:

El calentamiento del amoníaco líquido de 20°C a 24,9°C:

$$Q_1 = m \cdot c_l \cdot \Delta T = 600 \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot 4,744 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (297,9 - 293) [K] = 13.919 \left[ \frac{kJ}{h} \right]$$

$$= 3,87 [kW]$$

El cambio de fase de líquido a vapor a 24,9°C:

$$Q_2 = m \cdot h_{vap} = 600 \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot 1.373,5 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = 824.118 \left[ \frac{kJ}{h} \right] = 228,9 [kW]$$

El calentamiento del vapor de 24,9°C hasta 35°C:

$$Q_3 = m \cdot c_v \cdot \Delta T = 600 \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot 2,175 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (308 - 297,9) [K] = 13.441,5 \left[ \frac{kJ}{h} \right]$$

$$= 3,73 [kW]$$

Por lo tanto, el calor total necesario queda igual a:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 3,87 [kW] + 228,9 [kW] + 3,73 [kW] = 236,5 [kW]$$

Además, el aire caliente que ingresa al sistema es a 100°C y sale del intercambiador de calor a 50°C. En la siguiente tabla se presenta un resumen de las características del intercambiador de calor necesario para el procedimiento mencionado anteriormente:

**Tabla 7-10: Características principales del intercambiador de calor del amoníaco. (Elaboración propia)**

Parámetro	Valor	Unidad
Q (Flujo de calor)	236.522	[W]
U (Coeficiente global de transferencia)	300	[W/m <sup>2</sup> K]
LMTD (Diferencia de temperatura media logarítmica)	45	[K]
F (Factor de corrección)	1	-
A (Área de intercambio térmico)	17	[m <sup>2</sup> ]

La masa del aire necesaria para cumplir el procedimiento se obtiene de la siguiente manera:

$$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{851.478 \left[ \frac{kJ}{h} \right]}{1,012 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (373 - 287)[K]} = 16.828 \left[ \frac{kg}{h} \right] = 4,67 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

#### Resistencias eléctricas para elevar temperatura del aire ambiental

Previamente se debe calentar el aire que proviene del ambiente a 20°C, para llevarlo a condiciones de 100°C, esto se realiza con ayuda de resistencias, el calor necesario para este aumento de calor se obtiene de la siguiente manera:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 16.828 \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot 1,012 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (373 - 293) [K] = 1.362.365 \left[ \frac{kJ}{h} \right]$$

$$= 378 [kW]$$

**Tabla 7-11: Características principales de las resistencias utilizadas para calentar el aire ambiental. (elaboración propia)**

Parámetro	Valor	Unidad
Calor	378	[kW]
Potencia de las resistencias	10	[kW]
Resistencias totales	38	-
Energía total disponible en baterías	686	[kWh]
Tiempo de operación disponible	1,81	[Horas]

#### Cantidad de amoníaco verde requerido

Del catálogo del Amogy Powerpack (Tabla 7-8), se tiene que el consumo de amoníaco es

$$\text{Consumo de amoníaco en } \frac{[kg]}{[kWh]} = 0,6 \left[ \frac{kg}{kWh} \right]$$

Además, es conocido que el tiempo necesario por el ferrocarril para cumplir el recorrido es de 2,5 horas. Luego, se tiene que la energía requerida es igual a:

$$\text{Energía requerida} = 1.000 [kW] \cdot 2,5 [h] = 2.500 [kWh]$$

Por ende, el consumo de amoníaco verde en kg para cumplir este recorrido es:

$$\text{Consumo de } NH_3 = 0,6 \left[ \frac{kg}{kWh} \right] \cdot 2.500 [kWh] = 1.500 [kg]$$

La cantidad de hidrogeno verde en  $m^3$ , necesario para recorrer cierta distancia es igual a:

$$\text{Volumen de } NH_3 \text{ verde en } m^3 = \frac{1.500 [kg]}{610,52 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 2,46 [m^3] = 2.456 [l]$$

#### **7.2.5. Eficiencia energética de los combustibles**

Eficiencia energética para el tren a diésel:

La energía útil para el tren a diésel es:

$$E_{\text{útil}} = 750 \text{ [kW]} \cdot 2,5 \text{ [h]} = 1.875 \text{ [kWh]}$$

Y la energía del combustible es igual a:

$$E_{\text{combustible}} = 12 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \cdot 425,6 \text{ [kg]} = 5.107 \text{ [kWh]}$$

Por lo tanto, la eficiencia energética para el tren a diésel es:

$$\eta = \frac{1.875 \text{ [kWh]}}{5.107 \text{ [kWh]}} \cdot 100\% = 37\%$$

Eficiencia energética para el tren de hidrógeno verde:

La energía útil para el tren de hidrógeno verde es:

$$E_{\text{útil}} = 1.000 \text{ [kW]} \cdot 2,5 \text{ [h]} = 2.500 \text{ [kWh]}$$

Y la energía del combustible es igual a

$$E_{\text{combustible}} = 33,33 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \cdot 127 \text{ [kg]} = 4.233 \text{ [kWh]}$$

Por lo tanto, la eficiencia energética para el tren a hidrógeno verde es:

$$\eta = \frac{2.500 \text{ [kWh]}}{4.233 \text{ [kWh]}} \cdot 100\% = 59\%$$

Eficiencia energética para el tren de amoníaco verde:

La energía útil para el tren de amoníaco verde es:

$$E_{\text{útil}} = 1.000 \text{ [kW]} \cdot 2,5 \text{ [h]} = 2.500 \text{ [kWh]}$$

Y la energía del combustible es igual a

$$E_{\text{combustible}} = 5,2 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \cdot 1.500 \text{ [kg]} = 7.800 \text{ [kWh]}$$

Por lo tanto, la eficiencia energética para el tren a hidrógeno verde es:

$$\eta = \frac{2.500 [kWh]}{7.800 [kWh]} \cdot 100\% = 32\%$$

### 7.2.6. Estimación de costos de combustible para tren a diésel

Para la fecha de diciembre del 2024 para Antofagasta el diésel tiene un costo de 958,2 CLP/L (Global Petrol Prices, 2025).

$$\text{Costo diesel en } \left[ \frac{USD}{kg} \right] = 958,28 \left[ \frac{CLP}{L} \right] \cdot \frac{1[USD]}{1.010 [CLP]} \cdot \frac{1}{0,850 \left[ \frac{kg}{L} \right]} = 1,12 \left[ \frac{USD}{kg} \right]$$

