



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE MARITIMO DE HIDRÓGENO EN  
ESTANQUES HACIA MERCADOS ENERGÉTICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JOSÉ LUIS ANTONIO CASTILLO MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

PROFESOR CO-GUÍA:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:  
HENRY VALENZUELA CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico  
POR: José Luis Antonio Castillo Muñoz  
FECHA: 2022  
PROFESOR GUÍA: Ramón Frederick González

## EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE MARITIMO DE HIDRÓGENO EN ESTANQUES HACIA MERCADOS ENERGÉTICOS

El camino a la descarbonización a nivel mundial posee como pilar fundamental el establecer una cadena de suministro que tiene como base la producción de combustibles de manera sostenible y sin empeorar la situación ambiental que hoy en día se vive, es decir, bajo la utilización de energías Renovables No Convencionales (ERNC), pasando luego por un proceso de almacenamiento y finalmente la distribución.

Chile, cuenta con recursos más que suficientes para establecer en el corto a mediano plazo los dos primeros eslabones mencionados, desarrollando tecnologías para la producción de Hidrógeno, Amoniaco de forma limpia en regiones como la de Atacama, reconocida por su recurso solar y la de Aysén que aprovecha su recurso eólico de manera importante. Con capacidades para llegar a exportar 40000 toneladas de hidrógeno verde a países como Japón.

Con esta información se tiene un punto de partida, que en conjunto a las regulaciones que la Organización Marítima Internacional (IMO) es posible visualizar un correcto desarrollo de este eslabón denominado: Transporte Marítimo de Hidrógeno Hacia Mercados Energéticos.

Se utiliza como referencia información en torno al transporte marítimo de Gas Natural Licuado (LNG), reconociendo factores relevantes que son considerados al momento de analizar las 3 opciones de transporte: Hidrógeno Líquido, Hidrógeno Gaseoso y Amoniaco.

Mediante el análisis de los requerimientos tecnológicos en torno al almacenamiento a temperaturas cercanas al 0 absoluto, se identifica el Invar, en conjunto con el poliuretano, como los materiales idóneos para el diseño de un estanque de almacenamiento de hidrógeno líquido, capaz cumplir estándares internacionales, con tasas de Boil-Off menores a un 0.5% diario. Se justifica la no viabilidad de una de las opciones, debido a la falta de tecnología de almacenamiento capaz de soportar presiones del orden de 500 bar para volúmenes sobre los 100000 [m<sup>3</sup>].

Se identifican potenciales problemas y se plantean soluciones mediante el diseño de estanques para hidrógeno y amoniaco. Analizados estructural y térmicamente.

Los costos de transporte, poniendo énfasis en las inversiones iniciales, llegan a ser un 124% mayores en el caso del hidrógeno, demostrando lo poco desarrollado que se encuentra la industria en torno a las tecnologías capaces de materializar el transporte marítimo de este.

A Sandra, Carlos, Marisol, José y Alicia

## Agradecimientos

Gracias a todas las personas que siempre me dieron las palabras indicadas para culminar esta etapa que resultó tan esquivada hasta el último momento.

A mis padres, que son los que me han formado como la persona íntegra que soy. Que sin ellos nada de esto sería posible, por siempre empujarme a hacer cosas y enseñarme lo que es el trabajo duro y surgir haciendo lo que uno ama.

A mi polola Victoria Acuña, por siempre estar ahí para motivarme, contenerme, y alegrarme en los momentos más complicados a lo largo de estos últimos 5 años. Te amo.

A mis profesores guía y co-guía Ramón Frederick y Rubén Fernández, por darme una mano siempre que la necesité en este camino un tanto complicado a ratos.

A Álvaro, que siempre tuvo las palabras indicadas para que no perdiera el rumbo.

A Renata, Daniela, Gonzalo, Jaimico por ser parte fundamental de mi paso por mecánica, fieles a estudios, lamentos, alegrías, tiempos de ocio, creando momentos que serán inolvidables. Y también fuera de mecánica a Tamara Novoa y José Ortiz, mis eléctricos favoritos.

Y finalmente a don Henry, quien hizo que me reencantara con esta carrera y por recordarme todos los días de los últimos meses que debía titularme luego.

# Tabla de Contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Antecedentes básicos generales .....	1
1.2.	Motivación .....	2
1.3.	Objetivos.....	2
1.3.1.	Objetivo General.....	2
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	2
1.4.	Alcances .....	3
2.	Antecedentes y Discusión Bibliográfica.....	4
2.1.	Países Productores y Consumidores .....	4
2.2.	Hidrógeno y Propiedades .....	5
2.3.	Amoniac y Propiedades.....	6
2.4.	Almacenamiento Hidrógeno Líquido.....	7
2.5.	Almacenamiento Hidrógeno Gaseoso.....	8
2.6.	Normativas .....	9
2.7.	Cadena de suministro piloto entre Australia y Japón .....	10
2.7.1.	Suiso Frontier.....	11
2.7.2.	Nuevo Buque de transporte para LH2.....	11
3.	Metodología .....	13
4.	Transporte marítimo de LNG.....	16
4.1.	Tipos de tanques .....	16
4.1.1.	Tanques independientes .....	17
4.1.2.	Tipo A.....	17
4.1.3.	Tipo B .....	18
4.1.4.	Tipo C.....	19
4.1.5.	Tanques de Membrana .....	19
5.	Escala de transporte para cada alternativa.....	21
6.	Condiciones de transporte para cada alternativa .....	24
6.1.	Caso Hidrógeno Líquido.....	24
6.2.	Caso Hidrógeno Gaseoso.....	25

6.3.	Caso Amoniaco .....	26
7.	Problemas que considerar durante transporte.....	27
7.1.	Caso Hidrógeno Líquido.....	27
7.1.1.	Permeabilidad en materiales.....	27
7.1.2.	Amplio rango de inflamabilidad .....	27
7.1.3.	Fragilización por bajas temperaturas .....	27
7.2.	Caso Amoniaco .....	28
7.2.1.	Corrosión .....	28
7.2.2.	Toxicidad.....	28
8.	Diseño conceptual de cada estanque.....	28
8.1.	Dimensiones generales según tipo de estanque.....	28
8.1.1.	Caso Hidrógeno Líquido.....	28
8.1.2.	Caso Amoniaco .....	30
8.2.	Selección de materiales para estanques .....	31
8.2.1.	Caso Hidrógeno Líquido.....	31
8.2.2.	Caso Amoniaco .....	34
8.3.	Análisis estructural .....	34
8.3.1.	Caso Hidrógeno Líquido.....	34
8.3.2.	Caso Amoniaco .....	43
8.4.	Análisis térmico .....	46
8.4.1.	Caso Hidrógeno Líquido.....	46
8.4.2.	Caso Amoniaco .....	48
9.	Equipos complementarios principales .....	52
9.1.	Procesos energéticos a bordo más relevantes.....	52
9.1.1.	Propulsión.....	52
9.1.2.	Caso Hidrógeno Líquido.....	53
9.1.2.1.	Carga y Descarga de Hidrógeno .....	53
9.1.2.2.	Licuefacción de Boil-Off.....	54
9.1.3.	Caso Amoniaco .....	54
9.1.3.1.	Carga y Descarga de Amoniaco .....	54
9.1.3.2.	Licuefacción de Boil-Off.....	54

10.	Costos estimados de cada alternativa.....	56
10.1.	Caso Hidrógeno Líquido.....	57
10.2.	Caso Amoniaco .....	58
11.	Discusión y análisis .....	60
12.	Conclusiones.....	62
	Bibliografía.....	64
	Anexos .....	66
	Anexo A Resultados análisis térmico para obtener espesor capa aislante estanque LH <sub>2</sub> .....	66
	Anexo B Datos de referencia del buque SUIISO FRONTIER.....	67
	Anexo C Curvas características bombas SUBTRAN Cryostar .....	67

# Índice de tablas

Tabla 4. 1: Características generales estanques de membrana e independientes. ....	16
Tabla 4. 2: Resumen características principales tanques tipo A.....	18
Tabla 4. 3: Características modelo Mark III y posteriores de estanques de membrana GTT .....	20
Tabla 4. 4: Características modelo NO96 y posteriores de estanques de membrana GTT .....	20
Tabla 8. 1: Propiedades materiales candidatos capa estanques de Hidrógeno Líquido .....	33
Tabla 8. 2: Rango de valores para CB según tipo de embarcación [15].....	37
Tabla 8. 3: Variables de buque de LH2 para cálculo de componente de aceleración adimensional..	38
.....	38
Tabla 8. 4: Radio final, Radio final y deformación por bajas temperaturas en estanque de hidrógeno (3 materiales candidatos).....	42
Tabla 8. 5: Variables de buque de NH <sub>3</sub> para cálculo de componente de aceleración adimensional	44
.....	44

# Índice de figuras

Figura 2. 1: Sectores objetivo de las estrategias de Hidrógeno según país .....	4
Figura 2. 2: Consumo anual estimado de Hidrógeno (En TWhH <sub>2</sub> por año).....	5
Figura 2. 3: Representación esquemática tanque criogénico. (Referencia: Linde AG) .....	8
Figura 2. 4: Sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido .....	9
Figura 2. 5: Esquema demostrativo Cadena de Suministro.....	10
Figura 2. 6: Buque LH <sub>2</sub> , Suiso Frontier .....	11
Figura 3. 1: Esquema de Metodología.....	13
Figura 4. 1: Ejemplos de tanques tipo A para transporte marítimo de productos .....	17
Figura 4. 2: Representación estanque independiente tipo B.....	18
Figura 4. 3: Representación estanque independiente tipo C (Unilobular).....	19
Figura 5. 1: Metas nacionales de Japón que plantea en su estrategia de Hidrógeno .....	21
Figura 5. 2: Proyecciones de mercado nacional y potencial de mercado nacional/internacional del hidrógeno verde para Chile.....	22
Figura 5. 3: Representación recorrido y distancia preliminar Chile-Japón .....	23
Figura 5. 4: Masas a importar (Anualmente y por cada viaje) .....	24
Figura 6. 1: Diagrama de fase del Hidrógeno .....	25
Figura 6. 2: Volumen de carga (Por viaje) para cada alternativa .....	26
Figura 8. 1: Representación 3D de estanque LH <sub>2</sub> . Elaboración propia. ....	29
Figura 8. 2: Representación conceptual de buque de LH <sub>2</sub> . Elaboración propia. ....	30
Figura 8. 3: Representación geometría tanque de amoniaco. Elaboración Propia .....	30
Figura 8. 4: Representación 3D geometría tanque de amoniaco. Elaboración Propia .....	31
Figura 8. 5: Materiales compatibles para servicios involucrados a Hidrógeno .....	32
Figura 8. 6: Coeficiente de contracción térmica en función de la temperatura para distintos materiales .....	33
Figura 8. 7: Representación gráfica coeficiente de bloque de un buque (Relación entre volumen celeste y volumen amarillo).....	37
Figura 8. 8: Aceleración vertical $a_z$ en función del coeficiente de bloque .....	38
Figura 8. 9: Factor A en función del coeficiente de Bloque.....	38
Figura 8. 10: Valores obtenidos para $a_x$ , $a_y$ y $a_z$ .....	39
Figura 8. 11: Espesor de capa primaria de estanque LH <sub>2</sub> para distintos factores de seguridad (Material: Aluminio 6061 T6).....	40
Figura 8. 12: Espesor de capa primaria de estanque LH <sub>2</sub> para distintos factores de seguridad (Material: Invar) .....	40
Figura 8. 13: Espesor de capa primaria de estanque LH <sub>2</sub> para distintos factores de seguridad (Material: Acero AISI 316) .....	41

Figura 8. 14: Esfuerzo interno por contracción térmica en estanque de LH <sub>2</sub> .....	43
Figura 8. 15: Valores obtenidos para ax, ay y az .....	45
Figura 8. 16: Espesor de capa primaria de estanque Amoniacó para distintos factores de seguridad (Material: Acero AISI 316) .....	45
Figura 8. 17: Diagrama capas estanque esférico LH <sub>2</sub> . Elaboración Propia .....	46
Figura 8. 18: Porcentaje diario de evaporación de Hidrógeno vs Espesor capa de Poliuretano ...	48
Figura 8. 19: Diagrama análisis térmico n°1 NH <sub>3</sub> . Elaboración Propia.....	49
Figura 8. 20: Diagrama análisis térmico n°2 NH <sub>3</sub> . Elaboración Propia.....	51
Figura 9. 1: Clasificación de buques de LNG según tipo de propulsión, 2016-2025.....	52
Figura 10. 1: Esquema de estructura de costos involucrados .....	56
Figura 10. 2: Resumen de costos (Hidrógeno Líquido vs Amoniacó) .....	59

# 1.Introducción

## 1.1. Antecedentes básicos generales

La crisis climática que se vive actualmente a nivel mundial ha impulsado a una cantidad importante de países a generar estrategias que ayudarán a disminuir las emisiones gases de efecto invernadero que año a año provocan un aumento paulatino de la temperatura, provocando un colapso progresivo en la Tierra. Actualmente, 16 países además de los pertenecientes a la Unión Europea poseen una estrategia nacional de hidrógeno, entre los cuales se encuentra Chile. Además, se espera que los países que representan más del 80% del PIB mundial tengan su propia estrategia de Hidrógeno de aquí al 2025 [1].

Estas estrategias están centradas en el rol que toma el Hidrógeno en la descarbonización de cada uno de los países. Con énfasis en la producción local vía energías renovables para abastecer en primera instancia sectores industriales como lo son las grandes refinerías, plantas siderúrgicas y complejos de carácter químico, para posteriormente lograr establecer un mercado solido a nivel mundial.

No todos los países tienen la capacidad de generar grandes cantidades de Hidrógeno para su uso propio, por lo que se distinguen dos tipos de proyectos en torno al este, aquellos desarrollados en países catalogados como productores y otros donde los proyectos se centran en un uso final del combustible. Europa posee un equilibrio entre cada tipo de proyecto.

La cadena de suministro de Hidrógeno en el mundo debe contar con un nexo entre países productores y consumidores. Debido a esto el rol del transporte marítimo es fundamental, tomando en cuenta que actualmente el 80% de todas las mercancías transadas a lo largo del mundo son transportadas mediante este medio [2]. El rubro energético no es la excepción y tal cual, como el Gas Natural Licuado, LNG por sus siglas en inglés, llega a todo el mundo mediante la vía marítima, es relevante el evaluar si es posible realizar lo mismo para transportar Hidrógeno largas distancias a través del mar.

Actualmente se encuentra en etapas de prueba el primer buque dedicado al transporte de Hidrógeno líquido entre Australia y Japón. El llamado SUIISO FRONTIER (Suiso en Japonés significa Hidrógeno) posee una capacidad de transporte de 1250 [m<sup>3</sup>] de Hidrógeno líquido, el cual está a una temperatura de -253°C y un volumen que es 1/800 del que tiene en estado gaseoso.

La creación de este primer buque encargado del transporte marítimo de Hidrógeno es una invitación al mundo a formar parte del nuevo proceso que implica ir por la senda de las energías limpias y renovables.

## 1.2. Motivación

La búsqueda de alternativas para la descarbonización a nivel mundial progresa día a día, mediante la optimización de procesos de producción y almacenamiento. Es fundamental que en los próximos años la cadena de suministro que está siendo desarrollada y puesta en marcha por una cantidad importante de países posea un canal de distribución a lo largo de todo el mundo, en este caso el transporte vía marítima, razón por la cual mediante el siguiente trabajo se busca instaurar ideas en torno a las potenciales exportaciones que nuestro país planea realizar a inicios de la nueva década.

Por esto, y tomando en cuenta que existen muchas alternativas en torno al almacenamiento de Hidrógeno, es que se busca realizar una comparativa de las más relevantes, considerando opciones realizables, de tal manera que logre identificar el camino más viable para lograr las economías de escala que se necesitan en un futuro no muy lejano.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es desarrollar la ingeniería conceptual y básica y la evaluación comparativa de costos de tres opciones de transporte marítimo de Hidrógeno.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información en torno a propiedades físicas del Hidrógeno y el amoniaco. Además de todo tipo de normativas existentes en torno al transporte de este tipo carga vía marítima.
- Determinar escala de transporte para cada una de las 3 alternativas y la duración de los viajes.
- Identificar problemas en el almacenamiento y transporte para cada alternativa y soluciones pertinentes.
- Especificar condiciones de transporte para cada una de las 3 alternativas, geometría de los contenedores, presiones, temperaturas, volúmenes, estados termodinámicos adecuados para almacenamiento y transporte.
- Diseñar ingeniería básica, enfatizada en el almacenamiento y transporte para cada una de las alternativas.
- Comparar energética y económicamente las opciones de transporte.

## 1.4. Alcances

Complementando los objetivos expuestos anteriormente se especifican algunos alcances para el trabajo a realizar:

- Las 3 alternativas de transporte corresponden a Hidrógeno en estado líquido (LH<sub>2</sub>) a baja presión, Hidrógeno en estado gaseoso a alta presión y Amoníaco (NH<sub>3</sub>).
- Se asume que la propulsión del buque de transporte es en base a un combustible distinto al Hidrógeno.
- Se considera el dimensionamiento de 1 buque encargado de la exportación, justificado en base a que será una etapa naciente de esta faceta del mercado internacional chileno.
- La ingeniería que abarca este trabajo se limita solo a sus etapas Conceptual y Básica.
- La comparación de las alternativas se rige en torno a la disponibilidad hoy en día de las tecnologías y el costo energético involucrado en cada una de ellas.

## 2. Antecedentes y Discusión Bibliográfica

### 2.1. Países Productores y Consumidores

En base a las diversas estrategias nacionales en torno al Hidrógeno que se han lanzado en los últimos años, se tienen informaciones más que relevantes en torno a los objetivos que cada nación tiene, además de obtenerse los consumos que algunos países consumidores tendrán durante los próximos años.

Como se observa en la figura 3.1 [1], los sectores a los que cada uno de los países ahí mencionados le pone énfasis en su estrategia nacional de Hidrógeno son variados. Se aprecian de manera clara países como España, Ucrania, Rusia, Australia y Marruecos tienen su enfoque puesto en la exportación de Hidrógeno, esto considerando las capacidades de generación que tienen cada uno, ya sea de Hidrógeno Verde, Azul o Gris.

En relación con lo anterior, nuestro país Chile, se encuentra en una situación similar, donde el hecho de contar con tecnología ya en desarrollo para la producción y almacenamiento de Hidrógeno verde lo sitúa en una posición favorable de cara a lo que es el plan de su estrategia nacional de Hidrógeno, el cual además de establecer infraestructura a nivel nacional y un mercado sostenible, tiene como fin último el lograr exportaciones a países de relevancia y que posean consumos importantes de Hidrógeno.

Sectores de uso de Hidrógeno	EU	DE	NL	FR	ES	IT	UK	NO	CH	UA	RU	JP	KR	CN	AU	CA	MO
Industria	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	✗	✗	✓	(✓)	✗	✗	✓	(✓)	✓
Potencia	(✓)	(✓)	(✓)	✓	(✓)	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)	(✓)
Transporte	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)
Construcción	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	✗	✗	(✓)	✗	✗	(✓)	(✓)	✓	✓	✗	(✓)	(✓)	(✓)
Exportación	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓

✓ Sector Principal      (✓) Menos Relevante      ✗ No Registrado

Figura 2. 1: Sectores objetivo de las estrategias de Hidrógeno según país

Proyectos para la generación, almacenamiento y exportación de diversos compuestos tienen lugar en distintas regiones de Chile, haciendo un uso importante de ERNC, la producción de Hidrógeno verde y Amoniaco Verde es casi una realidad.

Las regiones del norte de Chile, aprovechando el recurso solar por el cual nuestro País tiene el reconocimiento a nivel mundial y las regiones del sur con su recurso eólico, serán protagonistas de los avances en los próximos años.

Estos lugares tienen alto potencial se albergar puertos desde los cuales la exportación se concrete, logrando establecer mercados con países como Japón, Corea del Sur, Estados Unidos o Alemania.

Al ser necesario establecer escalas de transporte, surge la necesidad de saber de manera estimada el consumo de Hidrógeno de países importantes alrededor del mundo. En la figura 3.2 [1], se aprecia una estimación de los consumos anuales de Hidrógeno de Países relevantes como lo pueden ser Alemania, Francia, Países Bajos, Corea del Sur, Reino Unido, entre otras naciones.

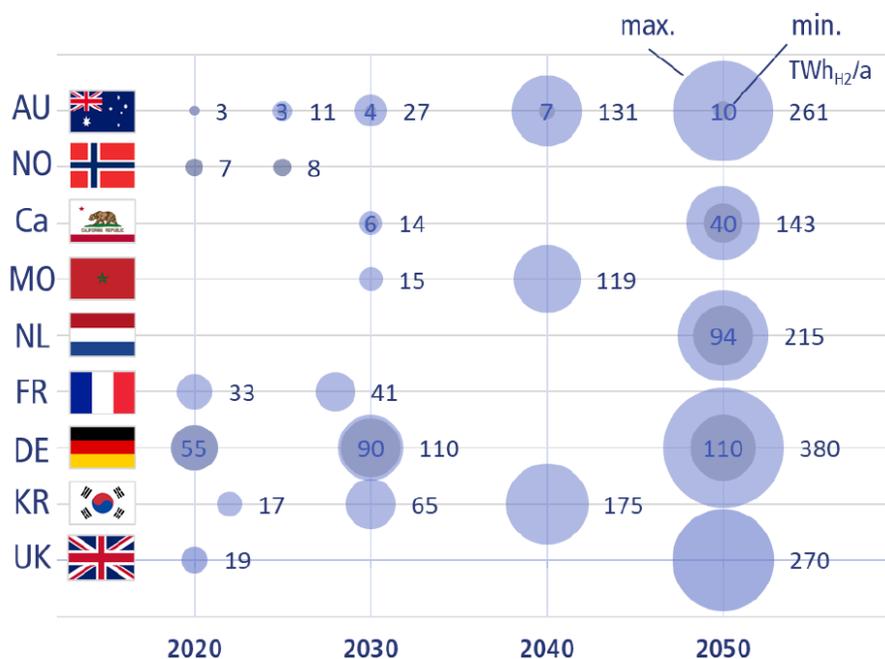


Figura 2. 2: Consumo anual estimado de Hidrógeno (En TWhH2 por año)

## 2.2. Hidrógeno y Propiedades

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido y no venenoso bajo condiciones normales. Es el elemento más simple conocido por el hombre. Un átomo de hidrógeno tiene únicamente un protón y un electrón. Normalmente existe como una molécula diatómica. Es el elemento más abundante del universo y tercero más abundante en la tierra [3]. A continuación, se presentan algunas de sus propiedades más relevantes:

- Su Poder Calorífico Inferior (PCI) es de 120 [MJ/Kg] lo que corresponde a 2.8 veces el PCI de la gasolina, siendo este último de 42.85 [MJ/Kg].

- Al ser combustionado no presenta ninguna emisión tóxica, ya que el único producto corresponde a vapor de agua.
- En caso de fuga, el Hidrógeno se disipa rápidamente debido a su baja densidad, disminuyendo así el riesgo de explosión y los posibles daños originados por su combustión accidental.

Aun así, existen algunas consideraciones con las cuales se debe tener mucho cuidado con respecto a este elemento:

- Al ser el elemento más pequeño, difunde fácilmente a través de ciertos materiales, lo cual conlleva una utilización de materiales específicos para su transporte y almacenamiento.
- Se combina con el oxígeno del aire sin necesidad de energía de activación en un amplio rango de concentraciones dando lugar a una reacción de combustión con una cinética muy elevada (límite de explosión 4% –75%).

### 2.3. Amoniacio y Propiedades

El Amoniacio ( $\text{NH}_3$ ) corresponde a un compuesto tóxico formado por Hidrógeno y Nitrógeno, el cual es posible obtenerlo mediante el proceso Haber-Bosch o también encontrarlo en la naturaleza, utilizando un 80% de las cantidades obtenidas exclusivamente en la industria de los fertilizantes [4].

Para poder ser almacenado y posteriormente exportado, es necesario transformarlo a su estado líquido para aumentar su densidad. Para esto, solo son necesarias presiones del orden de 1 [MPa] o una temperatura de  $-33^\circ\text{C}$ , temperatura considerablemente mayor que la necesaria para tener Hidrógeno es estado líquido.

Para transporte de gran escala es recomendable del punto de vista económico el hacerlo con el compuesto en estado líquido, mediante licuefacción por baja temperatura, mientras que para transporte de mediana o baja escala es recomendable también licuefaccionarlo, pero mediante la vía de la compresión.

Además, puede ser exportado con el fin último de ser utilizado para producir Hidrógeno, es decir, se utiliza como vector energético. El porcentaje en masa de Hidrógeno del Amoniacio es de un 17.6%, incluso mayor que el valor que posee el Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), que es de un 12.5%. [5].

Algunas ventajas del Amoniacio son [5][6]:

- La tecnología de producción ha estado disponible y ha sido usada durante años.
- Posee un alto valor de densidad energética volumétrica y gravimétrica (Densidad volumétrica mayor que la de  $\text{LH}_2$ )
- No existen pérdidas considerables de energía durante su almacenamiento y transporte.

- Se puede condensar en condiciones no exigentes del punto de vista ingenieril. (Presión de 9 [bar] a temperatura ambiente o  $-33^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica)

Por otro lado, también posee algunas desventajas que si o si hay que tener en cuenta al momento de realizar diseños para el presente trabajo [5][6]:

- Alta toxicidad
- El gasto energético para obtener Hidrógeno a partir de Amoniaco gaseoso es aproximadamente de un 30% del contenido energético de la carga inicial.
- Requerimientos altos en torno a seguridad en torno al transporte y almacenamiento.

## 2.4. Almacenamiento Hidrógeno Líquido

El Hidrógeno en forma líquida tiene una densidad de energía considerablemente más alta que en su forma gaseosa, por lo que es un medio de almacenamiento atractivo. Esta tecnología de almacenamiento de hidrógeno es bastante efectiva, pero tiene desventajas, principalmente la energía requerida para licuar el gas y el estricto control necesario sobre la estabilidad de la temperatura del contenedor para evitar cualquier riesgo de sobrepresión. También requiere recipientes criogénicos y sufre pérdidas de hidrógeno a través de la evaporación de los recipientes, particularmente los más pequeños (tienen una mayor relación superficie/volumen que los recipientes grandes, por lo tanto, mayores pérdidas de hidrógeno).

Los recipientes criogénicos utilizados para almacenar hidrógeno líquido son recipientes metálicos de doble pared con aislamiento, intercalados entre las paredes. Para minimizar, si no eliminar, las pérdidas térmicas, los efectos de la radiación térmica, la convección y la conducción térmica deben tenerse en cuenta al diseñar los recipientes (ver Figura 3.3) [7]. El recipiente interno que contiene el hidrógeno criogénico está aislado con un material de varias capas con separadores entre cada capa que actúan como barreras térmicas. Este recipiente interno se monta dentro del recipiente externo por medio de accesorios internos especialmente diseñados. El volumen resultante entre los dos recipientes se evacua para evitar posibles fugas de calor por convección térmica.

El almacenamiento criogénico debido a la baja presión de trabajo en comparación con los sistemas de almacenamiento de alta presión tiene un gran potencial para reducir el peso mediante el uso de nuevos materiales compuestos con un rendimiento mejorado. Con tales sistemas, se puede lograr una masa de almacenamiento de energía específica similar a los tanques de combustible convencionales. Uno de los principales problemas que se presenta en el almacenamiento de Hidrógeno líquido es el “*Boil-Off*”, que corresponde a la evaporación de este debido a que existe una absorción de calor por parte del estanque. Lo anterior provoca que aumente la presión del estanque, lo cual no es recomendable. Generalmente el Hidrógeno evaporado se retira y se combustiona de manera segura, liberando vapor de agua. Generalmente

son cantidades menores, pero puede que en un contexto de transporte marítimo esta sea mayor. Todo esto será abordado en el presente trabajo.

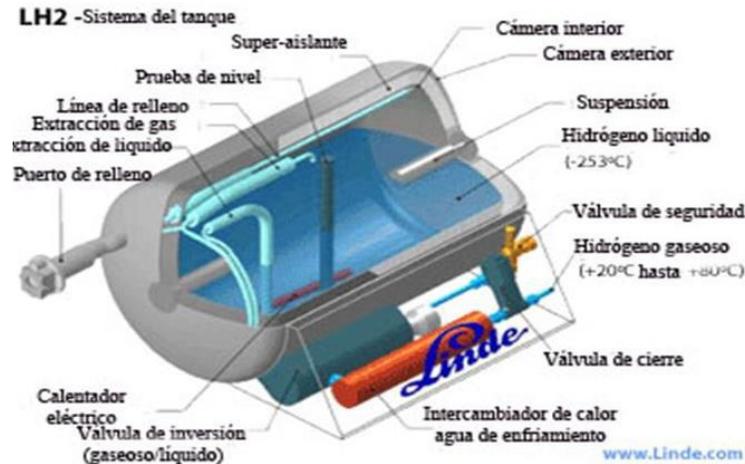


Figura 2. 3: Representación esquemática tanque criogénico. (Referencia: Linde AG)

## 2.5. Almacenamiento Hidrógeno Gaseoso

Esta es una de las tecnologías de almacenamiento más simples, más comunes y eficientes en uso. El hidrógeno a alta presión se almacena en tanques de paredes gruesas (principalmente de forma cilíndrica o cuasi-conformable) hechos de materiales de alta resistencia para garantizar su durabilidad. El diseño del tanque de almacenamiento, que se basa en enfoques de ingeniería deterministas clásicos, aún no está optimizado: los tanques en realidad están sobredimensionados; existe un uso ineficiente del material y una evaluación bastante pobre de la vida útil del recipiente a presión [7]. De acuerdo con el Proyecto Europeo Integrado de Hidrógeno EIHP, que lidera el desarrollo de estándares regulatorios globales para pruebas de hidrógeno, certificación de componentes y sistemas de infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno, los recipientes de almacenamiento de hidrógeno y gas comprimido pueden clasificarse en cuatro tipos como:

- Tipo I: todo cilindro de metal
- Tipo II: aro de revestimiento metálico de carga envuelto con filamento continuo impregnado de resina
- Tipo III: revestimiento de metal sin carga axial y aro envuelto con filamento continuo impregnado de resina
- Tipo IV: forro no metálico no portador de carga axial y aro envuelto con filamento continuo impregnado de resina.

El sistema de almacenamiento liviano más avanzado para el caso de gas comprimido consiste en un recipiente, que en realidad es un tanque compuesto avanzado que utiliza un

revestimiento axial y aro metálico (Tipo III) o plástico (Tipo IV) sin soporte de carga, envuelto con resina impregnada continua filamentos (Figura 2.4). Estos recipientes a presión están atrayendo la mayor parte del interés de la comunidad científica. Su estructura se basa en dos componentes fundamentales: el revestimiento, esencialmente una barrera para la permeación de hidrógeno y la estructura compuesta que garantiza la integridad mecánica del tanque.

La investigación se dirige al desarrollo de nuevas metodologías para el diseño de confiabilidad y la calificación de seguridad de estos sistemas de almacenamiento de alta presión, es decir tanques con formas complejas, uso óptimo de materiales y de alto nivel de seguridad.

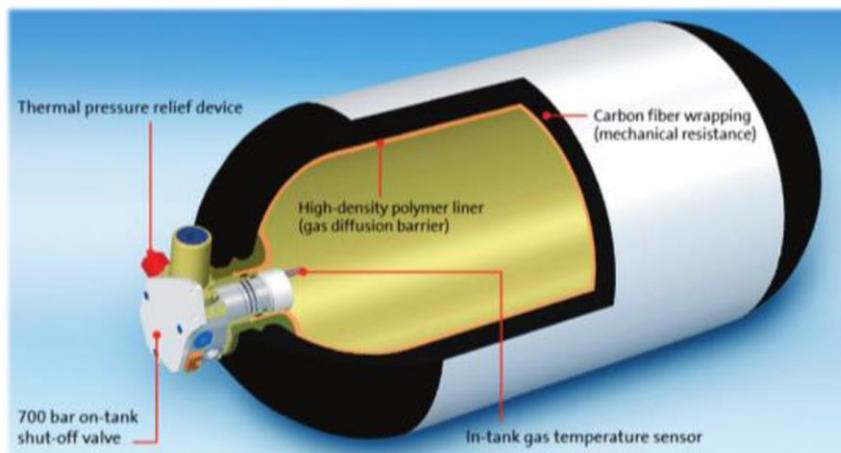


Figura 2. 4: Sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido

## 2.6. Normativas

Toda la información mencionada anteriormente es complementaria a lo que viene a continuación, lo cual hace referencia a lo que es el transporte marítimo como tal, las cosas que se deben tomar en cuenta al momento de transportar este tipo de componentes largas distancias a través del mar.

La Organización marítima Internacional, IMO por sus siglas en inglés, es el organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques a nivel mundial. A lo largo de los años esta organización se ha encargado de establecer un marco normativo para el sector del transporte marítimo que sea justo y eficaz, que sea capaz de adaptarse y aplicar sin problemas en el plano internacional.

Hasta el año 2016 no existía normativa alguna que regulara el transporte de Hidrógeno mediante la vía marítima. Si bien existía el denominado *International Gas Carrier Code* (IGC Code), que regula la construcción y equipamiento de navieras encargadas del traslado vía marítima de gases a granel, no existía ningún documento que entregara información respecto a

Hidrógeno, es así como surge la “RESOLUTION MSC.420 (97)”, en Noviembre del 2016 denominada “*Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk*”, entregando bases para el desarrollo de nuevos cargueros especializados en transporte de Hidrógeno Líquido.

Estos documentos de manera complementaria abarcan puntos relevantes para este trabajo como lo son [8][9]:

- Tipos de fluidos a transportar y requerimientos especiales para cada uno.
- Materiales de construcción y sistemas de seguridad propuestos.
- Tipos de cargas a considerar para diseño de estanques.
- Metodología para realizar análisis de tipo estructural

En resumen, entregan información relevante para dar seguridad y calidad a la construcción de buques y estanques para transporte de Hidrógeno y otros fluidos. La información más útil corresponde a la selección de materiales y formas de realizar análisis de carácter térmico, estructural a los estanques.

## 2.7. Cadena de suministro piloto entre Australia y Japón

Actualmente se encuentra en desarrollo el primer proyecto mundial de cadena de suministro de Hidrógeno, el cual se centra en producir y transportar de forma segura hidrógeno líquido desde el valle australiano de Latrobe en Victoria, hasta Kobe en Japón. El objetivo de este proyecto piloto es demostrar que se puede establecer una cadena de suministro de extremo a extremo entre ambos países. Se puede apreciar un esquema demostrativo de la cadena de suministro planteada entre Japón y Australia, según la figura 2.5.

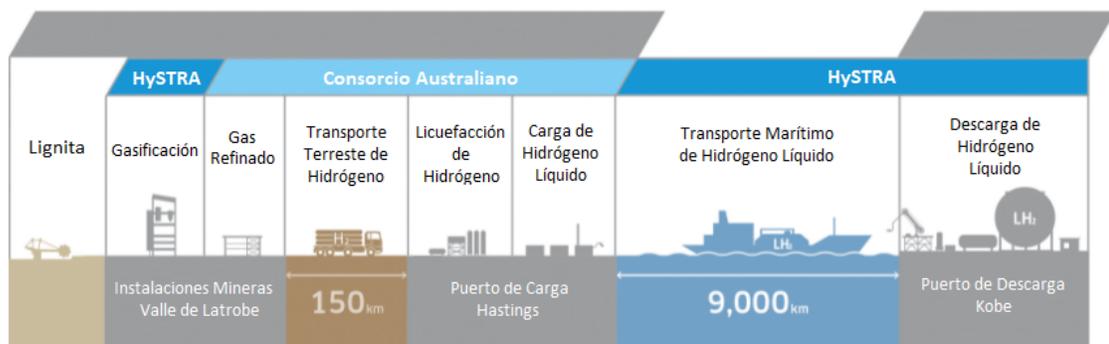


Figura 2. 5: Esquema demostrativo Cadena de Suministro

### 2.7.1. Suiso Frontier

En la fase piloto descrita anteriormente, el protagonista es el buque *Suiso Frontier* (Suiso en Japonés significa Hidrógeno).

Posee tecnología tal, que permite transportar una carga de 1250 [m<sup>3</sup>] de Hidrógeno líquido a una temperatura prácticamente constante de -253°C, con una tasa de *Boil-Off* controlada y sistemas de seguridad especializados que aseguran su correcto funcionamiento. Más información con respecto a la tecnología utilizada en este proyecto no ha sido compartida de forma pública por ninguna de las empresas participantes. Se puede apreciar el buque descrito en la figura 2.6.



Figura 2. 6: Buque LH<sub>2</sub>, Suiso Frontier

### 2.7.2. Nuevo Buque de transporte para LH<sub>2</sub>

Tras las pruebas exitosas realizadas al buque *Suiso Frontier* a comienzos del presente año, la compañía japonesa Kawasaki Heavy Industries desarrolló un nuevo buque de transporte de LH<sub>2</sub>, para un sistema de contención de carga (CCS) que ofrece hasta 40.000 m<sup>3</sup> de capacidad por tanque (Son 4 tanques, por lo tanto, se transportan 160.000 [m<sup>3</sup>] de LH<sub>2</sub>). Este diseño recibió una aprobación en principio (*Approval in Principle, AIP*, sus siglas en inglés) por parte de la sociedad de clasificación Japonesa ClassNK. Tiene contemplado iniciar sus operaciones a fines de esta década.

Características principales del sistema de contención de carga son:

- Permitir el transporte de hidrógeno líquido criogenizado en grandes cantidades, con una capacidad por tanque similar a la de los metaneros de gran tamaño.
- La estructura es de carácter independiente y autoportante, que no forma parte del casco ni contribuye a su resistencia. Responde de manera flexible a la contracción térmica que se produce al transportar LH<sub>2</sub>.
- Cuenta con un sistema de aislación térmico de alto rendimiento que limita la evaporación.
- El BOG generado, se utiliza para propulsar el buque, disminuyendo así las emisiones de CO<sub>2</sub> en las operaciones de transporte marítimo de LH<sub>2</sub>.

# 3. Metodología

A continuación, según la figura 3.1, se detalla la metodología a utilizar para cumplir los objetivos planteados en el presente trabajo de título. Se procede a detallar cada uno de los puntos observados.

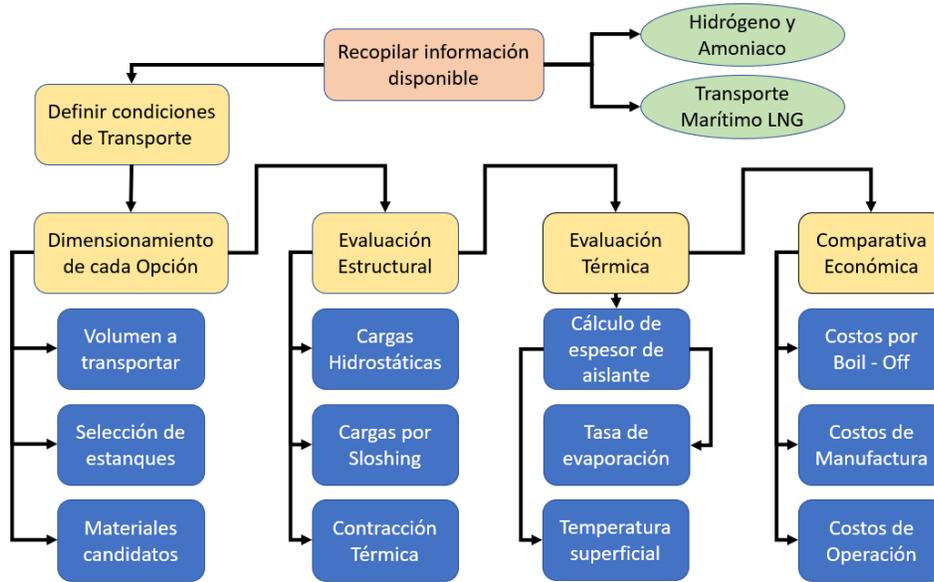


Figura 3. 1: Esquema de Metodología

En primer lugar, se recopila información general y específica sobre el Hidrógeno y Amoníaco. Centrado en lo que son sus propiedades y aspectos relevantes al momento de ser transportados en estanques, ya sea en estado líquido o gaseoso, identificando problemáticas que serán consideradas al momento de seleccionar y dimensionar cada uno de los estanques correspondientes.

Por otra parte, se recopila información en torno al transporte marítimo actual de LNG, condiciones termodinámicas de transporte, tamaño de la flota actualmente utilizada, tamaño de los buques utilizados, tipos de estanques predominantes en el mercado, volúmenes transportados, configuración de los estanques para soportar las condiciones identificadas. Todo esto para tener un punto de referencia en torno al desarrollo de un buque que sea capaz de transportar los fluidos considerados en este trabajo, los cuales son:

- Hidrógeno Líquido (LH<sub>2</sub>)
- Hidrógeno Gaseoso (GH<sub>2</sub>)
- Amoníaco (NH<sub>3</sub>)

Complementariamente, la información entregada por la IMO es de suma relevancia para conocer normativas básicas y otras más aplicadas sobre el transporte de gases mediante la vía

marítima, incluyendo recomendaciones en torno a la integridad estructural de los estanques a seleccionar y diseñar, o temperaturas de diseño para los análisis térmicos a realizar.

Luego se define una escala de transporte en base a la información recopilada referente a consumos de Hidrógeno en países relevantes. Es decir, se establece una cantidad de Hidrógeno a transportar en Kilogramos (Kg), y luego, según las condiciones termodinámicas de cada una de las alternativas, se define el volumen de cada una de ellas. El método para definir la cantidad de Hidrógeno a transportar se basa en las proyecciones mencionadas en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Chilena, en la cual es posible identificar montos de inversión, costo por kg de Hidrógeno exportado y países que potencialmente serán importadores de Hidrógeno.

Destacar, que para cada alternativa la cantidad de líquido o gas serán distintas, ya que sus condiciones de transporte no son iguales, implicando densidades y, por consiguiente, volúmenes diferentes de transporte. Es prioridad transportar la cantidad de Hidrógeno definida inicialmente en kg, por lo que se realiza un cálculo para obtener la cantidad de amoniaco a importar.