También, se tiene que:

$$\text{Consumo } \left[ \frac{kg}{km} \right] = \frac{426 [kg]}{150 [km]} = 2,84 \left[ \frac{kg}{km} \right]$$

La cantidad de diésel en kg anual es igual a:

$$\text{Consumo } \left[ \frac{kg}{año} \right] = 180.000 \left[ \frac{km}{año} \right] \cdot 2,84 \left[ \frac{kg}{km} \right] = 510.750 \left[ \frac{kg}{año} \right]$$

Finalmente, el costo de diésel anual es igual a:

$$\text{Costo anual diésel } \left[ \frac{USD}{año} \right] = 1,12 \left[ \frac{USD}{kg} \right] \cdot 510.750 \left[ \frac{kg}{año} \right] = 569.921 \left[ \frac{USD}{año} \right]$$

### 7.2.7. Estimación de costos de combustible para tren de hidrógeno verde

El hidrógeno verde tiene costos que están entre 3,0 – 7,5 USD/Kg. Se elegirá 7,5 USD/kg, que es el costo menos optimista (Correa B., 2023).

Se tiene que:

$$\text{Consumo } \left[ \frac{kg}{km} \right] = \frac{127 [kg]}{150 [km]} = 0,85 \left[ \frac{kg}{km} \right]$$

La cantidad de hidrógeno verde en kg anual es igual a:

$$\text{Consumo } \left[ \frac{kg}{año} \right] = 180.000 \left[ \frac{km}{año} \right] \cdot 0,85 \left[ \frac{kg}{km} \right] = 152.558 \left[ \frac{kg}{año} \right]$$

Finalmente, el costo de hidrógeno verde anual es igual a:

$$\text{Costo anual hidrógeno verde} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] = 7,5 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right] \cdot 152.558 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right] = 1.144.182 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

### 7.2.8. Estimación de costos de combustible para tren de amoníaco verde

Se estima que los costos de producción de amoníaco verde en Chile y Argentina podrían ser inferiores a los 600 EUR/tonelada de NH<sub>3</sub> para 2030 (Keller, 2024). Por lo tanto, se asumirá un valor de 1.000 USD/ tonelada de NH<sub>3</sub>:

$$\text{Costo NH}_3 \text{ verde en} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right] = 1.000 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{t}} \right] \cdot \frac{1[\text{t}]}{1.000 [\text{kg}]} = 1 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right]$$

También, se tiene que:

$$\text{Consumo} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{km}} \right] = \frac{1.500 [\text{kg}]}{150 [\text{km}]} = 10 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{km}} \right]$$

La cantidad de amoníaco verde en kg anual es igual a:

$$\text{Consumo} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right] = 180.000 \left[ \frac{\text{km}}{\text{año}} \right] \cdot 10 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{km}} \right] = 1.800.000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right]$$

Finalmente, el costo de amoníaco verde anual es igual a:

$$\text{Costo anual amoníaco verde} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] = 1 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right] \cdot 1.800.000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right] = 1.800.000 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

### 7.2.9. Estimación de costos de transporte de diésel

Para la estimación de costos de transporte de diésel, se utilizó una calculadora de precios de transporte (Cargopedia, 2025). En donde, se eligió el costo para transporte de 30 toneladas por camión, dando así un costo de 2,9647 euro/km. Para un recorrido de 100 km, desde la planta de diésel hasta los estanques de repostaje de diésel. El costo anual de transporte de diésel queda expresado en el siguiente procedimiento:

$$\begin{aligned} \text{Costo transporte de diésel} \left[ \frac{\text{USD}}{30 [\text{t}]} \right] &= \frac{2,9647 \left[ \frac{\text{EUR}}{\text{km}} \right]}{30 [\text{t}]} \cdot \frac{1[\text{USD}]}{0,98 [\text{EUR}]} \cdot 100 [\text{km}] \\ &= 302,5 \left[ \frac{\text{USD}}{30 [\text{t}]} \right] \end{aligned}$$

Luego, el costo de transporte de diésel anual es igual a:

$$\begin{aligned}
& \text{Costo anual de transporte de diésel} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] \\
&= 302,5 \left[ \frac{\text{USD}}{30 \text{ [t]}} \right] \cdot \frac{1 \text{ [t]}}{1.000 \text{ [kg]}} \cdot 2,84 \left[ \frac{\text{kg diésel}}{\text{km}} \right] \cdot 180.000 \left[ \frac{\text{km}}{\text{año}} \right] \\
&= 5.150 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]
\end{aligned}$$

### 7.2.10. Estimación de costos de transporte de hidrógeno verde

En la Figura 7-11 se presenta los coeficientes para el cálculo de costo de transporte de hidrógeno y amoníaco en USD/kg (Ministerio de Energía, 2024).

Método de transporte	A	B
Camión gaseoso	0,0025906	2,4460918
Camión líquido	0,0007046	4,0048049
Gaseoducto hidrógeno	0,0004884	0
Amoníaco	0,0001628	0

Figura 7-11: Coeficientes para el cálculo de costo de transporte de hidrógeno y amoníaco en USD/kg. (Ministerio de Energía, 2024)

Por lo tanto, los costos de transporte del hidrógeno verde, para una distancia  $x$  de 100 km de la planta de hidrógeno verde hasta la zona de repostaje, y eligiendo un camión gaseoso se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
\text{Costo transporte} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg combustible}} \right] &= A \cdot x + b = 0,0025906 \cdot 100 + 2,4460918 \\
&= 2,7 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg } H_2 \text{ verde}} \right]
\end{aligned}$$

Finalmente, el costo de transporte anual de hidrógeno verde es igual a:

$$\begin{aligned}
& \text{Costo anual de transporte de } H_2 \text{ verde} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] \\
&= 2,7 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg } H_2 \text{ verde}} \right] \cdot 0,85 \left[ \frac{\text{kg } H_2 \text{ verde}}{\text{km}} \right] \cdot 180.000 \left[ \frac{\text{km}}{\text{año}} \right] \\
&= 412.692 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]
\end{aligned}$$

### 7.2.11. Estimación de costos de transporte de amoníaco verde

Para el caso del costo de transporte del amoníaco verde, es similar al del hidrógeno verde. Revisando la Figura 7-11, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
\text{Costo transporte} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg combustible}} \right] &= A \cdot x + b = 0,0001628 \cdot 100 + 0 \\
&= 0,01628 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg } NH_3 \text{ verde}} \right]
\end{aligned}$$

Finalmente, el costo de transporte anual de amoníaco verde es igual a:

$$\begin{aligned}
& \text{Costo anual de transporte de } NH_3 \text{ verde} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] \\
&= 0,01628 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg } NH_3 \text{ verde}} \right] \cdot 10 \left[ \frac{\text{kg } NH_3 \text{ verde}}{\text{km}} \right] \cdot 180.000 \left[ \frac{\text{km}}{\text{año}} \right] \\
&= 29.304 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]
\end{aligned}$$

### 7.2.12. Estimación de costos de estanque de diésel en zona de repostaje

En la zona de repostaje, se utilizarán dos estanques de  $30 \text{ m}^3$ , en posición horizontal, cilíndrico con cabezales toriesférico en los extremos. Estos dos estanques operan a presión atmosférica.