Con la información recopilada hasta este punto, es posible realizar una primera evaluación, que se centra en identificar si alguna de las opciones no es viable, en este caso, por una razón netamente tecnológica.

Posteriormente a la selección definitiva de alternativas, se realiza un diseño y análisis de carácter estructural y térmico para cada uno de los estanques seleccionados hasta este punto, considerando las recomendaciones pertinentes entregadas por la IMO. Dicho diseño abarca la selección del tipo de estanque para cada una de las alternativas, esto considerando los estados termodinámicos durante su transporte. Además de seleccionar materiales candidatos para los análisis a realizar posteriormente.

El diseño estructural, se centra en el cálculo de espesores de las capas primarias de cada estanque, tal que soporten los siguientes tipos de cargas y estreses:

- Presión Hidrostática por el fluido que contienen.
- Presión Hidrodinámica debido al movimiento que sufre el buque durante su trayecto.
- Esfuerzo interno del estanque debido a bajas temperaturas a las que se ven expuestos.

Cada una de las cargas y esfuerzos anteriormente mencionados son considerada solo si la alternativa lo amerita. Además, cabe mencionar que las cargas Hidrodinámicas poseen una fuerte dependencia de la geometría del buque, por lo que se analizará como varían dichas cargas, según la velocidad del buque, la eslora de este, la manga que posea, la posición que tengan los estanques sobre él y otras especificaciones geométricas.

Por otro lado, el análisis térmico abarca distintas aristas según sea el tipo de fluido a transportar.

En el caso del Hidrógeno, el análisis se centra en obtener el espesor de la capa de aislante necesaria para que la tasa de generación de *Boil-Off* no sea superior a un 0.5% diario. Se realiza un análisis que considera los siguientes supuestos:

- Análisis térmico de carácter estacionario.
- Temperatura exterior uniforme igual a 35°C durante las 24 horas del día.
- Se consideran los mecanismos de conducción, convección y radiación.
- Toda la superficie del estanque es sometida a la misma temperatura exterior.

En cambio, en el caso del Amoniaco el análisis térmico se divide en 2 etapas:

La primera consiste en identificar si es posible que la carga se transporte en condiciones óptimas sin necesidad de un aislante, es decir, si la temperatura superficial del estanque causa o no algún tipo de problema en caso de ausencia de una capa externa de aislante. Esta temperatura superficial tiene el valor de 10°C, para evitar la formación de hielo debido a la humedad del ambiente.

La segunda etapa consiste en calcular el espesor necesario de aislante exterior, para que la temperatura superficial se corresponda con la mencionada anteriormente. Las suposiciones para este análisis térmico son exactamente las mismas que son mencionadas para el caso del Hidrógeno.

Luego, con los estanques ya diseñados en su forma integral, se procede a la realización de una ingeniería básica del buque, enfocado en equipos principales complementarios. Tal que cumplan con funciones que aseguren funcionen relevantes del buque.

Finalmente se obtienen mediante referencias y suposiciones debidamente justificadas costos estimados de cada una de las alternativas hasta este punto analizadas. Dicha comparativa se centra en la obtención de costos que implica realizar el transporte marítimo de cada una de las opciones. Abarcando costos de capital, costos de operación y costos debido a pérdidas energéticas durante el trayecto, en específico, las pérdidas debido al *Boil-Off* generado.

## 4. Transporte marítimo de LNG

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos, el cual, en estado líquido denominado LNG por sus siglas en inglés (*Liquefied Natural Gas*) suele transportarse a una temperatura cercana a lo que es su punto de ebullición a presión atmosférica, es decir, aproximadamente -160 [°C].

Hoy en día el mercado de transporte de LNG es uno de los más grandes del mundo y debido a las condiciones de transporte en que se realiza, toda información con respecto a esto es un punto de referencia e inspiración para actuales y futuros trabajos en torno al transporte marítimo de Hidrógeno, en particular en forma líquida.

Hasta fines del año 2021 la flota de buques que transportan LNG está compuesta por 572 barcos, de los cuales 35 fueron lanzados a sus actividades durante el año mencionado.

De la totalidad de buques un 79% corresponde a buques con sistema de contención de carga de membrana y un 21% a estanques autoportantes o también denominados independientes. Ambos tipos de sistemas serán descritos en secciones posteriores, para conocer de mejor forma las condiciones bajo las que operan, aun así, se presentan algunas ventajas y desventajas, las cuales son mencionadas en la tabla 4.1:

Tabla 4. 1: Características generales estanques de membrana e independientes.

	Ventajas	Desventajas
Estanques de Membrana	Utilización eficiente del espacio	Llenado parcial restringido
	Sistema de contención ligero	Diseño menos robusto ante condiciones marítimas adversas
	Uso eficiente de combustible	
Estanques Independientes	Más robustos en condiciones marítimas adversas.	Diseño esférico ocupa espacio ineficientemente
	Llenado parcial permitido	Sistema de contención más pesado, debido a espesor de capas.
	Construcción más rápida	

### 4.1. Tipos de tanques

Los sistemas de contención de carga varían según las características para las cuales se proyecta el buque, el tipo de producto destinado a cargar y de la inversión económica inicial proyectada. Así, el IMO identifica 4 tipos de tanques:

- Tanques independientes (Tipo A, B y C)
- Tanques de Membrana
- Tanques de Semi – Membrana
- Tanques Integrales o Estructurales

Se procede a describir los 2 primeros, debido a que son los sistemas más comunes y empleados actualmente en el transporte marítimo de LNG, producto que es transportado en

condiciones especiales que sirven como referencia para el transporte de Hidrógeno en estado líquido principalmente.

#### 4.1.1. Tanques independientes

Los estanques independientes son autoportantes y no forman parte de la estructura del casco del buque, por lo que no contribuyen a su resistencia. Se pueden distinguir 3 tipos de tanques independientes, diferenciados por la presión de diseño de cada uno y su forma.

#### 4.1.2. Tipo A

Los tanques tipo A, generalmente son construidos con un acero aleado con Níquel resistente a temperaturas bajo cero. Su forma generalmente es de carácter prismático-plano, aprovechando lo mejor posible el espacio del casco del buque. Se puede apreciar la forma de estos estanques según la figura 4.1.



Figura 4. 1: Ejemplos de tanques tipo A para transporte marítimo de productos

Este tipo de tanque, al utilizarse generalmente para el transporte de carga refrigerada, requiere de un aislamiento eficaz y una barrera secundaria completa de contención para proteger el casco de las bajas temperaturas. Además, el espacio localizado entre la barrera primaria y la secundaria se denomina espacio inter-barreras y en él se debe mantener una atmósfera inerte.

Estos tanques no están diseñados para soportar altas presiones, por ello, son ideales para los buques que transportan cargas totalmente refrigeradas, donde la presión es aproximadamente de 1 [bar].

Se puede observar un resumen de características de estos estanques según la tabla 4.2:

Tabla 4. 2: Resumen características principales tanques tipo A

Tanques Tipo "A"	
Material:	Acero resistente a bajas temperaturas (Arctic D)
Forma:	Prismática-Plana
Presión de Vapor:	Máximo:0.25Kg/cm2 (<0.7bar)
Temperatura de Trabajo:	< 10°C
Barrera Secundaria:	Barrera secundaria completa
Aislamiento:	Paneles de espuma de poliuretano de 120 mm con recubrimiento de 5 mm de chapa de aluminio y un espacio entre paneles de 10 mm que se rellena con tiras de espuma recubierta de cinta adhesiva (Teroson)
Capacidades Típicas:	15.000m3 – 30.000m3 – 52.000m3 - 80.000 m3
Buques que emplean estos Tanques:	LPG Totalmente Refrigerados y LPG de Etileno.

### 4.1.3. Tipo B

Los tanques tipo B o tipo Moss Rosenberg se caracterizan por su forma esférica, en comparación a los tanques tipo A.

El diseño de este tipo de estanques no requiere de una barrera secundaria completa, basta solo con una que cubra parcialmente la zona inferior del estanque, encargada de contener la carga en caso de fugas. Al igual que los estanques tipo A, el espacio inter-barreras debe contener un gas de carácter inerte o “seco” que cumpla la función de generar un ambiente que evite la inflamabilidad de la carga en caso de existir fugas de la barrera primaria.

En la parte superior del estanque se encuentra un domo que se encarga de proteger la barrera principal. Entre la barrera principal y este domo se encuentra la capa de aislamiento. La figura 4.2 entregan mayor detalle de la configuración descrita.

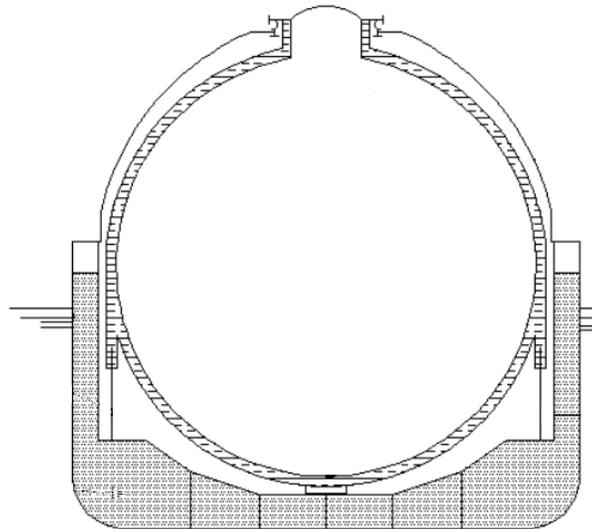


Figura 4. 2: Representación estanque independiente tipo B

#### 4.1.4. Tipo C

Los estanques tipo C se caracterizan por su forma cilíndrica con extremos esféricos. Además, se utilizan generalmente para el transporte de carga presurizada, alcanzando presiones de hasta 20 [bar] o también cargas a presión ambiental, pero a temperaturas que no son menores a -50 [°C]. Como los observados en la figura 4.3.

En base a las características mencionadas de la carga, es que estos estanques no están sometidos a altas cargas estructurales, razón por la cual no suelen tener una segunda barrera de contención ni tampoco capas aislantes para mantener la temperatura de la carga.

Existen también modelos bi-lobulares como los que se aprecian en la figura 4.4, los cuales son utilizados para aprovechar el espacio de mejor manera, especialmente en buques de menor tamaño.

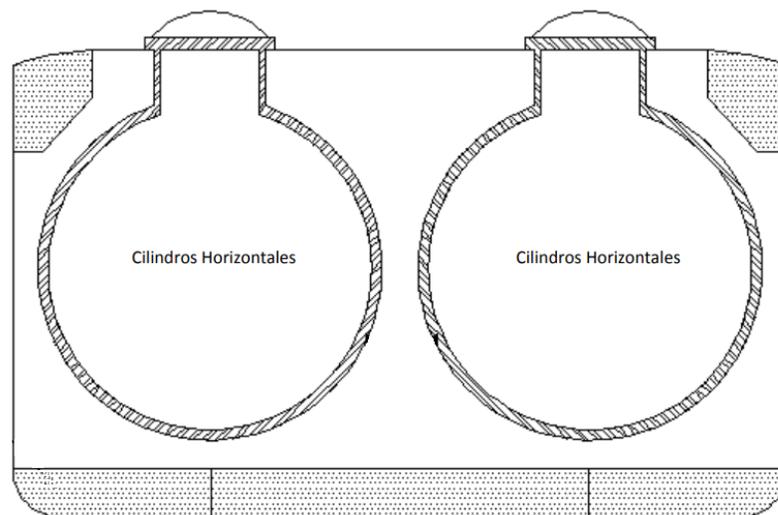


Figura 4. 3: Representación estanque independiente tipo C (Unilobular)

#### 4.1.5. Tanques de Membrana

Los tanques de membrana se reconocen por sus dos membranas delgadas de Invar que se encuentran una en contacto directo con la carga, la cual posee un grosor de 0.7 [mm] y la segunda actúa como protección de emergencia en caso de fugas. La utilización de Invar es debido al coeficiente de expansión térmica considerablemente bajo que posee.

Entre ambas membranas se encuentra el material aislante encargado de disminuir hasta cierto punto estipulado por normativa el intercambio de calor entre el ambiente y el fluido que se transporta. El tipo de aislación varía según sea la empresa especializada que desarrolle dicha tecnología.

Su forma prismática de caras planas permite a la embarcación utilizar de mejor manera el espacio, dando así la oportunidad de tener estanques de capacidades mucho mayores a los que tienen por ejemplo los independientes tipo B (Esféricos).

Hoy en día los dos sistemas de contención de carga que encabezas el mercado corresponden al modelo Mark III diseñado por la empresa Technigaz y el modelo NO96 diseñado por Gaztransport. Ambas empresas luego se unieron formando Gaztransport and Technigaz (GTT).

Este tipo de arreglo, entrega información esencial que puede servir para un diseño preliminar de un sistema de contención para hidrógeno líquido. En las tablas 4.3 y 4.4 se aprecian características de ambos modelos mencionados anteriormente.

Tabla 4. 3: Características modelo Mark III y posteriores de estanques de membrana GTT

	Mark III	Mark III Flex	Mark III Flex+
Boil-off Rate (BOR)* (170K m <sup>3</sup> vessel)	From 0.15 to 0.125%	From 0.10 to 0.085%	0.07%
Date to market	1969 (Mark I concept)	2011	2017
Insulation	Foam 130 kg/m <sup>3</sup>		
Membranes	Primary: Stainless steel 304L - 1.2 mm Secondary: composite material		
Support	Primary and secondary panel: foam and plywood		
Thickness Primary + Secondary panel	270 mm = 100 + 170	400 mm = 100 + 300	480 mm = 100 + 380

Tabla 4. 4: Características modelo NO96 y posteriores de estanques de membrana GTT

	NO96	NO96 GW	NO96 L03	NO96 L03+
BOR* (170K m <sup>3</sup> vessel)	0.15%	0.125%	0.11%	0.10%
Main insulating material	Perlite	Glass-wool	Glass-wool and foam 130 kg/m <sup>3</sup>	
Membranes	Invar® 0.7 mm			
Support	Boxes with bulkheads: plywood	Boxes primary and top secondary with bulkheads: plywood	Boxes with bulkheads: plywood	Panels: foam & plywood
Thickness	530 mm (primary box: 230 mm + secondary box: 300 mm)			

## 5. Escala de transporte para cada alternativa

En base a lo mencionado en la sección 2.1, es posible estimar la cantidad de Hidrógeno y Amoniaco que será exportado por nuestro país. Dichas estimaciones toman como referencia proyecciones al año 2030, tanto de países claves que centran sus esfuerzos en importar Hidrógeno, como el costo (USD/kg<sub>LH2</sub>) estando ya en los puertos de estos países.

Uno de los países que planean ser líderes en torno el nuevo rol que está tomando el Hidrógeno a nivel mundial es Japón, quien según su plan nacional tiene proyectado el importar anualmente 300.000 toneladas de Hidrógeno, además de lograrlo a un costo aproximado de 2,7 Euros/kg<sub>H2</sub>, esto para el año 2030. [1]

Chile por su lado, según su estrategia nacional, proyecta un tamaño de mercado para sus exportaciones de Hidrógeno al año 2030 de aproximadamente 0,1 BUSD, esto en torno a sus relaciones con Japón. Es más, Japón tiene objetivos más que claros en torno a la utilización y aspectos nacionales a fomentar con la importación a gran escala de Hidrógeno, esto se puede observar en la figura 5.1, donde se detallan metas propuestas para el desarrollo del país.

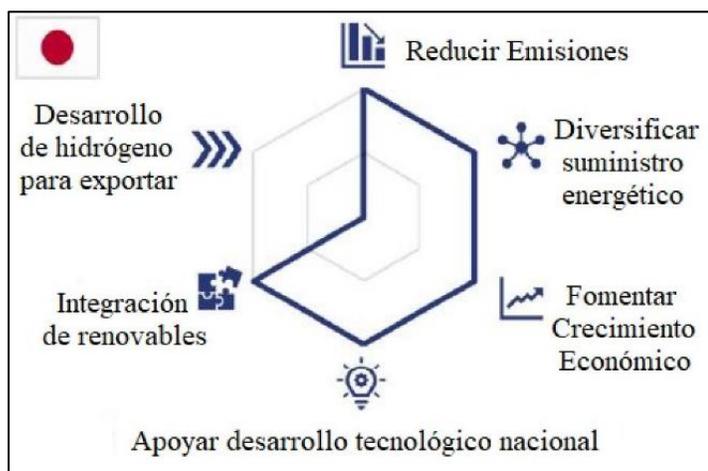


Figura 5. 1: Metas nacionales de Japón que plantea en su estrategia de Hidrógeno

Así, considerando los datos anteriormente mencionados, se estima que la cantidad de Hidrógeno que exportaría Chile a Japón en el año 2030 es de 40.000 [ton]. Tomando en cuenta que Japón planea exportar una cantidad aproximada de 300.000 [ton] de Hidrógeno al año y que espera diversificar los países desde los cuales lo hace, cobra sentido el que Chile, que estaría en una etapa temprana de sus actividades de exportación, lo realice en una cantidad como la indicada anteriormente, tal como se puede observar en la figura 5.2, donde el potencial de mercado internacional que Chile puede llegar a tener en el año mencionado es de aproximadamente un 3% de los intercambios a nivel mundial.

En el caso del Amoniaco, tomando en cuenta que el Hidrógeno corresponde a un 17,64 p%, sería necesario importar una cantidad igual a 226758 [ton]. Así, ya en Japón, se recuperaría el Hidrógeno correspondiente según el proceso químico que sea adecuado.

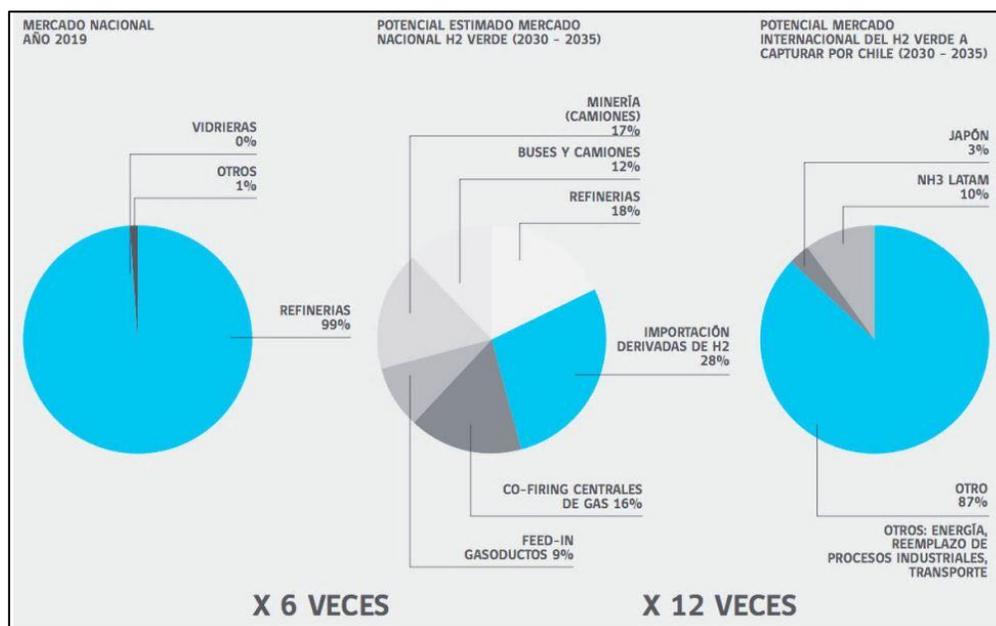


Figura 5. 2: Proyecciones de mercado nacional y potencial de mercado nacional/internacional del hidrógeno verde para Chile

Los datos anteriormente mencionados se condicen, con los proyectos que actualmente marcarán el despegue del hidrógeno verde en nuestro país, los cuales son [19]:

- HyEx – Producción Hidrógeno Verde
- Antofagasta Mining Energy Renewable (AMER)
- HyPro Aconcagua
- Hidrógeno Verde Bahía Quintero
- H2V CAP
- Proyecto Faro del Sur

Todos estos proyectos en conjunto producirán 45.000 toneladas de hidrógeno verde en el año, implicando inversiones por más de US\$1.000 millones y permitiendo reducir más de 600.000 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente [19].

Se destaca, además, el proyecto denominado HOASIS, anunciado por la multinacional española TCI Gecomp, que se visualiza como la mayor planta fotovoltaica del mundo con una potencia instalada de 3 GW, asociada a una instalación de electrolizadores de 2,1 GW, capaces de producir 102.000 toneladas de hidrógeno verde al año [20].

Como se menciona en los alcances del presente trabajo, se considera el dimensionamiento de un solo buque encargado de las importaciones a lo largo de un año calendario, teniendo como contexto un primer año de importaciones y que no exista una flota de mayor tamaño. Así, teniendo como referencia grandes buques metaneros, como también la información obtenida en torno al *Suiso Frontier*, es que se definen algunas características que permiten obtener la cantidad de viajes a realizar entre Chile y Japón para la exportación de las 40.000 toneladas anuales. Ver Anexo 1.

- Velocidad del buque: 16 nudos (~29,6 km/h)
- Distancia de ruta Chile-Japón: 17000 [km]

La distancia de 17.000 [km] se obtiene al asumir que el puerto de origen se encuentra en la zona Norte de nuestro país, particularmente en la Región de Atacama. Tal como se puede observar en la figura 5.3.

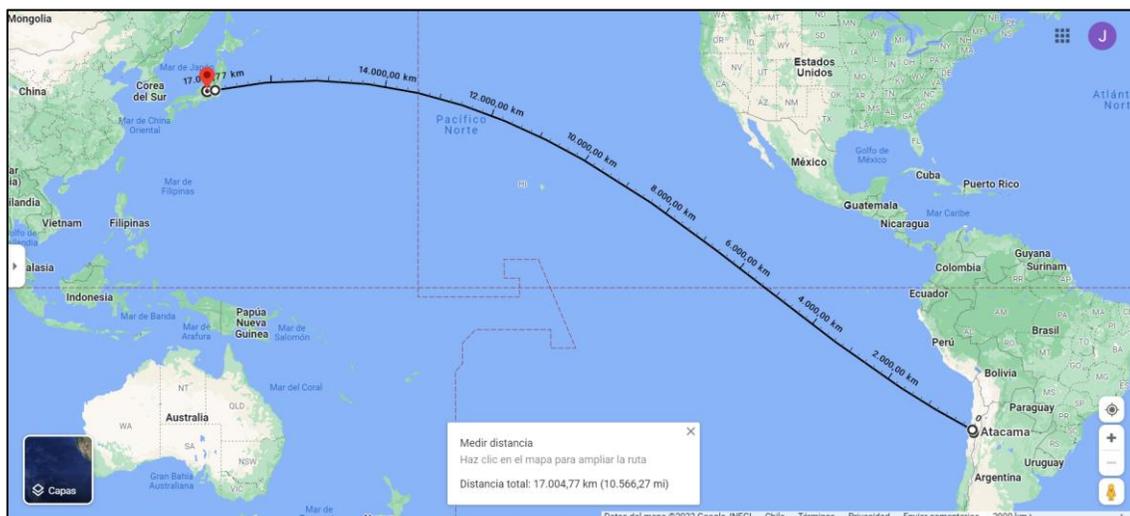


Figura 5. 3: Representación recorrido y distancia preliminar Chile-Japón

- Tiempo de recorrido Chile-Japón: 24 días, para una velocidad de 16 nudos.

Considerando el tiempo que demora el buque en realizar la descarga de su contenido, además del cumplimiento de protocolos tanto en Chile como en Japón, se puede asegurar que el buque realizará 7 ciclos de carga-descarga dentro de un año calendario. Así, la cantidad de Hidrógeno exportado a lo largo de un año es dividida en 7, obteniendo lo observado en la figura 5.4.



Figura 5. 4: Masas a importar (Anualmente y por cada viaje)

El volumen de los estanques a dimensionar será definido en la sección 7, esto se deriva a partir de los estados termodinámicos a los cuales debe ser transportado cada uno de los fluidos, además, de comparar con el tamaño de buques ya existentes encargados del transporte de LNG, para confirmar que los volúmenes involucrados sean consistentes con cargamentos actuales.

## 6. Condiciones de transporte para cada alternativa

Cada una de las alternativas presenta distintas presiones y temperaturas para lograr el mejor almacenamiento posible. Tras quedar definidos dichos estados termodinámicos, se procede a obtener los volúmenes a transportar y la forma específica de cada uno de los estanques, según sea el fluido involucrado.

### 6.1. Caso Hidrógeno Líquido

En instalaciones y transporte de tipo terrestre, el hidrógeno líquido posee estados bastante definidos, que corresponden a una temperatura de  $-253^{\circ}\text{C}$  (20 K) y una presión cercana a la atmosférica, aproximadamente 1 bar. Es posible considerar presiones mayores, pero que no superen los 5 [bar], esto tomando en cuenta que se trata de un fluido criogénico, por lo que el combinar una baja temperatura con presiones mayores a la atmosférica puede provocar aumento en la difusividad a través de los materiales involucrados. En la figura 6.1 se observa el diagrama de fase del hidrógeno, donde se aprecia el punto triple, además de la ubicación del punto más favorable para su transporte. (Punto rojo en la figura)

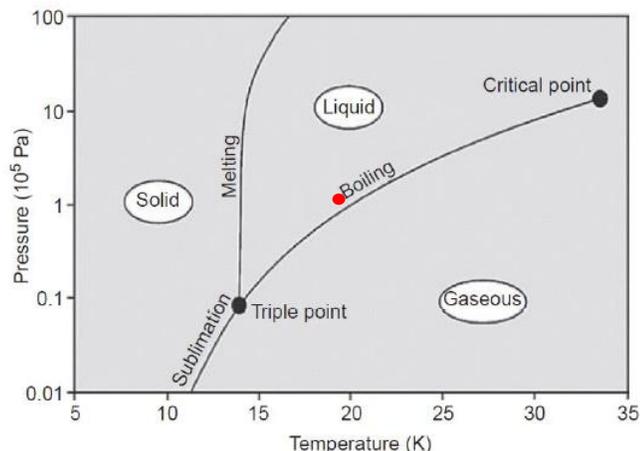


Figura 6. 1: Diagrama de fase del Hidrógeno [17]

## 6.2. Caso Hidrógeno Gaseoso

Un aspecto fundamental del transporte de Hidrógeno Gaseoso es la seguridad, la cual frente al hecho que se transportaría un fluido sumamente energético, además se suma el hecho de tener que almacenarlo a altas presiones.

Actualmente, por mencionar un ejemplo, el transporte de gas natural en forma gaseosa se realiza mediante gaseoductos entre los distintos países que lo comercializan. Es tal la diferencia de costos entre el transporte marítimo de LNG y su forma gaseosa que no se considera el transporte marítimo de este último. Además, las presiones a las cuales puede llegar el transporte gaseoso mediante gaseoductos no superan los 20 bar.

Por otro lado, desarrollo de estanques de almacenamiento para GH<sub>2</sub> se ha centrado en lograr soportar presiones cada vez mayores, esto para lograr un aumento en la densidad gravimétrica de este. Este punto es algo delicado, tomando en cuenta que existen estudios donde se alcanzan presiones de hasta 500 [bar], siendo este valor el recomendado para estanques a alta presión [16], pero los volúmenes no superan el valor de 1[m<sup>3</sup>], ya que sus usos están enfocados en el uso de vehículos eléctricos con celdas de combustible (*Fuel Cell Electric Vehicle*, FCEV).

Sumado a lo anterior, cabe mencionar que en ningún apartado del IGC Code se hace referencia a la opción de transportar cargas a tan alta presión. En el capítulo 4, sección E, donde se describen las condiciones de transporte según sea el tipo de estanque seleccionado, no tiene cabida un estanque a una presión de 500 [bar]. Además, en el documento complementario al IGC, que entrega recomendaciones básicas para el transporte marítimo de Hidrógeno, solo hace referencia a transportarlo en forma líquida, no es mencionado en ningún apartado el hacerlo en forma gaseosa, ya sea a bajas o altas presiones.

Es debido a esto y por razones de seguridad que se descarta el diseñar un sistema de carga para hidrógeno a altas presiones. Mencionar que a presiones tan bajas como la atmosférica o 10 [bar] la densidad gravimétrica de este no es lo suficientemente relevante como para considerarlo una opción viable para transporte marítimo.

Así, es como a partir de la sección 7, solamente se analizan los casos de transporte de Hidrógeno Líquido y Amoniaco.

### 6.3. Caso Amoniaco

Las condiciones de transporte del amoniaco, del punto de vista ingenieril no son extremas, y mucho menos si son comparadas con aquellas correspondientes al transporte criogénico de hidrógeno.

Una temperatura de  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  (240 K) y una presión de 1[bar] con las condiciones por condiciones adecuadas para un transporte de gran volumen de amoniaco líquido.

Bajo estas condiciones de transporte, el amoniaco posee una densidad de  $680\text{ [kg/m}^3\text{]}$ , por lo que el volumen a importar en un año calendario sería de  $333473\text{ [m}^3\text{]}$ .

Así, quedan definidos los volúmenes a transportar para cada una de las alternativas, un resumen de lo anterior se observa en la figura 6.2.

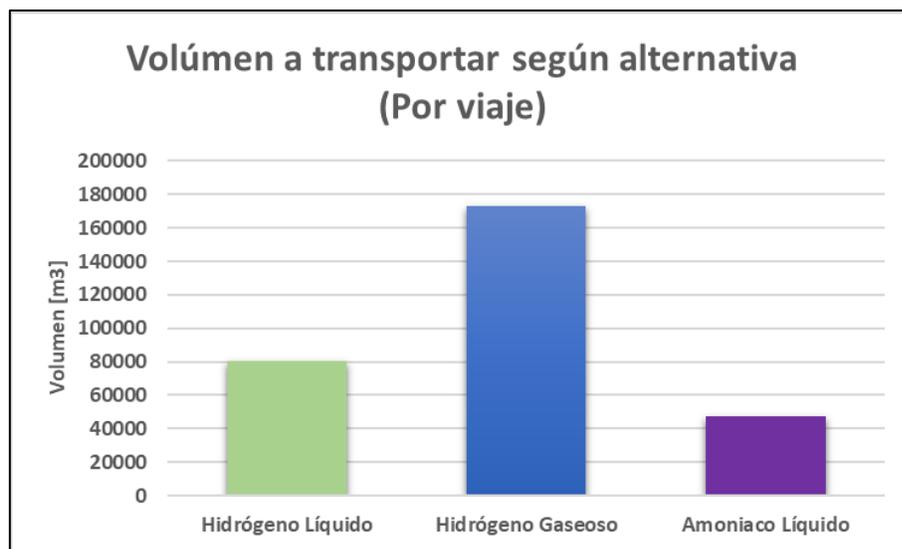


Figura 6. 2: Volumen de carga (Por viaje) para cada alternativa

## 7. Problemas que considerar durante transporte

Existen características propias de cada uno de los fluidos a transportar, que implican en desafíos al momento de seleccionar los materiales adecuados para el diseño de los estanques dispuestos a almacenarlos en su trayecto.

A continuación, se mencionan y describen dichas características, tanto del Hidrógeno, como del Amoniaco.

### 7.1. Caso Hidrógeno Líquido

#### 7.1.1. Permeabilidad en materiales

El hidrógeno molecular debido a su tamaño considerablemente pequeño tiende a difundir a través de una cantidad importante de materiales sin la necesidad de estar en condiciones específicas.

En el caso del LH<sub>2</sub>, a pesar de ser posible su transporte a temperaturas criogénicas, las tasas de difusión no disminuyen de forma importante.

Una solución pertinente implica el seleccionar materiales que en primer lugar posean una estructura cristalina tal, que los espacios intersticiales sean menores, es decir, una estructura cristalina del tipo FCC.

#### 7.1.2. Amplio rango de inflamabilidad

El hidrógeno en presencia de aire y una fuente de energía capaz de provocar la combustión de este, posee un rango de inflamabilidad considerablemente amplio (4% - 75%). Es mucho más amplio que el rango de inflamabilidad del LNG, que es de un 5% - 17%. Es debido a esto que se debe lograr un ambiente óptimo lo más aislado posible tanto durante el transporte, como también cuando se realiza la carga y descarga del fluido.

#### 7.1.3. Fragilización por bajas temperaturas

El fenómeno por fragilización a bajas temperaturas en materiales dúctiles es algo que si o si debe tomarse en cuenta al seleccionar un material para el almacenamiento de Hidrógeno Líquido. La selección de materiales que sean capaces de mantener su comportamiento dúctil a pesar de estar a temperaturas cercanas al cero absoluto es el foco de esta etapa de diseño.

## 7.2. Caso Amoniaco

### 7.2.1. Corrosión

Debido a su carácter altamente corrosivo, el amoniaco debe ser almacenado con materiales que no sean susceptibles a este fenómeno. Materiales como el cobre o aleaciones de aluminio quedan totalmente descartados. Aceros inoxidable aparecen en la lista de materiales adecuados para el almacenamiento de amoniaco. Esto se será abarcado en próximas secciones.

### 7.2.2. Toxicidad

El amoniaco debido a su alta toxicidad debe ser almacenado con una seguridad igual de importante a como se almacena el hidrógeno. Se busca evitar que existan situaciones en que la tripulación tenga contacto directo con el fluido.

## 8. Diseño conceptual de cada estanque

Para cada una de las alternativas, el punto relevante corresponde a los estanques de almacenamiento. Estos deben ser capaces de contener los fluidos, soportando las cargas y situaciones que puedan presentarse durante la ruta, como lo son fuertes movimientos, derrames o el aumento de la temperatura, que provoca que exista *Boil-Off*.

El dimensionar cada uno de los estanques implica directamente el diseño de soluciones pertinentes a las problemáticas abordadas en la sección 7. Esto mediante un análisis de carácter estructural y térmico.

### 8.1. Dimensiones generales según tipo de estanque

#### 8.1.1. Caso Hidrógeno Líquido

Mediante una revisión de la flota de buques que actualmente transportan LNG, se presta atención a los tipos de estanques que estos tienen, el volumen transportado y la cantidad de estanques que estos poseen.

Los buques que utilizan estanques de membrana suelen transportar cargas superiores a los 160000 [m<sup>3</sup>], y se caracterizan por poseen en su mayoría solamente 2 estanques. Por otro lado, aquellos buques que transportan cargas menores a los 160000 [m<sup>3</sup>] poseen generalmente

estanques tipo B. Recordemos que estamos hablando de cargas de carácter criogénicas, las cuales en el caso del LNG es de  $-165\text{ [}^\circ\text{C]}$  y  $-253\text{ [}^\circ\text{C]}$  para el LH<sub>2</sub>.

Ahora, si se presta atención solamente a aquellos buques que utilizan estanques tipo B, los cuales son 110, más del 50% de ellos utilizan 4 estanques esféricos.

En base a esto se define que serán 4 los estanques esféricos a utilizar, por lo tanto, el volumen de LH<sub>2</sub> en cada uno de ellos será de 20180 [m<sup>3</sup>].

Según recomendaciones de la IMO, para disminuir efectos de *sloshing* (Se refiere al movimiento de un fluido al estar dentro de un recipiente, en este caso, el estanque esférico), el nivel de fluido durante los viajes debe ser siempre menor a un 10% y mayor que un 95% del volumen total que pueda contener el estanque. Así, los 20180 [m<sup>3</sup>] se consideran como el 95% del estanque a dimensionar. Sumado a lo anterior, la misma geometría esférica evita considerablemente los efectos de *sloshing*, comparado con lo que sería un estanque prismático de caras planas. [1]

Por geometría básica se obtiene el radio interior del estanque esférico, que corresponde al resultado de la expresión 8.1:

$$Radio_{int} = \left( \frac{3 \cdot V_{LH_2}}{0.95 \cdot 4 \cdot \pi} \right)^{1/3} [m] \quad (8.1)$$

$$Radio_{int} = \left( \frac{3 \cdot 20180}{0.95 \cdot 4 \cdot \pi} \right)^{1/3} [m] \quad (8.2)$$

$$Radio_{int} = 17.18 [m] \quad (8.3)$$

De esta forma los estanques se aprecian de forma conceptual en la figura 8.1a. Estos se ubicarían de forma alineada de forma longitudinal en el buque, teniendo un arreglo de la manera que se aprecia en la figura 8.2. El espesor que se aprecia en la figura 8.1 no está a escala con relación al radio del estanque, es solo una representación conceptual, para tener una idea de lo que se está dimensionando.

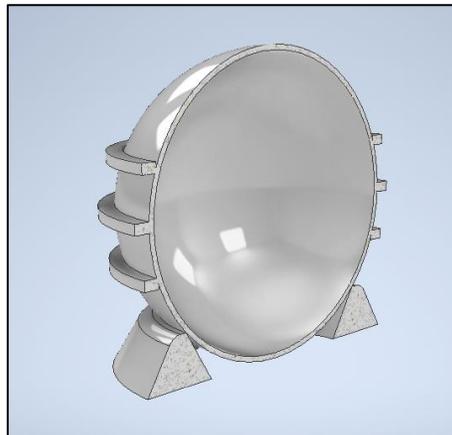


Figura 8. 1: Representación 3D de estanque LH<sub>2</sub>. Elaboración propia.

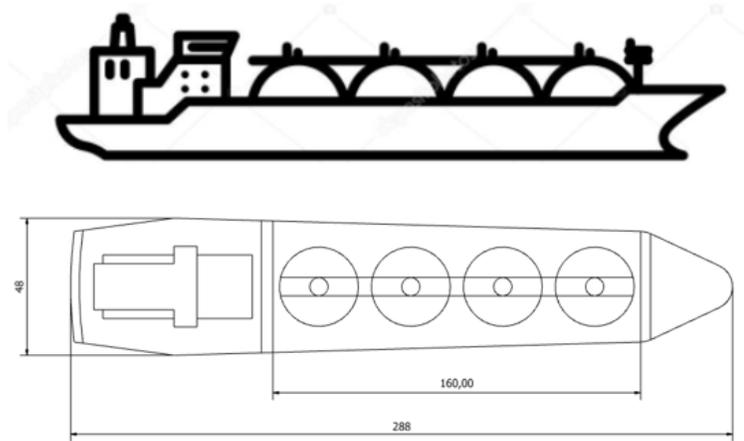


Figura 8. 2: Representación conceptual de buque de LH2. Elaboración propia.

### 8.1.2. Caso Amoniaco

Sustancias como el amoniaco y otras como es el caso de Gas de Petróleo Licuado (LPG), debido a que las condiciones a las que son transportadas no son de alta exigencia del punto de vista ingenieril, la utilización de estanques tipo C unilobular con caras extremas esféricas es lo más adecuado según lo estipulado por la IMO.

Se define la utilización de 4 estanques de almacenamiento, de tal manera que el volumen que tendrá cada uno de ellos es de  $11910 \text{ [m}^3\text{]}$ , una cantidad que está dentro de los rangos que generalmente se transportan en la industria marítima en el mismo tipo de estanques, pero con otro tipo de contenido, como lo es Gas de Petróleo Líquido (LPG por sus siglas en inglés, *Liquefied Petroleum Gas*).

La geometría del estanque, tal como se puede observar en la figura 8.3, queda definida solamente por el valor R, que indica el radio interno de la sección esférica de este. En la figura 8.4 se aprecia una representación 3D del estanque de amoniaco dimensionado. (El espesor del estanque no está a escala, solamente se encuentran a escala las dimensiones L y R).

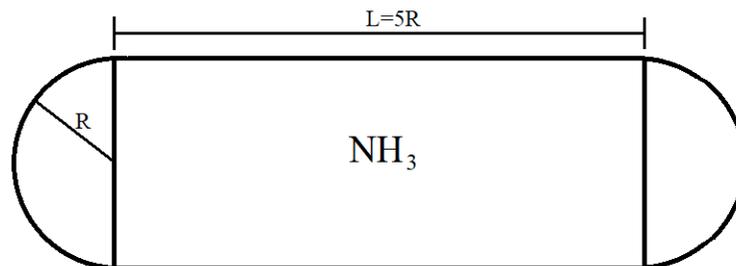


Figura 8. 3: Representación geometría tanque de amoniaco. Elaboración Propia

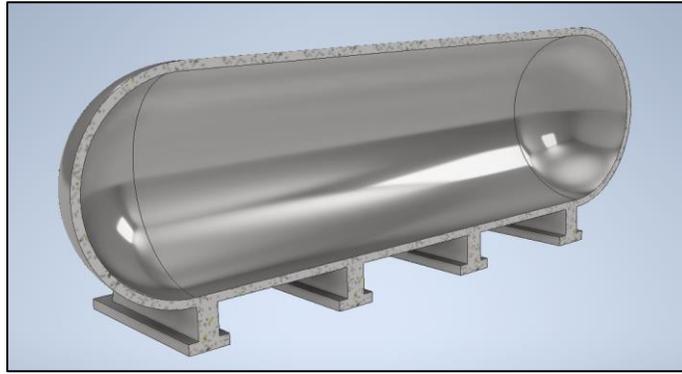


Figura 8. 4: Representación 3D geometría tanque de amoníaco. Elaboración Propia

Como se aprecia en la figura, el largo de la sección cilíndrica posee un valor de 5 veces el radio asignado para las caras esféricas, las cuales son idénticas. De esta forma, mediante geometría básica se obtiene el valor de R. Así, según la expresión 8.4:

$$R_{int} = \left( \frac{3 \cdot V_{NH_3}}{19 \cdot 0.95 \cdot \pi} \right)^{1/3} [m] \quad (8.4)$$

$$R_{int} = \left( \frac{3 \cdot 11910}{19 \cdot 0.95 \cdot \pi} \right)^{1/3} [m] \quad (8.5)$$

$$R_{int} = 8.573 [m] \quad (8.6)$$

$$R_{int} \approx 8.6 [m] \quad (8.7)$$

Al igual que en el dimensionamiento del estanque de LH<sub>2</sub> el volumen a transportar se considera como el 95% del volumen máximo que contiene cada estanque. Debido a eso se agrega un coeficiente 0.95 en la expresión 8.4.

## 8.2. Selección de materiales para estanques

### 8.2.1. Caso Hidrógeno Líquido

En base a lo mencionado en la sección 8.1, se investiga sobre materiales serían los más adecuados para el estanque, tanto para las barreras primarias, como también para la aislación, que es parte fundamental de este estanque, considerando las temperaturas a las que se encuentra la carga.