En la Figura 7-12, se presenta el volumen del cabezal toriesférico:

Tipo Cabezal	Toriesférica ASME	Elipsoidal	Hemiesférico
Volumen	$0.08089 D^3$	$0.13075 D^3$	$0.26103 D^3$
Área	$0.931 D_0^2$	$1.08 D_0^2$	$1.57 D_0^2$
Altura	$0.169 D$	$D/4$	$D/2$

**Figura 7-12: Distintas configuraciones y dimensiones de los cabezales de los estanques. (DISEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES, 2023)**

En la Figura 7-13, se presenta la relación L/D, para estanque a presión atmosférica.

P (bar)	0-15	15-30	>300
L/D	3	4	5

**Figura 7-13: Relación óptima de longitud / diámetro (L/D) para distintos rangos de potencias. (DISEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES, 2023)**

De aquí se obtiene que la relación es:

$$L = 3 \cdot D$$

Reemplazando lo anterior de la Figura 7-12, se tiene que el volumen para este estanque es igual a:

$$V_{estanque} = 30 \text{ m}^3 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3 = 3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^3 + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3$$

Resolviendo con solver de Excel, se tiene que:

$$D = 2,28 \text{ [m]} = 7,35 \text{ [ft]}$$

$$L = 6,85 \text{ [m]} = 22,05 \text{ [ft]}$$

Ahora, se tiene la correlación de Guthrie para recipientes a presión (Márquez, 2025):

$$Cc = \left( \frac{M\&S}{280} \right) \cdot 183,3 \cdot D^{0,8889} \cdot L^{0,63} \cdot Fc$$

Con M&S=1750 y Fc igual a:

$$Fc = Fm \cdot Fp$$

Donde Fm, es el factor de material y está determinado en la siguiente figura:

MATERIAL	CS	SS	MONEL	TI
F <sub>m</sub> / soldado	1.00	2.25	3.89	4.25
F <sub>m</sub> / sólido	1.00	3.67	6.34	7.89

**Figura 7-14: Factores de material para recipientes a presión.**

En este caso se eligió  $F_m$  igual a 1.

$F_p$ , es el factor de presión para recipientes a presión.

PRESIÓN MÁXIMA / PSI	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$F_p$	1.00	1.25	1.55	2.00	2.40	2.80	3.00	3.25	3.80	4.00	4.20

**Figura 7-15: Factores de presión para recipientes a presión.**

Como la presión es atmosférica (14,504 psi), se eligió un  $F_p$  igual a 1.

Por lo tanto, se tiene que:

$$F_c = 1 \cdot 1 = 1$$

Reemplazando los valores se tiene que el costo de compra para un estanque es igual a:

$$C_c = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 7,35^{0,8889} \cdot 22,05^{0,63} \cdot 1 = 47.370 \text{ [USD]}$$

Con un  $F_i=2,18$ , el factor de costo instalado para un estanque es igual:

$$C_i = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 7,35^{0,8889} \cdot 22,05^{0,63} \cdot (1 + 2,18) = 150.636 \text{ [USD]}$$

Finalmente, el costo de compra total y de costo instalado total para los dos estanques es igual a:

$$C_{ct} = 94.740 \text{ [USD]}$$

$$C_{it} = 301.272 \text{ [USD]}$$

### 7.2.13. Estimación de costos de estanque de hidrógeno verde en zona de repostaje

En la zona de repostaje, se utilizarán dos estanques de  $30 \text{ m}^3$ , en posición horizontal, cilíndrico con cabezales toriesférico en los extremos. Estos dos estanques operan a una presión de 50 bar (725,2 psi).

De la Figura 7-13, se elige:

$$L = 4 \cdot D$$

Reemplazando lo anterior, se tiene que el volumen para este estanque es igual a:

$$V_{\text{estanque}} = 30 \text{ m}^3 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3 = \pi \cdot D^3 + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3$$

Resolviendo con solver de Excel, se tiene que:

$$D = 2,09 \text{ [m]} = 6,71 \text{ [ft]}$$

$$L = 8,35 \text{ [m]} = 26,86 \text{ [ft]}$$

Ahora, se tiene la correlación de Guthrie para recipientes a presión (Márquez, 2025):

$$C_c = \left(\frac{M\&S}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot D^{0,8889} \cdot L^{0,63} \cdot F_c$$

Con M&S=1750 y  $F_c$  igual a:

$$F_c = F_m \cdot F_p$$

Donde  $F_m$ , es el factor de material y está determinado en la Figura 7-14, donde  $F_m = 1$ .

Se tiene una presión de 725,2 psi, observando la Figura 7-15, se elegirá un  $F_p$  igual a 3,8.

Por lo tanto, se tiene que:

$$F_c = 1 \cdot 3,8 = 3,8$$

Reemplazando los valores se tiene que el costo de compra para un estanque es igual a:

$$C_c = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 6,72^{0,8889} \cdot 26,86^{0,63} \cdot 3,8 = 188.060 \text{ [USD]}$$

Con un  $F_i=2,18$ , el factor de costo instalado para un estanque es igual:

$$C_i = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 6,72^{0,8889} \cdot 26,86^{0,63} \cdot (3,8 + 2,18) = 295.948 \text{ [USD]}$$

Finalmente, el costo de compra total y de costo instalado total para los dos estanques es igual a:

$$C_{ct} = 376.121 \text{ [USD]}$$

$$C_{it} = 591.895 \text{ [USD]}$$

#### 7.2.14. Estimación de costos de estanque de amoníaco verde en zona de repostaje

En la zona de repostaje, se utilizarán dos estanques de  $30 m^3$ , en posición horizontal, cilíndrico con cabezales toriesférico en los extremos. Estos dos estanques operan a una presión de 10 bar (145 psi).