Para el material a utilizar en la barrera metálica primaria se toman en cuenta estudios realizados por la NASA, quienes utilizan LH<sub>2</sub> y LO<sub>2</sub> en sus cohetes, razón por la cual poseen

amplio conocimiento en torno a los materiales idóneos para la contención de LH<sub>2</sub> particularmente. Así, observando la figura 8.5, se aprecia una variedad importante de materiales evaluados para la contención de 3 tipos de cargas, Hidrógeno Gaseoso (GH<sub>2</sub>), Hidrógeno Líquido (LH<sub>2</sub>) e Hidrógeno Semi-Líquido (SLH<sub>2</sub>).

Material	Service			Remarks
	GH <sub>2</sub>	LH <sub>2</sub>	SLH <sub>2</sub>	
Aluminum and its alloys	Yes	Yes	Yes	
Austenitic stainless steels with > 7% nickel (such as, 304, 304L, 308, 316, 321, 347)	Yes	Yes	Yes	Some make martensitic conversion if stressed above yield point at low temperature.
Carbon steels	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Copper and its alloys (such as, brass, bronze, and copper-nickel)	Yes	Yes	Yes	
Gray, ductile, or cast iron	No	No	No	Not permitted for hydrogen service.
Low-alloy steels	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Nickel and its alloys (such as, Inconel <sup>®</sup> and Monel <sup>®</sup> )	No	Yes	Yes	Susceptible to hydrogen embrittlement
Nickel steels (such as, 2.25, 3.5, 5, and 9 % Ni)	No	No	No	Ductility lost at LH <sub>2</sub> and SLH <sub>2</sub> temperatures.
Titanium and its alloys	Yes	Yes	Yes	
Asbestos impregnated with Teflon <sup>®</sup>	Yes	Yes	Yes	Avoid use because of carcinogenic hazard.
Chloroprene rubber (Neoprene <sup>®</sup> )	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Dacron <sup>®</sup>	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Fluorocarbon rubber (Viton <sup>®</sup> )	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Mylar <sup>®</sup>	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Nitrile (Buna-N <sup>®</sup> )	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Polyamides (Nylon <sup>®</sup> )	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Polychlorotrifluoroethylene (Kel-F <sup>®</sup> )	Yes	Yes	Yes	
Polytetrafluoroethylene (Teflon <sup>®</sup> )	Yes	Yes	Yes	

Figura 8. 5: Materiales compatibles para servicios involucrados a Hidrógeno [12]

Como se observa en la figura 8.5, el aluminio y sus aleaciones son candidatos perfectos para el almacenamiento de Hidrógeno, tanto de forma líquida como gaseosa, que son las opciones abordadas en este trabajo, además de los aceros austeníticos inoxidables con porcentaje de níquel mayor al 7%. Sumado a lo anterior, es necesario prestar atención al comportamiento de ciertos materiales a temperaturas cercanas al cero absoluto. En la figura 8.4, se observa como varía el coeficiente de contracción térmica en materiales relevantes para la selección.

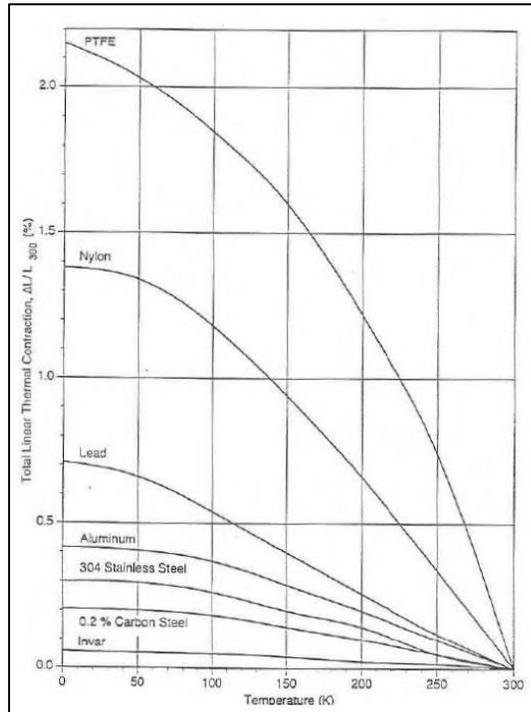


Figura 8. 6: Coeficiente de contracción térmica en función de la temperatura para distintos materiales [12]

Así, se define que los materiales candidatos a ser evaluados para la construcción del estanque de almacenamiento de LH<sub>2</sub> son:

- Aluminio 6061 T6
- Invar
- Acero Inoxidable AISI 316

Las propiedades que son de mayor relevancia para el trabajo se presentan en la tabla 8.1:

Tabla 8. 1: Propiedades materiales candidatos capa estanques de Hidrógeno Líquido [21][22][23]

	Aluminio 6061 T6	Invar	Acero AISI 316
Modulo de elasticidad [Gpa]	68,9	135	193
Esfuerzo Fluencia [Mpa]	276	280	290
Esfuerzo máximo [Mpa]	310	445	580
Coeficiente Expansión Térmico Lineal [1/°C]	23,6 x 10e-6	1,2x10e-6	16,5
Conductividad Térmica [W/mK]	167	12	18,9
Densidad (kg/m3)	2700	8100	8000

Además, tomando en cuenta los requerimientos de carácter térmico, e inflamabilidad que posee el hidrógeno, es que se propone la utilización de poliuretano como material aislante, con una densidad de 50 [kg/m<sup>3</sup>] y una conductividad térmica de 0.0028 [W/mK].

Como se mencionó en la sección 4.1.5, en la descripción de la tecnología utilizan los buques con estanques de membrana, el poliuretano es el material idóneo para cumplir la tarea de aislante térmico, más aún, para el transporte a una temperatura 100 grados menor que el caso del LNG.

### 8.2.2. Caso Amoniaco

Para el almacenamiento de amoniaco la selección de materiales se centra en el primer factor mencionado en la sección 7.2, la corrosión. Es necesario seleccionar un material que sea capaz de soportar esto. Aceros inoxidable son los candidatos ideales, capaces de soportar tiempos prolongados en contacto con agentes corrosivos y a temperaturas que se encuentren en el rango (-50,0) [°C].

En relación con la toxicidad de la carga, se asume que el sistema de contención es totalmente hermético una vez que este ha sido llenado con el fluido. Por lo que fuera de elegir el material adecuado para que resista cargas y temperaturas, no debe existir problemas con respecto a su almacenamiento.

Finalmente, el material a utilizar como capa primaria de contención para el estanque de amoniaco es un acero inoxidable AISI 316, un material altamente calificado y que cumple sin problema los requerimientos indicados anteriormente.

## 8.3. Análisis estructural

Tras definirse las dimensiones características de cada uno de los estanques y los materiales de estos, es necesario establecer el espesor de las capas primarias que serán las encargadas de contener en primera instancia el contenido. Esto será evaluado para los materiales indicados anteriormente, tanto para el caso de LH<sub>2</sub>, como de Amoniaco.

### 8.3.1. Caso Hidrógeno Líquido

Para un estanque tipo B, la integridad estructural del estanque es evaluada solo con relación a la capa primaria que contiene el líquido, ya que la segunda, la cual es solo parcial, tiene como función contener el fluido en caso de una posible fuga de la capa primaria. A continuación, se detalla el proceso para obtener el espesor de la capa primaria que asegura la integridad de esta.

Para un estanque esférico de paredes delgadas, tal que se cumpla  $r/t > 100$ , el esfuerzo interno de este es solo de carácter tangencial, y se obtiene según la expresión 8.3:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r}{2 \cdot t} [MPa] \quad (8.8)$$

Donde:

- P: Presión manométrica sobre el área interna del estanque [MPa]
- r: Radio de la esfera formada por la cara interna de la capa primaria [m]
- t: Espesor de la capa primaria [m]

Si bien el estanque se encuentra a presión atmosférica, es necesario considerar 2 presiones adicionales que fueron ya mencionadas, la presión hidrostática ( $P_h$ ) del fluido transportado y la presión ejercida debido al movimiento e impacto de la carga dentro del estanque. A esta última se le denominará  $P_s$ , por el *sloshing* de la carga.

El diseño se realiza tomando como referencia el punto más bajo del estanque, ya que será este el que esté bajo mayores solicitaciones, es decir, soportando una mayor  $P_h$ .

Se obtiene  $P_h$  en el punto más bajo del estanque mediante la expresión 8.4:

$$P_h = \rho_{LH_2} \cdot g \cdot H [Pa] \quad (8.9)$$

$$P_h = 24978.24 [Pa] \quad (8.10)$$

$$P_h \approx 0.025 [MPa] \quad (8.11)$$

Donde:

- $\rho_{LH_2}$ : Densidad del fluido. 70.8 [kg/m<sup>3</sup>]
- g: Aceleración de gravedad. 9.81 [m/s<sup>2</sup>]
- H: Altura de líquido medido desde el punto a analizar [m]

Si bien el estanque no se encuentra totalmente lleno, para efectos de obtener un diseño más robusto se asume que H es exactamente igual a 2r, por lo tanto, H = 34.36 [m]

Luego, es necesario estimar la presión ejercida por el fluido sobre el estanque debido al movimiento del buque, para esto se calculan las 3 aceleraciones máximas que puede sufrir la carga, tanto de forma vertical ( $a_z$ ), transversal ( $a_y$ ) y longitudinal ( $a_x$ ). Los valores de estas son con respecto a la aceleración de gravedad (g) y son adimensionales. Se obtienen mediante las expresiones 8.5, 8.6, 8.7, 8.8 y 8.9. Estas expresiones son válidas para buques cuya eslora sea superior a 50 [m] y que realicen su viaje a la velocidad de servicio estipulada.

$$a_z = \pm a_0 \sqrt{1 + \left(5.3 - \frac{45}{L_0}\right)^2 \left(\frac{x}{L_0} + 0.05\right)^2 \left(\frac{0.6}{C_B}\right)^{1.5} + \left(\frac{0.6 \cdot y \cdot K^{1.5}}{B}\right)^2} \quad (8.12)$$

$$a_y = \pm a_0 \sqrt{0.6 + 2.5 \left(\frac{x}{L_0} + 0.05\right)^2 + K \left(1 + 0.6 \cdot K \cdot \frac{z}{B}\right)^2} \quad (8.13)$$

$$a_x = \pm a_0 \sqrt{0.06 + A^2 - 0.25 \cdot A} \quad (8.14)$$

$$a_0 = 0.2 \frac{V}{\sqrt{L_0}} + \frac{34 - (600/L_0)}{L_0} \quad (8.15)$$

$$A = \left( 0.7 - \frac{L_0}{1200} + 5 \cdot \frac{z}{L_0} \right) \left( \frac{0.6}{C_B} \right) \quad (8.16)$$

Donde:

- $L_0$ : Largo del buque o eslora.
- $C_B$ : Coeficiente de bloque. Adimensional
- B: Manga del buque.
- x: Distancia longitudinal entre el centro del estanque y el centro de masa del buque [m]
- y: Distancia transversal entre el centro del estanque y el centro de masa del buque cargado [m].
- z: Distancia vertical entre la línea que delimita el nivel de agua y el centro de gravedad del buque ya cargado [m]
- K: Toma el valor 1 en general. Pero para mayor exactitud, se define  $K = 13 \cdot GM/B$ , con GM: Altura Metacéntrica [m]
- V: Velocidad de servicio del buque. V= 16 [nudos]

Como se puede apreciar, la dependencia que tiene el valor de cada una de las aceleraciones con respecto a la geometría del buque es importante. Destacando entre todas ellas la ubicación transversal que tienen los estanques en el buque.

Las primeras variables que quedan totalmente definidas corresponden a la eslora del buque, la cual tiene un valor de 288 [m], mientras que la manga tiene un valor de 48 [m].

El valor que toma x es distinto para cada uno de los 4 estanques. Generalmente el centro de masa de los buques se encuentra transversalmente en el centro de este, por lo tanto, se considerará el valor más alto de x para este cálculo, que sería aproximadamente 3 veces el diámetro de los estanques, es decir,  $x = 3 \cdot 2 \cdot 17.18 [m] \Rightarrow x = 105 [m]$ , sobredimensionando un poco por seguridad.

El coeficiente de bloque es un valor que depende totalmente de la estructura completa del buque y se define como la relación entre el volumen desplazado y el volumen del paralelepípedo cuyos lados son la eslora, la manga y el calado. La figura 8.5 ayuda a entender de mejor forma de la definición entregada. El valor de este se selecciona según la tabla 8.2. Se considera la clasificación de buque que se está dimensionando, que en este caso corresponde a la primera categoría, “Tanker/Bulk”.

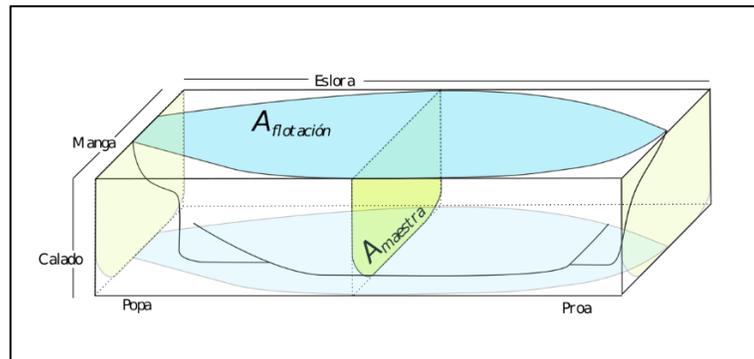


Figura 8. 7: Representación gráfica coeficiente de bloque de un buque (Relación entre volumen celeste y volumen amarillo)

Tabla 8. 2: Rango de valores para CB según tipo de embarcación [15]

Vessel Type	Range of $C_b$
Tanker / Bulk	0.72 to 0.85
Container	0.65 to 0.70
Ro-Ro	0.65 to 0.70
Passenger	0.65 to 0.70
Dry cargo / combi	0.60 to 0.75
Ferry	0.50 to 0.65

Por temas de seguridad el valor utilizado para el coeficiente de bloque es de 0.72, ya que si se observan las figuras 8.8 y 8.9, a menor valor, las aceleraciones correspondientes son mayores, con el resto de las variables constantes, por lo que el diseño se realiza considerando el peor caso posible, obteniéndose un resultado más robusto, es decir, sobredimensionado.

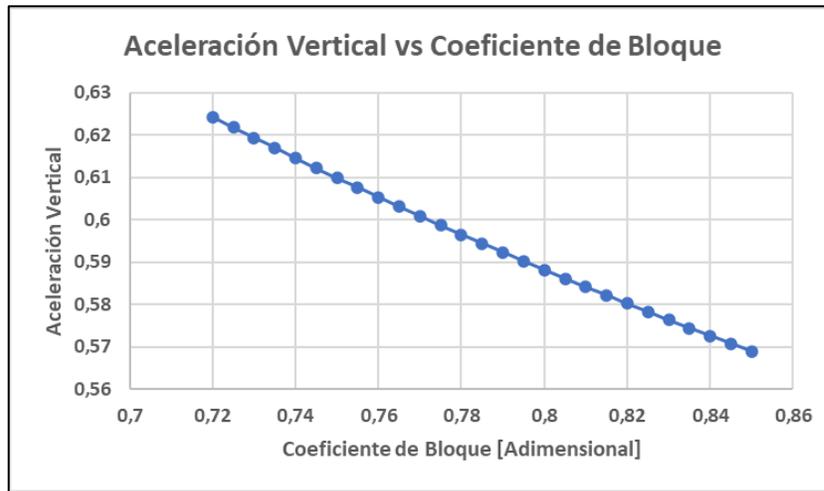


Figura 8. 8: Aceleración vertical  $a_z$  en función del coeficiente de bloque

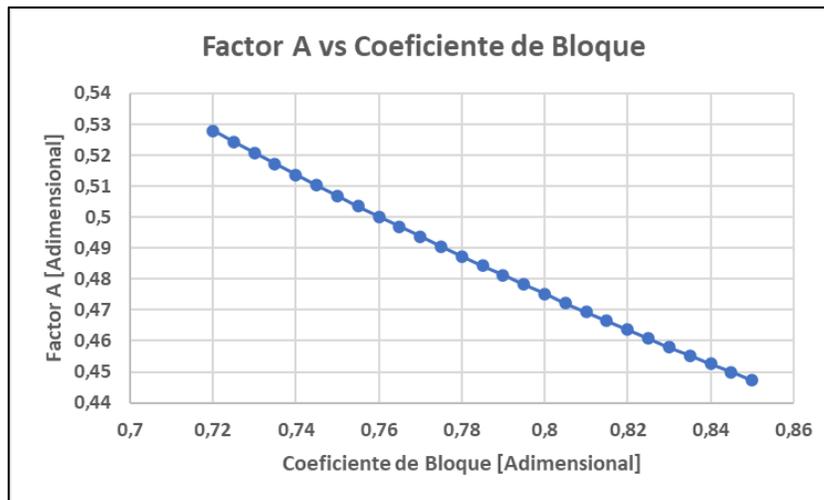


Figura 8. 9: Factor A en función del coeficiente de Bloque

En resumen, el valor de las variables utilizadas para el cálculo de las aceleraciones fueron los que se observan en la tabla 8.3:

Tabla 8. 3: Variables de buque de LH2 para cálculo de componente de aceleración adimensional

$L_0[m]$	$B[m]$	$C_B[-]$	$x[m]$	$y[m]$	$z[m]$	$K$	V [nudos]
288	48	0.72	105	0	6	1	16

En la figura 8.10 se observan los resultados obtenidos para cada una de las aceleraciones adimensionales por las que se verán afectados los estanques.

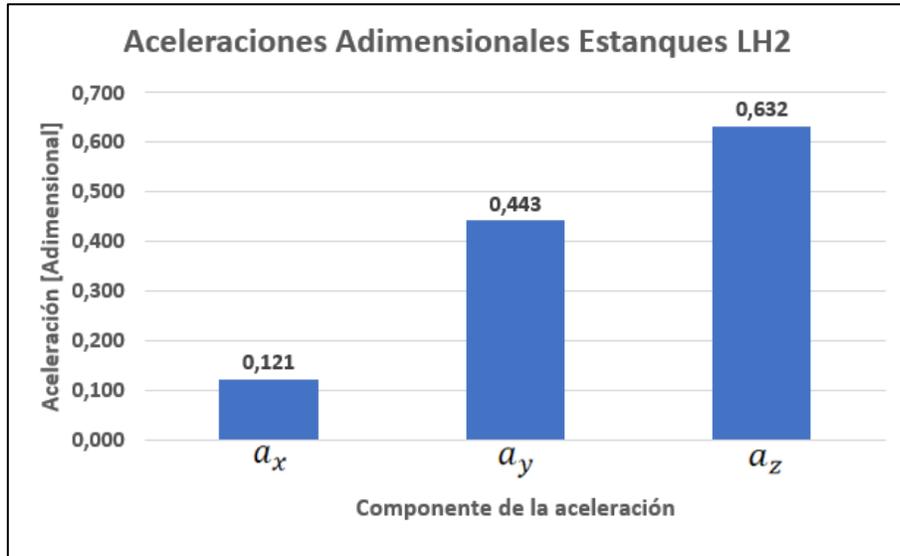


Figura 8. 10: Valores obtenidos para  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$

Se selecciona la mayor de las aceleraciones para asegurar que el tanque no sufrirá daños por esta y ninguna de las otras dos cargas generadas por el resto de las componentes de la aceleración del estanque. Se aplica la expresión 8.17:

$$P_s = \{a_x, a_y, a_z\}_{m\acute{a}x} \cdot \rho_{LH_2} \cdot H [Pa] \quad (8.17)$$

Luego, se define un factor de seguridad como se observa en la expresión 8.18:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_t} [adimensional] \quad (8.18)$$

Donde:

- $\sigma_y$ : Esfuerzo de fluencia del material a evaluar.

Finalmente, el espesor del estanque (t), se obtiene la expresión 8.19, de la misma forma que fue realizado para el caso de hidrógeno líquido.

$$t = \frac{FS \cdot r \cdot (P_h + P_s)}{2 \cdot \sigma_y} \cdot 10^3 [mm] \quad (8.19)$$

Se evalúan valores para el factor de seguridad, desde 1 hasta 6 y los resultados obtenidos se aprecian en las figuras 8.11, 8.12 y 8.13, para el caso del Aluminio 6061 T6, el Invar y el acero AISI 316 respectivamente.