De la Figura 7-13, se elige:

$$L = 3 \cdot D$$

Reemplazando lo anterior, se tiene que el volumen para este estanque es igual a:

$$V_{\text{estanque}} = 30 m^3 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3 = \frac{3\pi}{4} \cdot D^3 + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3$$

Resolviendo con solver de Excel, se tiene que:

$$D = 2,28 [m] = 7,35 [ft]$$

$$L = 6,85 [m] = 22,05 [ft]$$

Ahora, se tiene la correlación de Guthrie para recipientes a presión (Márquez, 2025):

$$C_c = \left( \frac{M\&S}{280} \right) \cdot 183,3 \cdot D^{0,8889} \cdot L^{0,63} \cdot F_c$$

Con M&S=1750 y  $F_c$  igual a:

$$F_c = F_m \cdot F_p$$

Donde  $F_m$ , es el factor de material y está determinado en la Figura 7-14, donde  $F_m = 1$ .

Se tiene una presión de 145 psi, observando la Figura 7-15 se elegirá un  $F_p$  igual a 1,55.

Por lo tanto, se tiene que:

$$F_c = 1 \cdot 1,55 = 1,55$$

Reemplazando los valores se tiene que el costo de compra para un estanque es igual a:

$$C_c = \left( \frac{1750}{280} \right) \cdot 183,3 \cdot 7,35^{0,8889} \cdot 22,05^{0,63} \cdot 1,55 = 73.423 [USD]$$

Con un  $F_i=2,18$ , el factor de costo instalado para un estanque es igual:

$$C_i = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 7,35^{0,8889} \cdot 22,05^{0,63} \cdot (2,55 + 2,18) = 176.690 \text{ [USD]}$$

Finalmente, el costo de compra total y de costo instalado total para los dos estanques es igual a:

$$C_{ct} = 146.847 \text{ [USD]}$$

$$C_{it} = 353.379 \text{ [USD]}$$

### 7.2.15. Estimación de costo de estanque de tren de diésel

Al interior del tren, se utilizará un estanque que permitirá realizar un viaje de ida y de vuelta, es decir 300 km por recorrido. Este estanque se encuentra en posición horizontal, cilíndrico con cabezales toriesférico en los extremos, y opera a presión atmosférica.

El volumen de combustible necesario para un recorrido de ida y vuelta es igual a:

$$V_{diésel} = \frac{0,5 \text{ [m}^3 \text{ de diésel]}}{[ida]} \cdot \frac{2 \text{ [ida]}}{1 \text{ [recorrido]}} = 1 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{recorrido}} \right]$$

Este volumen representa el 90% del estanque total, por lo que el volumen del estanque es igual a:

$$V_{estanque} = \frac{1 \text{ [m}^3\text{]}}{90\% \text{ estanque}} \cdot 100\% \text{ estanque} = 1,1 \text{ [m}^3\text{]}$$

De la Figura 7-13, se elige:

$$L = 3 \cdot D$$

Reemplazando lo anterior, se tiene que el volumen para este estanque es igual a:

$$V_{estanque} = 1,1 \text{ m}^3 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3 = \frac{3\pi}{4} \cdot D^3 + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3$$

Resolviendo con solver de Excel, se tiene que:

$$D = 0,76 \text{ [m]} = 2,45 \text{ [ft]}$$

$$L = 2,29 \text{ [m]} = 7,35 \text{ [ft]}$$

Ahora, se tiene la correlación de Guthrie para recipientes a presión (Márquez, 2025):

$$C_c = \left(\frac{M\&S}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot D^{0,8889} \cdot L^{063} \cdot F_c$$

Con M&S=1750 y Fc igual a:

$$F_c = F_m \cdot F_p$$

Donde Fm, es el factor de material y está determinado en la Figura 7-14, donde Fm = 1.

Se tiene una presión de 14,5 psi, observando la Figura 7-15 se elegirá un Fp igual a 1.

Por lo tanto, se tiene que:

$$F_c = 1 \cdot 1 = 1$$

Reemplazando los valores se tiene que el costo de compra para un estanque es igual a:

$$C_c = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 2,45^{0,8889} \cdot 7,35^{063} \cdot 1 = 8.935 [USD]$$

Con un Fi=2,18, el factor de costo instalado para un estanque es igual:

$$C_i = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 2,45^{0,8889} \cdot 7,35^{063} \cdot (1 + 2,18) = 28.412 [USD]$$

### 7.2.16. Estimación de costo de estanque de tren de hidrógeno verde

Al interior del tren, se utilizará un estanque que permitirá realizar un viaje de ida y de vuelta, es decir 300 km por recorrido. Este estanque se encuentra en posición horizontal, cilíndrico con cabezales toriesférico en los extremos, a una presión de 350 bar.

El volumen de combustible necesario para un recorrido de ida y vuelta es igual a:

$$V_{H_2verde} = \frac{5,09 [m^3 \text{ de } H_2verde]}{[ida]} \cdot \frac{2 [ida]}{1 [recorrido]} = 10,17 \left[ \frac{m^3}{recorrido} \right]$$

Este volumen representa el 90% del estanque total, por lo que el volumen del estanque es igual a:

$$V_{estanque} = \frac{10,17 [m^3]}{90\% \text{ estanque}} \cdot 100\% \text{ estanque} = 11,3 [m^3]$$

De la Figura 7-13, se elige:

$$L = 5 \cdot D$$

Reemplazando lo anterior, se tiene que el volumen para este estanque es igual a:

$$V_{\text{estanque}} = 11,3 \text{ m}^3 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3 = \frac{5\pi}{4} \cdot D^3 + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3$$

Resolviendo con solver de Excel, se tiene que:

$$D = 1,40 \text{ [m]} = 4,52 \text{ [ft]}$$

$$L = 7,02 \text{ [m]} = 22,58 \text{ [ft]}$$

Ahora, se tiene la correlación de Guthrie para recipientes a presión (Márquez, 2025):

$$C_c = \left( \frac{M\&S}{280} \right) \cdot 183,3 \cdot D^{0,8889} \cdot L^{0,63} \cdot F_c$$

Con M&S=1.750 y Fc igual a:

$$F_c = F_m \cdot F_p$$

Donde Fm, es el factor de material y está determinado en la Figura 7-14, donde Fm = 1.