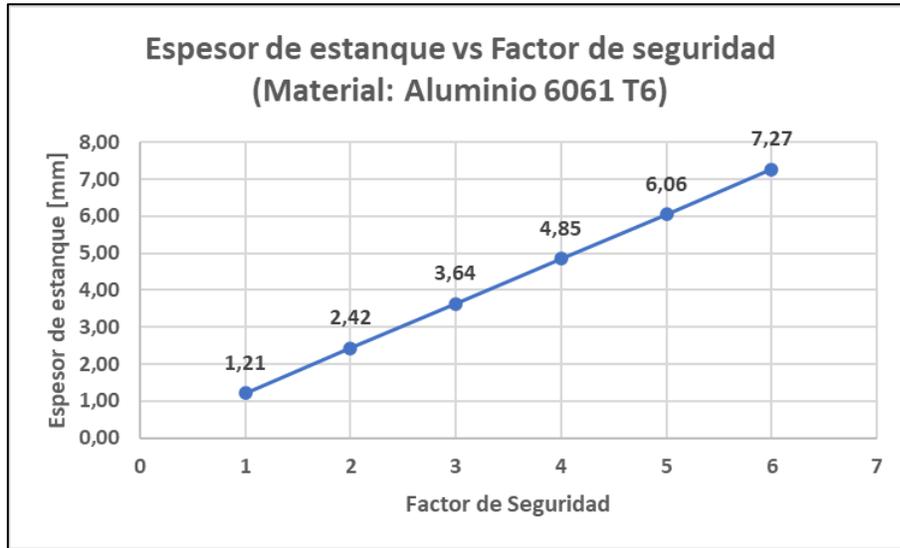


Figura 8. 11: Espesor de capa primaria de estanque LH2 para distintos factores de seguridad (Material: Aluminio 6061 T6)

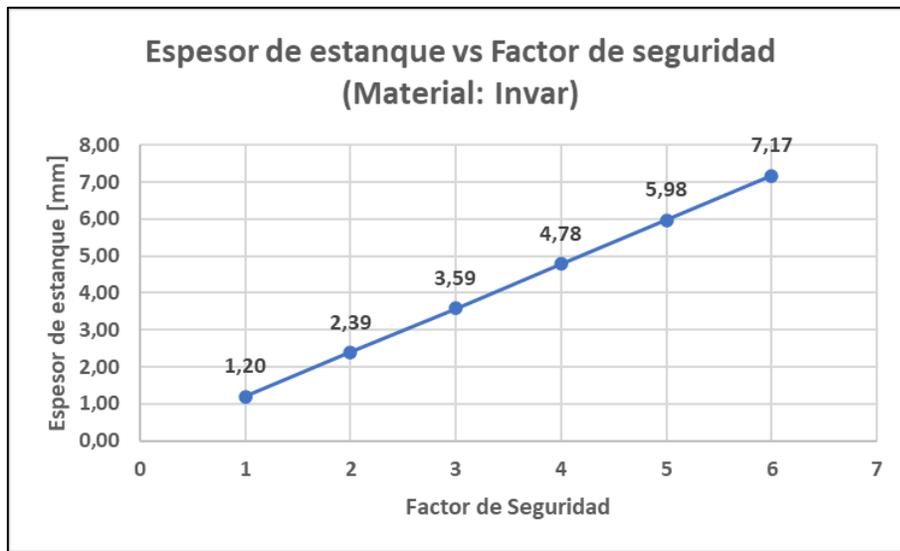


Figura 8. 12: Espesor de capa primaria de estanque LH2 para distintos factores de seguridad (Material: Invar)

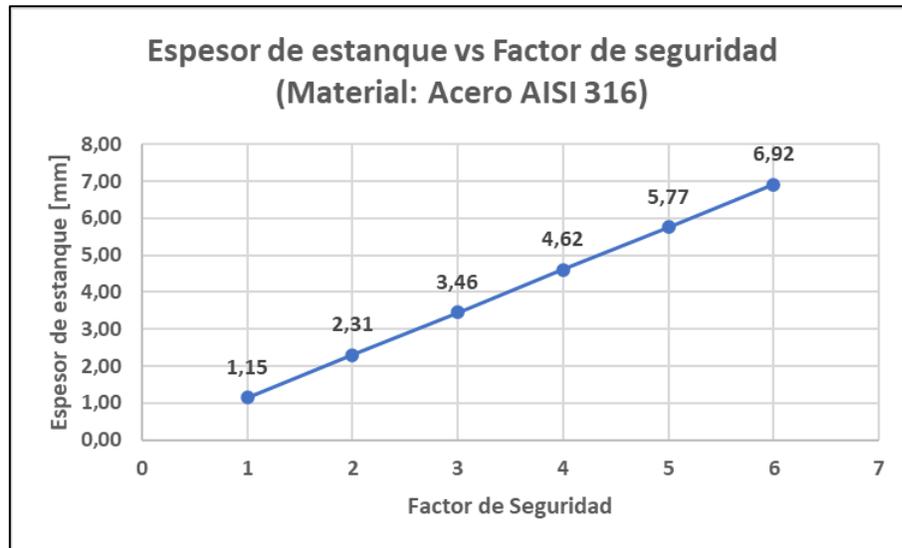


Figura 8. 13: Espesor de capa primaria de estanque LH2 para distintos factores de seguridad (Material: Acero AISI 316)

Por otro lado, en el caso del transporte de  $LH_2$  considerando las bajas temperaturas asociadas a esto, es que se realiza un análisis de los esfuerzos generados por la contracción térmica debido a la baja temperatura que adquiere el material del estanque involucrado. Esto será evaluado para los 3 materiales de la siguiente manera.

Se considerará una contracción térmica del tipo superficial y no volumétrica, ya que la razón entre el radio interno del estanque y los posibles espesores que tendrá este se encuentran en una razón tal que  $t/R \ll 100$ . De esta forma se identifica el coeficiente superficial de contracción térmica como:

$$\beta = 2 \cdot \alpha, \text{ con } \alpha = \text{coeficiente lineal de contracción térmica}$$

Se calcula la superficie del estanque definida por el valor del radio interno inicial, el cual es  $R_0=17.18$  [m]. Así la superficie inicial ( $S_0$ ):

$$S_0 = 4\pi R^2 \tag{8.20}$$

$$S_0 = 4\pi \cdot 17.18^2 \tag{8.21}$$

$$S_0 = 3709 \text{ m}^2 \tag{8.22}$$

Luego, se calcula la superficie final del estanque ( $S_f$ ), debido a la contracción térmica originada por el cambio de temperatura, yendo desde la temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ) hasta la temperatura adquirida por el estanque en contacto con el hidrógeno líquido.

Para efectos de considerar el peor de los casos, se asumirá que esta temperatura promedio será igual a la temperatura a la cual se transporta el  $LH_2$ , es decir,  $20 [K] = -253.15 [^{\circ}C]$ , por lo que la expansión térmica será la máxima posible. Por lo tanto:

$$S_f = S_0 \cdot (1 + \beta \cdot (T_f - T_0)) \quad (8.23)$$

$$S_f = 3709 [m^2] \cdot (1 + 2 \cdot \alpha \left[ \frac{1}{^{\circ}C} \right] \cdot (-253.15 - 25)) [^{\circ}C] \quad (8.24)$$

$$S_f = 3709 - 2063317 \cdot \alpha [m^2] \quad (8.25)$$

Luego, tras la contracción térmica, el nuevo radio interno ( $R_f$ ) se obtiene según la siguiente expresión:

$$R_0 = \left[ \frac{S_f}{4\pi} \right]^{1/2} \quad (8.26)$$

Así, finalmente es posible obtener la deformación ocasionada por el cambio de temperatura y el esfuerzo interno generado en el estanque mediante las siguientes expresiones:

$$\varepsilon = \frac{R_0 - R_f}{R_0} [Adimensional] \quad (8.27)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon [MPa] \quad (8.28)$$

Se realizan los cálculos para cada uno de los materiales candidatos y se obtienen los resultados de la tabla 8.4 y figura 8.14:

Tabla 8. 4: Radio final, Radio final y deformación por bajas temperaturas en estanque de hidrógeno (3 materiales candidatos)

	Aluminio 6061 T6	Invar	Acero AISI 316
Radio Inicial [m]	17,18		
Radio Final [m]	17,07	17,17	17,1
Deformación [Adimensional]	0,0065	0,0003	0,0046

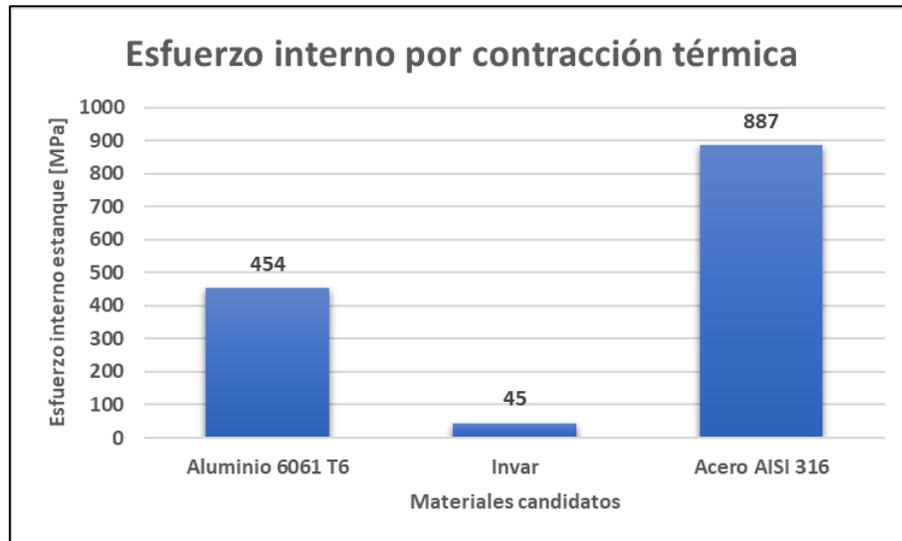


Figura 8. 14: Esfuerzo interno por contracción térmica en estanque de LH<sub>2</sub>

Con los resultados obtenidos de los análisis estructurales corresponde realizar la elección del material adecuado que le otorgue integridad estructural al estanque, en este caso corresponde al Invar. Ya que las otras dos opciones sufren esfuerzos tales que superan tanto sus límites de fluencia como también sus esfuerzos máximos, por lo que fallarían catastróficamente. Así, se procede a seleccionar el espesor adecuado para el estanque.

Tomando en cuenta que se está diseñando un estanque a presión, el factor de seguridad puede tomar un valor entre 3.5 y 6 [10]. Se decide por un valor más conservador según la figura 8.9, de manera de ser consistente con la importancia que implica la seguridad del estanque, por lo tanto, FS = 6, y el espesor del estanque esférico para LH<sub>2</sub> se define como  $t = 7.17 [mm]$ .

### 8.3.2. Caso Amoniaco

El estanque de amoniaco al ser cilíndrico con caras externas esféricas sufre 2 tipos de esfuerzos, uno de carácter radial y otro de carácter tangencial. El radial lo sufre solamente la sección cilíndrica, mientras que el tangencial lo sufre la sección cilíndrica y esférica.

El esfuerzo tangencial queda definido por la expresión 8.13:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r}{2 \cdot t} \quad (8.29)$$

Mientras que el esfuerzo axial se define por la expresión 8.14:

$$\sigma_r = \frac{P \cdot r}{t} \quad (8.30)$$

Al ser mayor el esfuerzo radial, se diseña en base a este esfuerzo que asegura que se cumple la exigencia del estanque tanto en su sección cilíndrica, como en sus secciones esféricas, las cuales sufren esfuerzos menores.

Al igual que el caso del estanque de LH<sub>2</sub>, se consideran los esfuerzos generados por el líquido, en este caso amoniaco, asumiendo que se encuentra el barco estático y también las cargas generadas por el movimiento de la carga al estar en movimiento durante el viaje.

Los puntos que sufren las mayores sollicitaciones con aquellos que se encuentran en la zona más baja del estanque, por lo tanto, será dicha zona la que será considerada para el cálculo del espesor, así, si esta zona se encuentra segura, el resto del estanque también lo estará.

Se sigue la misma lógica utilizada en los cálculos hechos para el estanque esférico de LH<sub>2</sub>.

La presión hidrostática máxima que existe en el estanque de amoniaco se obtiene mediante la expresión 8.31:

$$P'_h = \rho_{NH_3} \cdot g \cdot H' \quad (8.31)$$

$$P'_h = 680 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot 17.2 [m] \quad (8.32)$$

$$P'_h = 114738 [Pa] \quad (8.33)$$

$$P'_h \approx 0.115 [MPa] \quad (8.34)$$

A esta presión se le debe sumar la obtenida debido a la aceleración que sufre el fluido debido al movimiento del buque ( $P'_s$ ). Se realizan los mismos cálculos involucrados en el caso de LH<sub>2</sub>.

Los valores de los parámetros utilizados para el cálculo de las aceleraciones  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$  mediante las expresiones 8.12, 8.13, 8.14, 8.15 y 8.16 quedan definidos según la tabla 8.5:

Tabla 8. 5: Variables de buque de NH<sub>3</sub> para cálculo de componente de aceleración adimensional

$L_0 [m]$	$B [m]$	$C_B [-]$	$x [m]$	$y [m]$	$z [m]$	$K$	$V$ [nudos]
185	36	0.72	20	0	20	1	16

En figura 8.15 se observan los resultados obtenidos para cada una de las aceleraciones adimensionales por las que se verán afectados los estanques.

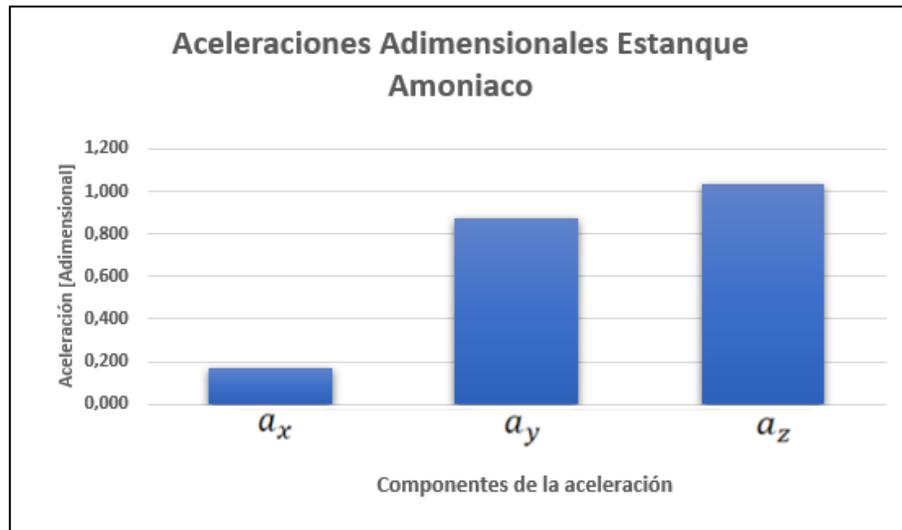


Figura 8. 15: Valores obtenidos para  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$

Luego, el espesor del estanque queda definido por la expresión 8.35:

$$t = \frac{FS \cdot r \cdot (P_h' + P_s')}{\sigma_{Ac}} \cdot 10^3 [mm] \quad (8.35)$$

$$FS = \frac{\sigma_{Ac}}{\sigma_t} [adimensional] \quad (8.36)$$

Se evalúan valores para el factor de seguridad, desde 1 hasta 6 y los resultados obtenidos se aprecian en las figuras 8.16.

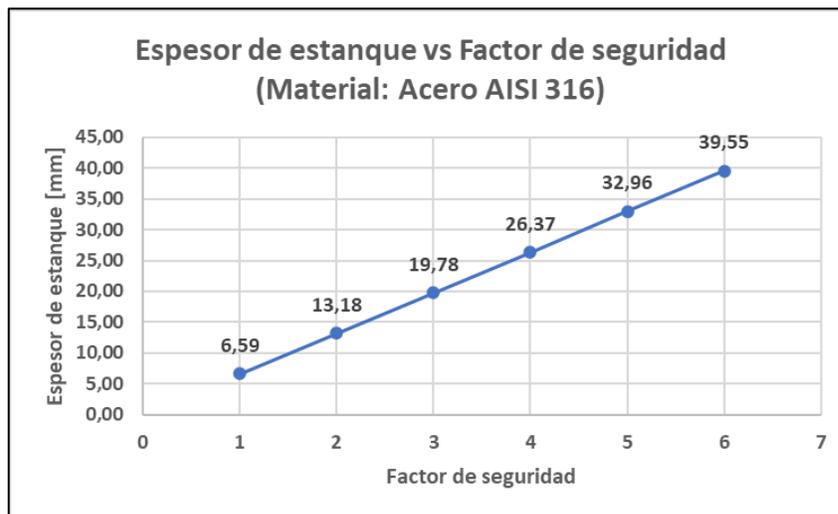


Figura 8. 16: Espesor de capa primaria de estanque Amoniaco para distintos factores de seguridad (Material: Acero AISI 316)

## 8.4. Análisis térmico

### 8.4.1. Caso Hidrógeno Líquido

Se realiza un análisis que considera transferencia de calor mediante los 3 mecanismos, conducción, convección y radiación. El valor del espesor de la primera capa de Invar es conocido desde los análisis estructurales realizados en la sección 8.3.1. El cual corresponde a 7.17 [mm].

La geometría y configuración que se analiza se observa en la figura 8.17, donde se detallan los materiales del sistema de contención de carga definido en la sección 8.1.

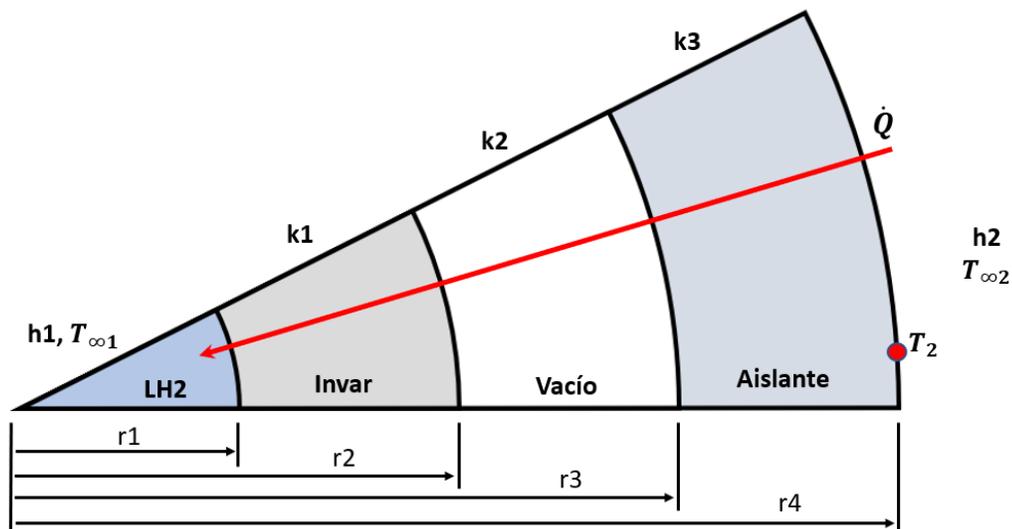


Figura 8. 17: Diagrama capas estanque esférico LH2. Elaboración Propia

Cada uno de los 4 estanques está recubierto por una última barrera, la cual no tiene ningún efecto estructural, solo se encarga de dar aislación de los efectos meteorológicos y otros de tipo externo que se presenten en la ruta. Por lo mismo solo se realiza el análisis de lo que se aprecia en la figura 8.5.

La presencia de una capa de vacío se considera ya que es una opción frente al carácter altamente inflamable del Hidrógeno, por lo que ayuda a generar un ambiente neutro a la carga del estanque, además de evitar el flujo de calor hacia el interior de este.

El objetivo del presente análisis es calcular el flujo de calor que sufre la carga, en este caso el hidrógeno líquido, así es posible calcular el porcentaje de evaporación que se tiene diariamente. Según normativas internacionales el porcentaje de evaporado no debe ser superior a un 0,5% diario.

Este análisis es de carácter estacionario, así es posible obtener cálculos más robustos, que impliquen una obtención de resultados que efectivamente aseguren el aislamiento correcto del

estanque. Así, en base a la geometría esférica de los estanques, el flujo de calor existente se rige por la expresión 8.37.

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} [W] \quad (8.37)$$

$$R_{total} = R_{conv1} + R_{cond1} + R_{cond2} + R_{cond3} + R_{eq} \quad (8.38)$$

$$R_{eq} = \left( \frac{1}{R_{conv2}} + \frac{1}{R_{rad}} \right)^{-1} \quad (8.39)$$

$$R_{conv1} = \frac{1}{4\pi r_1^2 h_1} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.40)$$

$$R_{cond1} = \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k_1} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.41)$$

$$R_{cond2} = \frac{r_3 - r_2}{4\pi r_2 r_3 k_2} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.42)$$

$$R_{cond3} = \frac{r_4 - r_3}{4\pi r_3 r_4 k_3} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.43)$$

$$R_{conv2} = \frac{1}{4\pi r_4^2 h_2} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.44)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} \cdot 4\pi r_4^2} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.45)$$

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^2 + T_{\infty 2}^2) \cdot (T_2 + T_{\infty 2}) \left[ \frac{m^2 K}{W} \right] \quad (8.46)$$

Donde:

- $T_{\infty 1}$ : Temperatura del fluido al interior del estanque [K]
- $T_{\infty 2}$ : Temperatura del fluido en el exterior del estanque [K]
- $T_2$ : Temperatura superficial de la capa más externa del estanque [K]
- $k_1$ : Coeficiente conductividad térmica del Invar [W/mK]
- $k_2$ : Coeficiente conductividad térmica de la capa de vacío [W/mK]
- $k_3$ : Coeficiente conductividad térmica del material aislante [W/mK]
- $h_1$ : Coeficiente convectivo hidrógeno líquido [W/m<sup>2</sup>K]
- $h_2$ : Coeficiente convectivo aire a temperatura  $T_{\infty 2}$  [W/m<sup>2</sup>K]
- $\sigma$ : Constante de Stefan – Boltzmann.  $5.67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

La temperatura  $T_2$  se asume y se corrobora tras obtener el valor de  $\dot{Q}$ . Así, esta es calculada mediante la expresión 8.47:

$$T_2 = T_{\infty 2} - \dot{Q} \cdot R_{eq} \quad (8.47)$$

La ecuación 8.47 se define de esa manera ya que el flujo de calor obtenido  $\dot{Q}$  es igual a lo largo de toda la dirección radial de la geometría esférica analizada.