Se tiene una presión de 5.076,4 psi, observando la Figura 7-15 se elegirá un Fp igual a 4,2.

Por lo tanto, se tiene que:

$$F_c = 1 \cdot 4,2 = 4,2$$

Reemplazando los valores se tiene que el costo de compra para un estanque es igual a:

$$C_c = \left( \frac{1750}{280} \right) \cdot 183,3 \cdot 4,52^{0,8889} \cdot 22,58^{0,63} \cdot 4,2 = 130.983 \text{ [USD]}$$

Con un Fi=2,18, el factor de costo instalado para un estanque es igual:

$$C_i = \left( \frac{1750}{280} \right) \cdot 183,3 \cdot 4,52^{0,8889} \cdot 22,58^{0,63} \cdot (1 + 4,2) = 198.970 \text{ [USD]}$$

### 7.2.17. Estimación de costo de estanque de tren de amoníaco verde

Al interior del tren, se utilizará un estanque que permitirá realizar un viaje de ida y de vuelta, es decir 300 km por recorrido. Este estanque se encuentra en posición horizontal, cilíndrico con cabezales toriesférico en los extremos, a una presión de 10 bar.

El volumen de combustible necesario para un recorrido de ida y vuelta es igual a:

$$V_{NH_3verde} = \frac{2,46 [m^3 \text{ de } NH_3verde]}{[ida]} \cdot \frac{2 [ida]}{1 [recorrido]} = 4,91 \left[ \frac{m^3}{recorrido} \right]$$

Este volumen representa el 90% del estanque total, por lo que el volumen del estanque es igual a:

$$V_{estanque} = \frac{4,91 [m^3]}{90\% \text{ estanque}} \cdot 100\% \text{ estanque} = 5,46 [m^3]$$

De la Figura 7-13, se elige:

$$L = 3 \cdot D$$

Reemplazando lo anterior, se tiene que el volumen para este estanque es igual a:

$$V_{estanque} = 5,46 m^3 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3 = \frac{3\pi}{4} \cdot D^3 + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3$$

Resolviendo con solver de Excel, se tiene que:

$$D = 1,29 [m] = 4,17 [ft]$$

$$L = 3,88 [m] = 12,5 [ft]$$

Ahora, se tiene la correlación de Guthrie para recipientes a presión (Márquez, 2025):

$$Cc = \left( \frac{M\&S}{280} \right) \cdot 183,3 \cdot D^{0,8889} \cdot L^{0,63} \cdot Fc$$

Con M&S=1750 y Fc igual a:

$$Fc = Fm \cdot Fp$$

Donde Fm, es el factor de material y está determinado en la Figura 7-14, donde Fm = 1.

Se tiene una presión de 145 psi, observando la Figura 7-15 se elegirá un  $F_p$  igual a 1,55.

Por lo tanto, se tiene que:

$$F_c = 1 \cdot 1,55 = 1,55$$

Reemplazando los valores se tiene que el costo de compra para un estanque es igual a:

$$C_c = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 4,17^{0,8889} \cdot 12,5^{0,63} \cdot 1,55 = 30.987 \text{ [USD]}$$

Con un  $F_i=2,18$ , el factor de costo instalado para un estanque es igual:

$$C_i = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 4,17^{0,8889} \cdot 12,5^{0,63} \cdot (1 + 1,55) = 74.568 \text{ [USD]}$$

### **7.2.18. Estimación de costos de equipos para el tren de hidrógeno verde**

#### Compresores:

Se utilizarán compresores, para comprimir el hidrógeno verde de 50 bar a 350 bar, de la salida de los estanques de repostaje al ingreso al tren de hidrógeno verde.

Para obtener el costo de compra del compresor, se necesita la potencia del compresor.

Suponiendo que se necesita llenar el estanque del tren de hidrógeno en 20 minutos con la cantidad suficiente para que el tren haga un recorrido y vuelta, se tiene que el flujo másico de hidrógeno verde es de:

$$m = 127 \left[\frac{kg}{ida}\right] \cdot \left[\frac{2 \text{ ida}}{1 \text{ vuelta}}\right] \cdot \frac{1}{20 \text{ [min]}} = 12,7 \left[\frac{kg}{min}\right]$$

El dimensionamiento del equipo se realizó a partir del manual “Selection Guide for: Multistage Centrifugal Compressors” de Elliott Turbomachinery Co. Inc. (Elliot, 2025).

Frame	Nominal Flow Range (m <sup>3</sup> /h)	Nominal Max No. of Casing Stages	Max Casing Pressure (bar)	Nominal Speed (r/min)	Nominal Polytropic Efficiency	Nominal H/N <sup>2</sup> (per stage)	Maximum Q/N
29M	1 275 – 18 140	10	52	11 500	0.78	2.25 × 10 <sup>-4</sup>	1.403
38M	10 200 – 37 380	9	43	7725	0.79	4.56 × 10 <sup>-4</sup>	4.84
48M	27 200 – 57 750	9	43	6300	0.80	6.84 × 10 <sup>-4</sup>	9.17
60M	42 500 – 98 550	8	23	4700	0.81	11.55 × 10 <sup>-4</sup>	20.97
70M	85 000 – 142 700	8	23	4200	0.81	17.01 × 10 <sup>-4</sup>	33.98
88M	119 000 – 229 400	8	23	3160	0.81	27.3 × 10 <sup>-4</sup>	72.6
103M	186 900 – 272 000	8	3	2800	0.82	34.8 × 10 <sup>-4</sup>	87
110M	237 900 – 323 000	8	3	2600	0.82	40.2 × 10 <sup>-4</sup>	124
10MB	150 – 2 700	12	890	18 900	0.77	8.0 × 10 <sup>-4</sup>	0.14
15MB	340 – 4 000	12	890	16 300	0.77	10.8 × 10 <sup>-4</sup>	0.26
20MB	550 – 6 120	12	890	12 400	0.77	18.6 × 10 <sup>-4</sup>	0.49
25MB	850 – 9 345	12	890	10 000	0.78	28.5 × 10 <sup>-4</sup>	0.94
32MB	3 400 – 13 600	10	890	8300	0.78	4.2 × 10 <sup>-4</sup>	1.64
38MB	10 200 – 37 380	9	103	7725	0.79	4.56 × 10 <sup>-4</sup>	4.84
48MB	27 200 – 57 750	9	83	6300	0.79	6.84 × 10 <sup>-4</sup>	9.17
60MB	42 500 – 98 550	8	55	4700	0.80	11.55 × 10 <sup>-4</sup>	20.97
70MB	85 000 – 142 700	8	55	4200	0.80	17.01 × 10 <sup>-4</sup>	33.98

(1) Number of casing stages is determined by critical speed margins. These numbers are a general guideline only.