Como la tasa de Boil Off que se genera diariamente debe ser menor al 0,5% de la carga inicial, es decir, 7140 [kg] por estanque, se realizan iteraciones variando el espesor de la capa de aislante y de la temperatura exterior de la segunda barrera, de tal forma que el error entre  $T_2$  asumido y el calculado sea menor a un 1%, así hasta cumplir el porcentaje de *Boil-Off* mencionado.

Por motivos de seguridad, se asume que la temperatura a la cual se encuentra el aire al exterior del estanque ( $T_{\infty 2}$ ) es constante a lo largo de las 24 horas del día. Durante las horas de noche, esta temperatura es menor y por consiguiente el flujo de calor también sería menor, por lo tanto, existe un sobredimensionamiento de la capa de aislación.

Finalmente, tras una cantidad importante de iteraciones se llega a una configuración de una capa de aislante de 0.9 [m], que asegura que la tasa de generación de *Boil-Off* se cumpla. Resultados de la iteración pueden observarse en el Anexo B.

Además, se aprecia en la figura 8.18 como es la relación que existe entre el porcentaje diario de evaporación del hidrógeno según sea el espesor de la capa de poliuretano que sea utilizada.

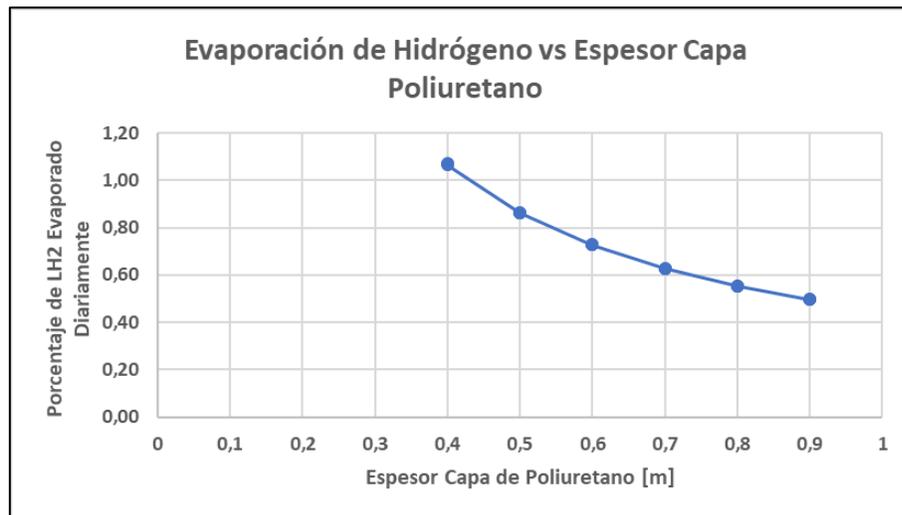


Figura 8. 18: Porcentaje diario de evaporación de Hidrógeno vs Espesor capa de Poliuretano

#### 8.4.2. Caso Amoniaco

El tema de aislación para el amoniaco es mucho menos problemático que el realizado para el LH<sub>2</sub>. Considerando que las temperaturas a las cuales es transportado no presentan un inconveniente para la selección de materiales que sean capaces de almacenar la carga correctamente.

Tomando en cuenta que el calor de vaporización que posee el amoníaco a una presión de 1 [bar] y una temperatura de -33 [°C], el cual es de 1375 [kJ/kg]. La IMO no menciona nada al respecto en torno a porcentaje de *Boil-Off* generado en el transporte de amoníaco. Una de las posibles razones que se desprender de la información recolectada es que, debido a las condiciones termodinámicas, las cuales no resultan ser agresivas para el material seleccionado, no existe un flujo de calor considerable que implique una formación de *Boil-Off* importante.

Así, se procede, en primer lugar, a realizar un análisis térmico en ausencia de una capa aislante, es decir, solamente la capa de acero inoxidable AISI 316, a obtener el flujo de calor y la tasa de *Boil-Off* que se genera en las bajo las condiciones de transporte establecidas. Además de lograr identificar la temperatura superficial a la que se encontraría la cara exterior de la capa de Acero inoxidable.

Los flujos de calor son 3, uno a través de cada una de las caras esféricas, los cuales son considerados de igual magnitud y otro a través del manto cilíndrico del estanque. Se realiza el cálculo de cada uno de los flujos y las tasas de *Boil-Off* obtenidas se suman para obtener el flujo másico de amoníaco gaseoso generado a bordo.

La figura 8.19 muestra una representación gráfica de la configuración a analizar.

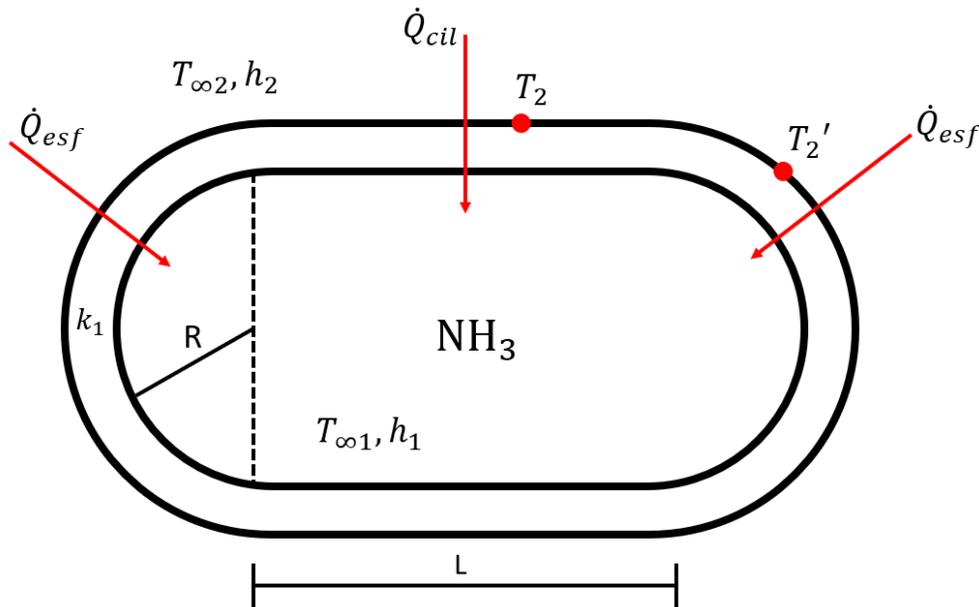


Figura 8. 19: Diagrama análisis térmico n°1  $NH_3$ . Elaboración Propia

El flujo de calor en la sección cilíndrica ( $\dot{Q}_{cil}$ ) se obtiene según la expresión 8.49:

$$\dot{Q}_{cil} = \frac{T_{\infty 2}' - T_{\infty 1}'}{R_{total}'} \quad (8.49)$$

$$\dot{Q}_{cil} = \frac{T_{\infty 2}' - T_{\infty 1}'}{R_{total}'} \quad (8.50)$$

$$R_{conv1}' = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1} \quad (8.51)$$

$$R_{cond}' = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} \quad (8.52)$$

$$R_{eq}' = \left( \frac{1}{R_{conv2}'} + \frac{1}{R_{rad}'} \right)^{-1} \quad (8.53)$$

$$R'_{conv2} = \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} \quad (8.54)$$

$$R'_{conv2} = \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} \quad (8.55)$$

$$h'_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2'^2 + T_{\infty 2}'^2)(T_2' + T_{\infty 2}') \quad (8.56)$$

Para el caso de las caras esféricas, las ecuaciones a utilizar son las mismas que se mostraron para el análisis térmico del estanque de LH<sub>2</sub>. Desde la ecuación 8.XX hasta la 8. XX.

De la misma manera se asume una temperatura de la superficie externa del estanque ( $T_2$ ), la cual es corroborada mediante la ecuación 8.25. La iteración es solamente con respecto a esta temperatura, ya que no existe una tasa de *Boil-Off* objetivo como en el caso del LH<sub>2</sub>. Por lo tanto, se realizan variaciones en la temperatura  $T_2'$  hasta que el error entre la asumida y la calculada sea menor a un 1%.

Luego de las iteraciones se obtienen los siguientes resultados.

- Temperatura superficial de la capa de aislante: 249.15 [K] = -24 [°C]
- Flujo de calor hacía el estanque: 2.45 [MW]
- Tasa de *Boil-Off* generado: 1.79 [kg/s]
- Porcentaje de amoniaco evaporado diariamente: 1.91%

Según los resultados observados anteriormente, se identifica que la temperatura superficial de la capa de acero inoxidable es igual a 249.15 [K] = -24 [°C]. A esta temperatura la humedad presente en el ambiente que rodea a los estanques tenderá a sufrir fusión, por lo que se generaría sobre los estanques una capa de hielo importante.

Para evitar lo mencionado, se realiza un segundo análisis térmico, esta vez enfocado en encontrar un espesor para una capa de aislante, tal que la temperatura sea adecuada para el entorno en que se encuentra el estanque. La aislación corresponde al igual que en el caso de LH<sub>2</sub> a poliuretano. La temperatura objetivo para el exterior de esta corresponde a 10 [°C] = 288.15

[K]. Así se evitaría la formación de hielo en torno al estanque, además de disminuir la tasa de *Boil-Off* generado.

Las expresiones utilizadas para este segundo análisis son exactamente las mismas que para el primero, solamente se agrega una resistencia térmica por conducción, la cual corresponde a la capa de aislante. La resistencia térmica de esta nueva capa queda definida por la expresión 8.57 para la sección cilíndrica y por la expresión 8.58 para la sección esférica:

$$R_{cond2} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.57)$$

$$R_{cond2} = \frac{r_3 - r_2}{4\pi r_2 r_3 k_2} \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (8.58)$$

Donde:

- $r_3$ : Radio externo zona cilíndrica y esférica (R+ espesor capa acero + espesor capa aislante) [m]
- $r_2$ : Radio intermedio zona cilíndrica y esférica (R + espesor capa acero) [m]
- $L$ : Largo sección cilíndrica
- $k_2$ : Coeficiente conductividad térmica del material aislante [W/mK]

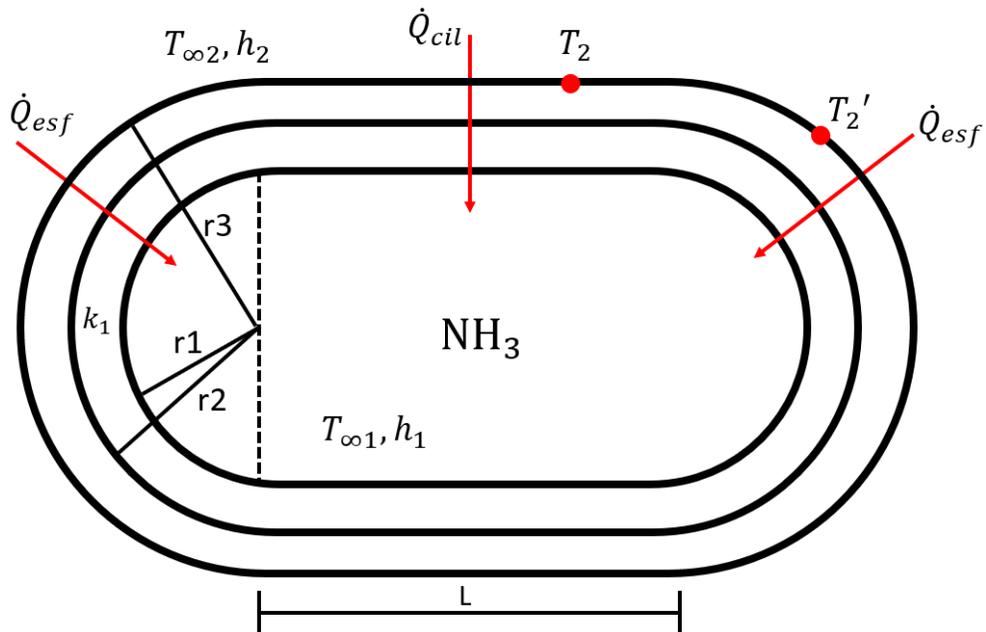


Figura 8. 20: Diagrama análisis térmico n°2  $NH_3$ . Elaboración Propia

En base al análisis realizado se llega a los siguientes resultados:

- Temperatura superficial de la capa de aislante: 283.15 [K] = 10 [°C]
- Flujo de calor hacía el estanque: 1,1 [MW]
- Tasa de *Boil-Off* generado: 0.8 [kg/s]
- Porcentaje de amoniaco evaporado diariamente: 0.86%

## 9. Equipos complementarios principales

Para que el buque funcione de manera correcta, son necesarios equipos complementarios a los estanques de almacenamiento, cada uno con sus características que se adecuan según sea el tipo de producto a transportar. Equipos principales que es posible identificar en este dimensionamiento básico son:

- Bombas centrífugas para la descarga
- Sistema de impulsión para el movimiento del buque

### 9.1. Procesos energéticos a bordo más relevantes

#### 9.1.1. Propulsión

Como se mencionó en los alcances, el buque dimensionado solo utilizaría combustibles convencionales, de origen fósil específicamente. Como referencia se tiene la figura 9.1 que entrega información sobre los tipos de propulsión que utilizan actualmente los buques que conforman la flota encargada de transportar LNG mundialmente. Además de buques que tienen fecha de salida en los próximos años.

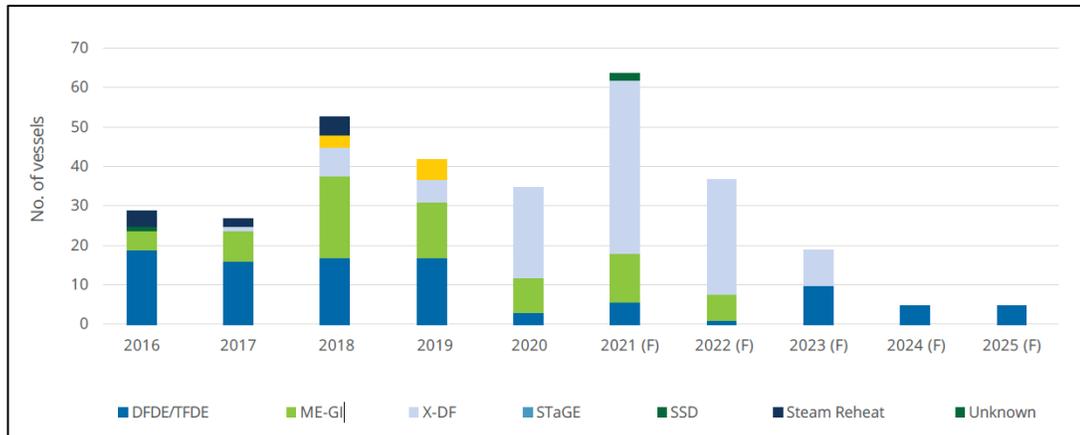


Figura 9. 1: Clasificación de buques de LNG según tipo de propulsión, 2016-2025

En el rango de años que contempla la figura anterior, se aprecia que, en todos los años, a excepción los que fue predominante la pandemia (aspecto interesante a analizar en algún momento), predomina la utilización de sistemas de propulsión Dual Fuel Electric Diesel y Tri Fuel Electric Diesel, DFDE y TFDE por sus siglas en inglés.

Son sistemas que surgieron como alternativa al sistema de impulsión por turbinas de vapor convencionales, teniendo hasta un 30% más de rendimiento. Estos nuevos sistemas surgidos en el año 2066 son capaces de funcionar mediante diésel y el *Boil-Off* generado en los buques de LNG. Este último aspecto no será tomado en cuenta en este caso, ya que está fuera de los alcances del trabajo.

Actualmente el 33% de la flota total de buques de LNG presentan este tipo de propulsión, por lo que es una señal inequívoca de lo madura que está dicha tecnología.

Así, es que se define que ambos buques actualmente diseñados preliminarmente, funcionen mediante un sistema de propulsión del tipo Dual Fuel Electric Diesel.

## 9.1.2. Caso Hidrógeno Líquido

### 9.1.2.1. Carga y Descarga de Hidrógeno

Los procesos de carga y descarga tardan generalmente un aproximado de 2 días, esto para grandes buques que transportan LNG. De esta forma queda definido un tiempo de descarga para el buque de  $LH_2$  igual a 48 [hr].

Inicialmente cada uno de los estanques transporta  $20180 m^3$  de  $LH_2$ , es decir, 1428744 kg. Tras llegar a destino, la carga entregada es menor que la mencionada anteriormente. Para ser exactos, recordemos que el *Boil-Off* generado era de un 0,5% diario, por lo que, tras el viaje de 24 días, la cantidad evaporada por viaje corresponde a un 12% de la carga inicial, es decir, se liberan al ambiente exactamente 171336 kg de Hidrógeno. Finalmente son entregados 1257295 kg de  $LH_2$ , es decir,  $17760 m^3$  por estanque.

Teniendo conocimiento de los volúmenes a descargar, se calcula el caudal que debe ser capaz de mover cada una de las dos bombas centrífugas sumergibles a seleccionar.

Cada una debe desplazar  $8880 m^3$  de  $LH_2$  en un tiempo de 48 horas. Así, se obtiene que el caudal que cada bomba debe ser capaz de mover es de  $185 [m^3/h]$ . La altura mínima que deben ser capaz de levantar dicho fluido corresponde a los prácticamente 40 metros de diámetro que tienen los estanques. Para efectos de tener una sobrestimación de lo necesitado, se asume que la altura a levantar por cada bomba sea de 80 metros, esto para lograr vencer los efectos de pérdidas de carga durante los tramos de descarga del buque.

Actualmente empresas como Cryostar, posee bombas criogénicas, enfocadas en el servicio de  $LH_2$ , con modelos variados capaces de desplazar el caudal indicado y lograr la altura mencionada anteriormente. En el Anexo C es posible apreciar las distintas curvas características

de bombas sumergibles criogénicas que cumplen con los requerimientos mencionados anteriormente.

### 9.1.2.2. Licuefacción de *Boil-Off*

Debido a las condiciones de transporte que posee el  $LH_2$ , la opción de tener tecnología a bordo para la licuefacción del *Boil-Off* generado se descarta. Los costos de una planta de licuefacción en los lugares como los puertos de origen ya poseen costos importantes [13], por lo que tener una a bordo es algo que no se considera en este momento. Por lo tanto, en primera instancia el *Boil – Off* generado será liberado, lo cual no implica ningún daño al medio ambiente.

### 9.1.3. Caso Amoniaco

#### 9.1.3.1. Carga y Descarga de Amoniaco

Al igual que en el caso del  $LH_2$ , la carga y descarga de amoniaco se considera que será realizada en un tiempo estimado de 48 horas.

Cada estanque almacena una cantidad igual a  $11910 m^3$ , volumen con respecto al cual no existe ningún tipo de pérdida a lo largo del trayecto, ya que es posible licuefacción el *Boil-Off* generado.

Así, la bomba centrífuga sumergible necesaria para el correcto funcionamiento debe cumplir dos condiciones, (1) que sea capaz de desplazar un caudal igual a  $124 [m^3/h]$ , considerando que cada estanque tendrá dos bombas funcionando simultáneamente al igual que el buque de hidrógeno, y (2) que la altura a levantar sea de aproximadamente 50 metros, siendo capaz de vencer los 17 [m] de altura del estanque y las pérdidas de carga a través de la red de descarga hasta los estanques en destino.

#### 9.1.3.2. Licuefacción de *Boil-Off*

En base a las condiciones de transporte que tiene el amoniaco, el *Boil-Off* generado, presenta un estado termodinámico menos agresivo, como lo es una temperatura de aproximadamente  $-33 [^{\circ}C]$  y presión atmosférica. Es por esto por lo que se decide tener a bordo una estación de licuefacción, para que no existan pérdidas de la carga transportada.

La licuefacción se realizará mediante un intercambiador de calor, el cual utilizará como fluido “frio” nitrógeno líquido, para así condensar el *Boil-Off* de amoniaco generado por el calor absorbido durante el trayecto.

Se asume que solo existió cambio de fase del amoníaco, por lo que el *Boil-Off* generado se encuentra a una temperatura de  $-33$  [°C] y a una presión de  $1$  [bar]. Lo anterior implica que no hubo absorción de calor sensible.

El calor latente de vaporización del amoníaco a  $1$  [bar] tiene el valor de  $1371$  [kJ/kg].

Para calcular el flujo de calor necesario para licuar el *Boil- Off* generado, es necesario tener la tasa de generación de *Boil-Off*, es decir, el flujo másico de este. La tasa de *Boil-Off* generada se obtiene en el segundo análisis térmico para el estanque de amoníaco. Luego al multiplicar dicha tasa, por el calor latente de vaporización se obtiene el flujo de calor que se está buscando. Así, mediante la expresión 9.1:

$$\dot{Q}_{NH_3} = \dot{m}_{BO(NH_3)} \cdot h_{fg(NH_3)} [W] \quad (9.1)$$

$$\dot{Q}_{NH_3} = 0.8 \left[ \frac{k}{s} \right] \cdot 1371 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (9.2)$$

$$\dot{Q}_{NH_3} = 1097.78 [KW] \quad (9.3)$$

$$\dot{Q}_{NH_3} = 1.1 [MW] \quad (9.4)$$

## 10. Costos estimados de cada alternativa

En base a los estanques y equipos dimensionados, los cuales de manera conceptual aseguran el funcionamiento de cada uno de los buques, es necesario tener un estimado de los costos que cada una de las alternativas implica, además de considerar los aspectos energéticos que estas abarcan. Estos serán estimados al estado actual de las tecnologías involucradas.