(2) These values are typical. Flexibility in types of available staging can allow final computer selections to have significant variations in head and efficiency.

Figura 7-16: Características y rangos de operación para compresores tipos M y MB. (Elliot, 2025)

Por lo tanto, se seleccionó el marco 20 MB, debido a que el corresponde al rango de flujo de aire a comprimir. La eficiencia es 77%.

Se tiene que:

$$\eta_p = 0,77$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{28,84 \left[ \frac{J}{mol \cdot K} \right]}{20,41 \left[ \frac{J}{mol \cdot K} \right]} = 1,41$$

$$\frac{n}{n-1} = \left( \frac{k}{k-1} \right) = \frac{1,41}{1,41-1} = 3,43$$

$$H = RT \frac{n}{n-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = 4.124 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] \cdot 298 [K] \cdot 3,43 \cdot \left[ \left( \frac{350}{50} \right)^{\frac{1}{3,43}} - 1 \right]$$

$$= 3.219.949 \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

Se tiene que la potencia es igual a:

$$GkW = \frac{w_{in} \cdot H}{60.000 \cdot \eta_p} = \frac{12,7 \left[ \frac{kg}{min} \right] \cdot 3.219.949 \left[ \frac{J}{kg} \right]}{60.000 \cdot 0,77} = 885 [kW] = 1.187 [Hp]$$

Con Guthrie actualizado se obtendrán el costo del compresor. (Márquez, 2025)

Reemplazando los valores se tiene que el costo de compra para el primer compresor es igual a:

$$C_{c1} = \left(\frac{M\&S}{280}\right) \cdot 809,1 \cdot (bHp)^{0,759} \cdot Fc = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 809,1 \cdot (1.187)^{0,759} \cdot 1,01$$

$$= 1.100.799 \text{ [USD]}$$

Con un  $F_i=2,11$ , el factor de costo instalado para el primer compresor es igual:

$$C_{i1} = \left(\frac{M\&S}{280}\right) \cdot 809,1 \cdot (bHp)^{0,759} \cdot (Fc + F_i)$$

$$= \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 809,1 \cdot (1.187)^{0,759} \cdot (1,01 + 2,11) = 3.400.489 \text{ [USD]}$$

#### Pilas de combustible:

Se tiene un costo de 1.500 USD/kW, para las pilas de combustible para el año 2023 (s.r.o, 2025).

De la Tabla 7-6, se tiene que la pila de combustible elegida tiene una potencia de 31 kW. Entonces, el costo de una pila de combustible es igual a:

$$C_c = 1.500 \left[\frac{\text{USD}}{\text{kW}}\right] \cdot 31 \text{ [kW]} = 46.500 \left[\frac{\text{USD}}{\text{pila}}\right]$$

$$C_i = C_c \cdot 1,4 = 46.500 \text{ [USD]} \cdot 1,4 = 65.100 \left[\frac{\text{USD}}{\text{pila}}\right]$$

Si en total se necesitan 13 pilas de combustible, se tiene que los costos totales de las pilas de combustibles son igual a:

$$C_c = 46.500 \left[\frac{\text{USD}}{\text{pila}}\right] \cdot 13 \text{ pilas} = 604.500 \text{ [USD]}$$

$$C_i = 65.100 \left[\frac{\text{USD}}{\text{pila}}\right] \cdot 13 \text{ pilas} = 846.300 \text{ [USD]}$$

#### Baterías de potencia:

En 2023, el precio medio de un paquete de baterías de iones de litio era de 139 dólares por kWh (EVBoosters, 2024).

De la Tabla 7-7, se tiene que la energía de la batería seleccionada es de 98 kWh, por lo tanto, el costo de una batería de potencia es igual a:

$$C_c = 139 \left[ \frac{USD}{kWh} \right] \cdot 98 [kWh] = 13.622 \left[ \frac{USD}{batería} \right]$$

$$C_i = C_c \cdot 1,4 = 13.622 [USD] \cdot 1,2 = 16.346 \left[ \frac{USD}{batería} \right]$$

Si en total se necesitan 7 baterías de potencia, se tiene que los costos totales de las baterías de potencia son igual a:

$$C_c = 13.622 \left[ \frac{USD}{batería} \right] \cdot 7 [baterías] = 95.354 [USD]$$

$$C_i = 16.346 \left[ \frac{USD}{batería} \right] \cdot 7 [baterías] = 114.425 [USD]$$

### 7.2.19. Estimación de costos de equipos para el tren de amoníaco verde

#### Intercambiador de calor:

Se tiene un intercambiador de calor de área  $17,4 m^2$  ( $187,5 ft^2$ ), y utilizando las correlaciones de Guthrie, para intercambiadores de calor (Márquez, 2025):

$$C_c = \left( \frac{M\&S}{280} \right) \cdot 125,5 \cdot A^{0,57} \cdot F_c$$

CARCASA	CS	CS	CS	CS	SS	CS	MONEL	TI
TUBO	CS	BRONCE	MO	SS	SS	MONEL	MONEL	TI
F <sub>M</sub>	1.00	1.30	2.15	2.81	3.75	3.10	4.25	13.05

Figura 7-17: Factores de material para intercambiadores de calor. (Márquez, 2025)

TIPO DE INTERCAMBIADOR	FACTOR DE DISEÑO F <sub>D</sub>	PRESIÓN DE DISEÑO / PSI	FACTOR DE PRESIÓN F <sub>P</sub>
Kettle o Re hervidor	1.35	HASTA 150	0.00
Cabezal flotante	1.00	HASTA 300	0.10
Tubo en U	0.85	HASTA 400	0.25
Tubo fijo	0.80	HASTA 800	0.52
		HASTA 1000	0.55

Figura 7-18: Factores de presión y diseño para intercambiadores de calor. (Márquez, 2025)

Donde:

$$F_c = F_m \cdot (F_d + F_p) = 1 \cdot (1 + 0) = 1$$

Se tiene que los costos del intercambiador de calor son iguales a:

$$C_c = \left(\frac{M\&S}{280}\right) \cdot 125,5 \cdot A^{0,57} \cdot F_c = \left(\frac{1.750}{280}\right) \cdot 125,5 \cdot 187^{0,57} \cdot 1 = 15.492 \text{ [USD]}$$

$$C_i = \left(\frac{M\&S}{280}\right) \cdot 125,5 \cdot A^{0,57} \cdot (F_c + F_i) = \left(\frac{1.750}{280}\right) \cdot 125,5 \cdot 187^{0,57} \cdot (1 + 2,29) \\ = 50.968 \text{ [USD]}$$

Resistencias:

Se buscó resistencias de 10 kW, y se escogió el Kit Resistencia Bridada 10 Kw LAPESA KRB-100 (TuCalentadorEconómico.es, 2025), que tiene un valor 589 EUR/resistencia. Por lo tanto, se tiene que el costo total de resistencias es:

$$C_c = 589 \left[ \frac{EUR}{resistencia} \right] \cdot \frac{1[USD]}{0,98 [EUR]} \cdot 38 [resistencias] = 22.838 \text{ [USD]}$$

$$C_i = 22.838 \text{ [USD]} = 31.974 \text{ [USD]}$$

Ventilador:

El costo del ventilador que ingresa aire ambiental al interior del tren, se calculará con las correlaciones de Guthrie, y donde se necesita el flujo de aire que ingresa (Márquez, 2025):

$$\text{Flujo de aire} = q = \frac{16.828 \left[ \frac{kg}{h} \right]}{1,2 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 14.023 \left[ \frac{m^3}{h} \right] = 8.254 \left[ \frac{ft^3}{min} \right]$$

$$C_c = \left(\frac{M\&S}{280}\right) \cdot 879,5 \cdot q^{0,503} = \left(\frac{1.750}{280}\right) \cdot 48,8 \cdot 8.254^{0,583} = 58.574 \text{ [USD]}$$

$$C_i = 513.086 \text{ [USD]} \cdot 2.11 = 123.591 \text{ [USD]}$$

Amogy Powerpack:

El costo del Amogy Powerpack es todavía confidencial, por lo que se obtendrá su costo estimado por partes, se tiene que este sistema está constituido por el reactor, el absorbedor y las pilas de combustible.

Para el reactor, se utilizará la correlación de Towler (Sinnott, 2013):

$$Cc = a + b \cdot S^n$$

En la Figura 7-19, se muestran los valores de a, b y n para un reactor:

Table 7.2 Purchased Equipment Cost for Common Plant Equipment—Cont'd							
Equipment	Units for Size, S	S <sub>lower</sub>	S <sub>upper</sub>	a	b	n	Note
Vertical, 304 ss	shell mass, kg	120	250,000	17,400	79	0.85	4
Horizontal, 304 ss	shell mass, kg	120	50,000	12,800	73	0.85	4
<i>Pumps and drivers</i>							
Single stage centrifugal	flow, liters/s	0.2	126	8,000	240	0.9	
Explosion proof motor	power, kW	1.0	2,500	-1,100	2,100	0.6	
Condensing steam turbine	power, kW	100	20,000	-14,000	1,900	0.75	
<i>Reactors</i>							
Jacketed, agitated	volume, m <sup>3</sup>	0.5	100	61,500	32,500	0.8	2
Jacketed, agitated, glass lined	volume, m <sup>3</sup>	0.5	25	12,800	88,200	0.4	
<i>Tanks</i>							
floating roof	capacity, m <sup>3</sup>	100	10,000	113,000	3,250	0.65	
cone roof	capacity, m <sup>3</sup>	10	4,000	5,800	1,600	0.7	
<i>Trays</i>							
Sieve trays	diameter, m	0.5	5.0	130	440	1.8	5
Valve trays	diameter, m	0.5	5.0	210	400	1.9	
Bubble cap trays	diameter, m	0.5	5.0	340	640	1.9	
<i>Utilities</i>							
Cooling tower & pumps	flow, liters/s	100	10,000	170,000	1,500	0.9	6
Packaged mechanical refrigerator							
evaporator	duty, kW	50	1,500	24,000	3,500	0.9	
Water ion exchange plant	flow m <sup>3</sup> /h	1	50	14,000	6,200	0.75	
Notes:							
1. Direct heated.							
2. Type 304 stainless steel.							
3. With surface area 350 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> .							
4. Not including heads, ports, brackets, internals, etc. (see Chapter 14 for how to calculate wall thickness).							
5. Cost per tray, based on a stack of 30 trays.							
6. Field assembly.							
7. All costs are U.S. Gulf Coast basis, Jan. 2010 (CEPCI index = 532.9, NF refinery inflation index = 2281.6).							

**Figura 7-19: Factores para la correlación de Towler. (Sinnott, 2013)**

Se tiene que, para un volumen del reactor de 3,2 m<sup>3</sup>:

$$Cc = \frac{1.750}{1.446,5} (61.500 + 32.500 \cdot S^{0,8}) = \frac{1.750}{1.446,5} (61.500 + 32.500 \cdot 3,2^{0,8})$$

$$= 174.110 [USD]$$

$$Ci = 174.110 [USD] \cdot 4 = 696.440 [USD]$$

Para el absorbedor, el costo se obtiene con las correlaciones de Guthrie, con diámetro de 1,44 m (4,72 ft) y una altura de 2,2 m (7,22 ft) (Márquez, 2025):

$$C_c = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 4,72^{0,8889} \cdot 7,22^{0,63} \cdot 2,25 = 39.739 \text{ [USD]}$$

Con un  $F_i=2,18$ , el factor de costo instalado para el absorbedor es igual:

$$C_i = \left(\frac{1750}{280}\right) \cdot 183,3 \cdot 4,72^{0,8889} \cdot 7,22^{0,63} \cdot (2,25 + 2,18) = 78.242 \text{ [USD]}$$

Finalmente, para las pilas de combustible se tiene un costo de 1.500 USD/kW, para las pilas de combustible para el año 2023 (s.r.o, 2025).

$$C_c = 1.500 \left[\frac{\text{USD}}{\text{kW}}\right] \cdot 400 \text{ [kW]} = 600.000 \text{ [USD]}$$

$$C_i = C_c \cdot 1,4 = 300.000 \text{ [USD]} \cdot 1,4 = 840.000 \text{ [USD]}$$

Sumando los costos del reactor, absorbedor y las pilas de combustible, se tiene que el costo del Amogy Powerpack aproximado es igual a:

$$C_c = 174.110 \text{ [USD]} + 39.739 \text{ [USD]} + 600.000 \text{ [USD]} = 813.849 \text{ [USD]}$$

$$C_i = 696.440 \text{ [USD]} + 78.242 \text{ [USD]} + 840.000 \text{ [USD]} = 1.614.683 \text{ [USD]}$$

#### Baterías de potencia:

En 2023, el precio medio de un paquete de baterías de iones de litio era de 139 dólares por kWh (EVBoosters, 2024).

De la Tabla 7-7, se tiene que la energía de la batería seleccionada es de 98 kWh, por lo tanto, el costo de una batería de potencia es igual a:

$$C_c = 139 \left[\frac{\text{USD}}{\text{kWh}}\right] \cdot 98 \text{ [kWh]} = 13.622 \left[\frac{\text{USD}}{\text{batería}}\right]$$

$$C_i = C_c \cdot 1,4 = 13.622 \text{ [USD]} \cdot 1,2 = 16.346 \left[\frac{\text{USD}}{\text{batería}}\right]$$

Si en total se necesitan 13 pilas de combustible, se tiene que los costos totales de las pilas de combustibles son igual a:

$$C_c = 13.622 \left[ \frac{USD}{batería} \right] \cdot 7 [baterías] = 95.354 [USD]$$

$$C_i = 16.346 \left[ \frac{USD}{batería} \right] \cdot 7 [baterías] = 114.425 [USD]$$

### 7.2.20. Estimación de costos de combustible para tren de hidrógeno verde para el año 2030

Las proyecciones establecen que, al 2030, podría exportar hidrógeno verde a un valor cercano a 1,5 – 2,0 USD/kg (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2020). Eligiendo un valor de 2 USD/kg:

Se tiene que:

$$Consumo \left[ \frac{kg}{km} \right] = \frac{127 [kg]}{150 [km]} = 0,85 \left[ \frac{kg}{km} \right]$$

La cantidad de hidrógeno verde en kg anual es igual a:

$$Consumo \left[ \frac{kg}{año} \right] = 180.000 \left[ \frac{km}{año} \right] \cdot 0,85 \left[ \frac{kg}{km} \right] = 152.558 \left[ \frac{kg}{año} \right]$$

Finalmente, el costo de hidrógeno verde anual para el año 2030 es igual a:

$$\text{Costo anual hidrógeno verde} \left[ \frac{USD}{año} \right] = 2 \left[ \frac{USD}{kg} \right] \cdot 152.558 \left[ \frac{kg}{año} \right] = 305.115 \left[ \frac{USD}{año} \right]$$

### 7.2.21. Estimación de costos de combustible para tren de amoníaco verde para el año 2030

Se estima que los costos de producción de amoníaco verde en Chile y Argentina podrían ser inferiores a los 600 EUR/tonelada de NH<sub>3</sub> para 2030 (Keller, 2024). Por lo tanto, se asumirá un valor de 600 USD/tonelada de amoníaco verde para el año 2030:

$$\text{Costo } NH_3 \text{ verde en} \left[ \frac{USD}{kg} \right] = 600 \left[ \frac{USD}{t} \right] \cdot \frac{1[t]}{1.000 [kg]} = 0,6 \left[ \frac{USD}{kg} \right]$$

También, se tiene que:

$$Consumo \left[ \frac{kg}{km} \right] = \frac{1.500 [kg]}{150 [km]} = 10 \left[ \frac{kg}{km} \right]$$

La cantidad de amoníaco verde en kg anual es igual a:

$$\text{Consumo} \left[ \frac{kg}{\text{año}} \right] = 180.000 \left[ \frac{km}{\text{año}} \right] \cdot 10 \left[ \frac{kg}{km} \right] = 1.800.000 \left[ \frac{kg}{\text{año}} \right]$$

Finalmente, el costo de amoníaco verde anual es igual a:

$$\text{Costo anual amoníaco verde} \left[ \frac{USD}{\text{año}} \right] = 0,6 \left[ \frac{USD}{kg} \right] \cdot 1.800.000 \left[ \frac{kg}{\text{año}} \right] = 1.080.000 \left[ \frac{USD}{\text{año}} \right]$$

### 7.3. Resumen FI

## UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERIA

### RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

<b>Departamento</b>	: Departamento de Ingeniería Química
<b>Carrera</b>	: Ingeniería Civil Química
<b>Nombre del memorista</b>	: Mario Alfonso Bao Mora
<b>Título de la memoria</b>	: ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DEL USO DE HIDRÓGENO Y AMONÍACO VERDES EN TRANSPORTES DE FERROCARRILES EN CHILE
<b>Fecha de la presentación oral</b>	:
<b>Profesor(es) Guía</b>	: Dr. Fernando Márquez, Dr. Juan Carlos Carrasco
<b>Profesor(es) Revisor(es)</b>	: Dr. Andrés Mejías
<b>Concepto</b>	:
<b>Calificación</b>	:

#### Resumen (máximo 200 palabras)

Esta memoria es un estudio técnico-económico que analiza la viabilidad del uso de hidrógeno y amoníaco verdes como combustibles alternativos para el transporte ferroviario en el norte de Chile. Se realizaron balances de energía, cálculos de consumo de combustible y estimaciones de costos de equipos para comparar estas opciones con el uso de diésel. El análisis se basa en el modelo del tren del Ferrocarril Antofagasta Bolivia (FCAB). El tren de hidrógeno verde utiliza pilas de combustible y baterías, mientras que el tren de amoníaco verde incorpora el sistema Amogy Powerpack para convertir amoníaco en hidrógeno. Los resultados muestran que el hidrógeno verde tiene una eficiencia energética del 59%, superior al amoníaco verde (32%) y al diésel (37%). Sin embargo, el hidrógeno verde implica mayores costos de equipos por sus exigencias de almacenamiento a alta presión. El amoníaco verde presenta los costos anuales de combustible y transporte más elevados. A pesar de los desafíos técnicos y económicos, se concluye que ambos combustibles son alternativas viables y sostenibles a largo plazo, siempre que se implementen políticas de apoyo e infraestructura adecuada.