La comparación considera 3 tipos de costos por alternativa.

- Costos de capital
- Costos de operación
- Costos debido al Boil-Off generado

Los costos de capital se refieren a la inversión inicial realizada para la materialización del buque mismo, abarcando principalmente lo que son materiales, equipos complementarios y mano de obra especializada en su construcción.

Los costos de operación consideran el combustible utilizado, labores de mantenimiento a bordo, cargos en destino y gastos de los tripulantes.

A fines del 2021, el costo del combustible utilizado por buques a lo largo del mundo tenía un valor aproximado de 0.54 \$/kg. [19]. Este valor será utilizado para estimar el gasto por consumo de combustible que hay para ambos buques. Lo cual, a pesar de que ambos tengan que hacer el mismo recorrido, las dimensiones de los buques y el peso que tienen son totalmente distintos, y puede influir en el consumo.

Finalmente se consideran los costos por *Boil-Off* que signifiquen una pérdida. En este caso, solamente el Hidrógeno presenta este hecho.

Hay que considerar que las estimaciones realizadas para el nivel en que se encuentra el siguiente análisis poseen un grado de incertidumbre del orden de un  $\pm 30\%$ . Siendo mejorables en futuros proyectos que consideren aspectos relacionados al presente trabajo.

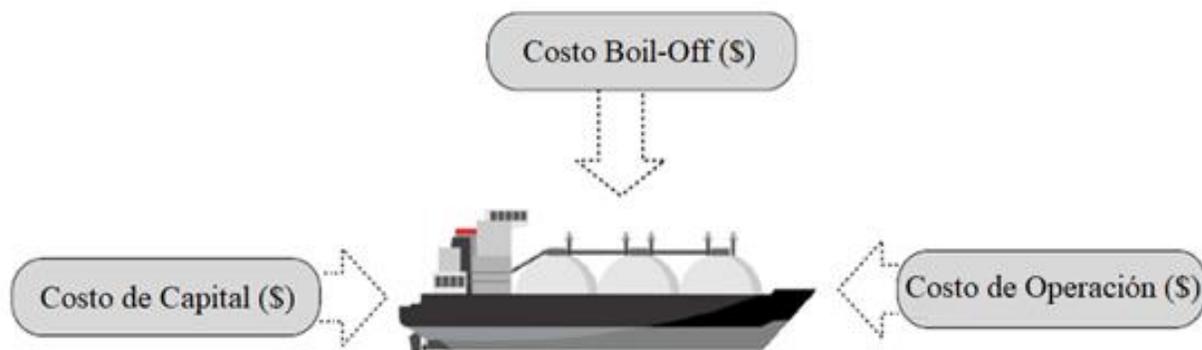


Figura 10. 1: Esquema de estructura de costos involucrados

## 10.1. Caso Hidrógeno Líquido

Según un estudio realizado en el año 2020, se obtuvieron estimaciones en torno a los costos mencionados en la sección anterior [18], en particular, a los costos de capital, los cuales serán estimados en base a los metros cúbicos transportados por el buque.

Para el caso del hidrógeno, el costo de capital para la construcción de un buque que transporte hidrógeno es de aproximadamente  $1355 \text{ \$/m}^3$  [18]. Dicho costo fue estimado al año 2020, por lo que, realizando un ajuste al 2020, el valor pasa a transformarse en  $1530 \text{ \$/m}^3$ . Este valor hace referencia al casco, equipos y manufactura del buque. Además, se le incluirá el costo de materiales en torno a lo que son los estanques de almacenamiento, que generalmente son manufacturados aparte.

Multiplicando los  $1530 \text{ \$/m}^3$  por el volumen transportado, que es exactamente  $80710 \text{ [m}^3]$ , da un total aproximado de 123.5 MM.

Mediante cálculo básico, se obtiene que la cantidad utilizada de Invar en los estanques, que recordemos tienen un radio interno de  $17.18 \text{ [m]}$  y un espesor de  $7.17 \text{ [mm]}$ , es igual a  $26.6 \text{ [m}^3]$ , por lo que sería un total de  $106.4 \text{ [m}^3]$ .

La densidad del Invar es de  $8100 \text{ [kg/m}^3]$ , lo cual implica que el peso total utilizado es de  $861840 \text{ [kg]}$ .

Por otro lado, el costo del Invar es de aproximadamente  $29 \text{ \$/kg}$ , lo cual implica un total aproximado de 25 MM, solamente en materiales. Tomando en cuenta que esto requiere mano de obra especializada se considera un 50% más en el costo indicado, llegando a un total de 37.5 MM.

Esto, sumado a los 123.5 MM, implica un total de 161 MM, solamente en la construcción del buque, lo cual implica la inclusión de los estanques,

El consumo de combustible de los buques está en estrecha relación con el peso total del buque, considerando que se encuentran ya cargados y teniendo como referencia además las dimensiones del buque, que serían:

- Manga:  $288 \text{ [m]}$
- Eslora:  $48 \text{ [m]}$
- Puntal:  $30 \text{ [m]}$

Un concepto denominado “*Gross Tonnage*”, traducido directamente al español como tonelaje bruto, hace referencia al volumen aproximado que abarca el casco del buque. Su cálculo se obtiene según la expresión 10.1.

$$GT = K_1 \cdot V \quad (10.1)$$

$$V = Manga \cdot Eslora \cdot Puntal \quad (10.2)$$

$$K_1 = 0.2 \cdot 0.02 \log_{10} V \quad (10.3)$$

Donde:

- GT: *Gross Tonnage*. [Adimensional]
- V: Volumen máximo que encierra el casco del buque [m<sup>3</sup>]
- K<sub>1</sub>: Constante que depende del valor de V. [Adimensional]

Teniendo el valor de GT, es posible estimar el consumo de combustible del buque según la expresión 10.4.

$$CC = 0.2283 \cdot GT^{0.5589} \quad (10.4)$$

Donde:

- CC: Consumo de combustible [kg/km]
- GT: *Gross Tonnage* [Adimensional]

Con la cantidad de combustible consumido por kilómetro, se multiplica por el recorrido realizado por el buque, que es de 17000 [km] y luego se multiplica por 2, ya que se considera el viaje de ida y vuelta para el cálculo.

Según el estudio indicado al inicio de esta sección, los costos de operación, sin considerar el costo por combustible, son del orden de 19 MM. Dichos costos incluyen labores de mantenimiento a bordo del buque, cargos en puerto de destino, seguros de carga y misceláneos.

Finalmente, el costo más relevante, junto a los costos de capital iniciales, corresponde al *Boil-Off* generado durante el recorrido, el cual es liberado al ambiente. Recordando los resultados obtenidos en los análisis térmicos realizados, se obtuvo que, durante el viaje, un 12% de la carga total de hidrógeno es liberada al ambiente en forma de *Boil-Off*, debido a que no se considera ningún uso a bordo. Este 12%, implica que se pierden aproximadamente 685714 [kg] por viaje.

Si se considera un costo aproximado de 2.5 \$/kg, se obtiene un costo por pérdida del *Boil-Off* generado de 1.7MM por viaje. Lo que anualmente implicaría un costo de 12 MM, ya que se realizan 7 viajes.

## 10.2. Caso Amoniaco

Para el caso del amoniaco las estimaciones se realizan de la misma forma que para el caso del hidrógeno líquido. El estudio realizado en 2020 también presenta datos en torno a la estimación de costos de capital para lo que sería un buque que transporte amoniaco. El costo en este caso es de 1016 \$/m<sup>3</sup>, que, si es actualizado al año actual, correspondería a 1147 \$/m<sup>3</sup>.

Este costo, tomando en cuenta que el transporte de amoniaco está algo más establecido, no se le agregará ningún otro costo, como fue en el caso del hidrógeno que se le fue agregado el costo por materiales y mano de obra de la construcción de los estanques.

Así, se define el costo de capital del buque de amoniaco multiplicando los 1147 \$/m<sup>3</sup>, por el volumen transportado, que es exactamente 47640 [m<sup>3</sup>]. Resultando un costo de capital aproximado de 55 MM.

El cálculo de consumo de combustible queda definido por las dimensiones del buque, son las siguientes:

- Manga: 185 [m]
- Eslora: 36 [m]
- Puntal: 30 [m]

Y se aplican las expresiones 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4, para obtener la razón de kg de combustible por kilómetro recorrido. Luego se multiplica por los 17000 [km] de recorrido y finalmente por 2, ya que el viaje es ida y vuelta.

Por otro lado, según estudio indicado al inicio de esta sección, los costos de operación, sin considerar el costo por combustible, son del orden de 19 MM. Dichos costos incluyen labores de mantenimiento a bordo del buque, cargos en puerto de destino, seguros de carga y misceláneos, al igual que en el caso del hidrógeno. A esto se le suman los costos por combustible.

Finalmente, el costo de *Boil-Off* generado es asumido nulo para efectos de esta comparación, tomando en cuenta que a bordo se asume el uso de una estación de licuefacción mediante nitrógeno líquido, tal cual fue mencionado en la sección 9. Esto genera un punto más que relevante en torno a la estructura de costos analizada en este trabajo.

El resumen de los costos de ambas opciones se observa en la figura 10.2.

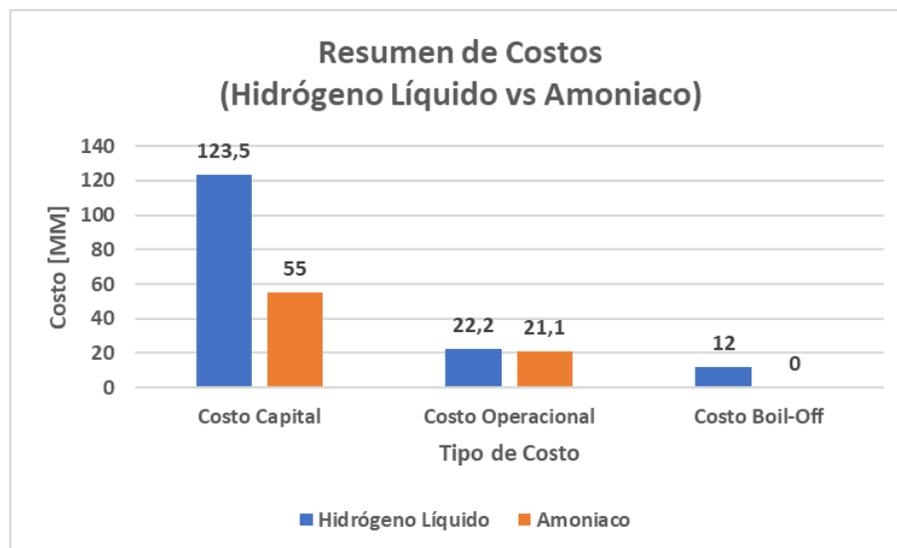


Figura 10. 2: Resumen de costos (Hidrógeno Líquido vs Amoniaco)

# 11. Discusión y análisis

Toda la información de referencia, que tiene su base principal en torno al transporte actual de Gas Natural Licuado fue fundamental para guiar los análisis y lograr resultados coherentes. Tomando en cuenta que tienen su fundamento en normas internacionales, toda decisión tomada en torno a esto estuvo bien fundada.

Un aspecto interesante es la diferencia considerable entre los espesores de los estanques de Hidrógeno y Amoníaco. Existen 2 aspectos fundamentales que inciden en estas diferencias:

- La diferencia entre las densidades de ambos fluidos (El amoníaco posee una densidad prácticamente 10 veces mayor que el Hidrógeno Líquido a la temperatura y presión abordada en este trabajo)
- Las dimensiones de los estanques y el buque. (Manga y eslora)

Ambos aspectos mencionados inciden en las cargas que sufren los estanques, siendo mayores en el caso del amoníaco. Además de otras dimensiones particulares de cada buque, como lo es la ubicación de los estanques, el calado del buque o el mismo centro de gravedad que finalmente este tendría.

Los diseños realizados fueron realizados con aproximación de algunos datos en base a la flota actual de buques de LNG o también por valores recomendados por la IMO, el sobredimensionar algunas cargas o dimensiones, al mismo tiempo que se definieron factores de seguridad lo suficientemente altos y referenciados para que el diseño preliminar, fueron relevantes para obtener resultados que tuviera sentido.

Cabe mencionar la diferencia considerable de los materiales analizados para el caso de almacenamiento de hidrógeno líquido, donde el único material idóneo resulto ser el Invar, y netamente por su resistencia a bajar temperaturas. Ya que si se hubieran considerado solo las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas del contenido cualquiera de los 3 materiales podría haber cumplido con los requerimientos establecidos antes del inicio del diseño. En torno a esto es posible analizar los espesores que poseen los buques actuales de LNG, que poseen una capa de solo 1 milímetro de Invar, si bien la carga está a una temperatura mayor de  $-164^{\circ}\text{C}$ , probablemente los factores de seguridad utilizados son algo más bajos, debido a la madurez de la tecnología utilizada.

Los análisis térmicos entregan resultados razonables. En el caso del hidrógeno, una capa de aislante de 900 [mm] cobra sentido al comparar esto con la tecnología utilizada actualmente en el transporte de LNG, donde si bien la temperatura a la que se transporta es 100 grados mayor, la capa de aislante de igual forma llega casi a los 500 [mm]. Además, hay que considerar que, para efectos de realizar un diseño robusto, mejorable a futuro, se ha sobredimensionado la temperatura exterior a la cual los estanques se encuentran expuestos. Es decir, si se hiciera un análisis más en detalle, es muy probable que esos 900 [mm] de capa aislante disminuya.

Para el caso del amoniaco, los resultados del análisis térmico son razonables desde otro punto de vista, ya que cobra sentido el no utilizar una capa excesivamente gruesa para aislar una carga de  $-33$  [°C], que, si bien puede implicar problemas como se analizó de formación de hielo sobre el estanque, por el lado estructural el material utilizado, que en este caso es un acero inoxidable AISI 316, entrega la integridad necesaria cumplir el almacenamiento correctamente.

Por otro lado, las estructuras de costos obtenidas muestran algo que era relativamente previsible, y es que la opción de transporte marítimo de hidrógeno tiene un mayor costo que la opción de transporte de amoniaco, principalmente en 2 de los 3 costos calculados, que son los de capital y la formación de *Boil- Off*. Los costos operaciones varían mucho menos en comparación a los otros dos casos, la diferencia solo se debe a la envergadura de cada buque y como esto se refleja en el combustible utilizado para cumplir la ruta.

Además, si bien ambas opciones transportan la misma cantidad de hidrógeno, los volúmenes a transportar son considerablemente distintos, razón por la cual los costos involucrados en los materiales y mano de obra varían considerablemente entre una opción y otra.

Además, el hecho que los costos de capital sean prácticamente el doble y hasta un poco más, es una señal para comprender que se está tratando con tecnologías que aún no llegan a su madurez total. Esto implica que las economías de escala aún no se instauran en torno al transporte de Hidrógeno y menos aún en torno al transporte marítimo, solo hay que recordar que existe 1 buque en todo el mundo y que no transporta más de  $1500$   $m^3$ . Este trabajo intentó entregar una proyección a lo que sería un buque de exportación para cantidades mucho mayores, en este caso de hasta  $80000$  [ $m^3$ ]

## 12. Conclusiones

El presente trabajo tenía como objetivo principal analizar y comparar la viabilidad tanto tecnológica como económica de 3 opciones de transporte marítimo de hidrógeno verde hacia mercados relevantes a nivel mundial. Este se considera logrado, ya que se cumplieron los objetivos específicos que fueron planteados inicialmente, los cuales consistían en (1) realizar una recopilación de información referencial en torno al Hidrógeno, Amoniaco y el transporte de LNG, (2) determinar una escala de transporte a un potencial mercado mundial, (3) diseñar estanques de manera preliminar, seleccionando materiales adecuados que resolvieran las problemáticas inherentes de los fluidos a transportar, (4) evaluar tanto estructural como térmicamente los estanques siguiendo recomendaciones internacionales, (5) dimensionar preliminarmente equipos complementarios principales para el buque y (6) comparar los costos involucrados en el transporte marítimo según las alternativas finalmente consideradas.

Se desprende el hecho que, de las 3 opciones inicialmente consideradas, solamente 2 de ellas son viables tecnológicamente hablando, ya que las presiones que actualmente han sido alcanzadas para el almacenamiento de Hidrógeno gaseoso no son aptas para una distribución a gran escala, ya que los volúmenes y aplicaciones hacia las cuales están dirigidos los trabajos actualmente realizados, apuntan hacia la electromovilidad. Además, normativas internacionales no consideran distribución de hidrógeno mediante esta opción. Muy probablemente la razón se condice con lo mencionado anteriormente.

Se logran identificar, evaluar y diseñar preliminarmente estanques de almacenamiento marítimo tanto para hidrógeno líquido como para amoniaco, identificando las problemáticas únicas que posee cada uno de los fluidos nombrados, siendo posible ajustarse a estándares internacionales para el transporte marítimo de estos, logrando analizar estructural y térmicamente los estanques diseñados, los cuales representan a cierto modo el corazón de los buques.

La estructura de costos obtenida, a pesar de no existir información totalmente detallada en torno al manejo de hidrógeno, y menos del transporte mediante la vía marítima, entrega información útil que es posible analizar, dando a entender el punto en que se encuentra la tecnología en torno a este nuevo rol que debe tomar el hidrógeno. Y como el contexto mundial pide que las economías de escala se instauren prontamente.

Algunos puntos que no fueron considerados en el presente trabajo sería relevante considerarlos en futuros trabajos, tales como un análisis de sensibilidad en torno a la cantidad de buques que conformen la flota, el recorrido que tome el buque, optimizando el uso de combustible o el uso del buque para importación de mercancías relevantes para el país, asumiendo que ya haya descargado su contenido de hidrógeno.

Algo sumamente necesario es buscar la manera de aprovechar de manera efectiva el *Boil-Off* generado durante el transporte de Hidrógeno Líquido, en particular sería más que útil utilizarlo en la impulsión del buque, mediante combustión controlada para alimentar una turbina

o mediante la utilización de celdas de Hidrógeno. Sería un punto más que relevante indagar sobre esto en proyectos de esta magnitud y que sean aplicados en el corto o mediano plazo. Por otro lado, identificar posibles rutas en que sea viable utilizar el buque ya descargado de Hidrógeno, para importar mercancías desde países que se encuentren en ruta, aprovechando el regreso a Chile.

Por otro lado, es sumamente importante abarcar un proyecto completo de exportación de Hidrógeno verde, comenzando por la construcción y/o adecuación de puerto para la carga de Hidrógeno, siguiendo con el diseño mucho más detallado de lo que serían los buques encargados de transportarlo desde nuestro país a mercados relevantes a nivel mundial, integrando finalmente los gastos y/o ganancias que implicaría el uso de este vector energético en su destino.

Es necesario que aquellos países que tienen la opción de invertir en proyectos de esta índole y envergadura lo hagan, eso significará un avance tremendo en disminuir las emisiones a nivel mundial y dará pie a que las economías de escala en torno a este tipo de tecnologías se instauren de forma definitiva.

# Bibliografía

- [1] Dr. Uwe Albrecht, Dr. Ulrich Bünger, Dr. Jan Michalski, Tetyana Raksha, Reinhold Wurster, Jan Zerhusen, «*International Hydrogen Strategies*», World Energy Council, (2020)
- [2] IMO, «*Introduction to IMO*» [En línea], Available: <https://www.imo.org/es/About/Pages/Default.aspx>
- [3] C. Fdez-Bolaños, «*Energética del Hidrógeno, contexto, estado actual y perspectivas del futuro*» Trabajo Fin de Grado Ingeniería de la Energía, Depto. de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, (2005).
- [4] Chem.4.us, «Liquid Ammonia: A green fuel for the transport sector? » [En línea], <http://www.chem4us.be/liquid-ammonia-a-green-fuel-for-the-transport-sector/>
- [5] Charles Haskell, «Decarbonising shipping-could ammonia be the fuel of the future? » [En línea], <https://www.lr.org/en/insights/articles/decarbonising-shipping-ammonia/>
- [6] R. Lang, Shanwen T., «*Ammonia as a suitable fuel for fuel cells*» [En línea], Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2014.00035/full>
- [7] E. Tzimas, C. Filiou, S.D. Peteves and J.B. Veyret, «Hydrogen Storage: State-of-Art and Future Perspective» The Netherlands, (2003).
- [8] IMO, «AMENDMENTS TO THE INTERNATIONAL CODE FOR THE CONSTRUCTION AND EQUIPMENT OF SHIPS CARRYING LIQUEFIED GASES IN BULK (IGC CODE) », (2014)
- [9] IMO, «INTERIM RECOMMENDATIONS FOR CARRIAGE OF LIQUEFIED HYDROGEN IN BULK», (2016)
- [10] Engineering ToolBox, (2010). *Factors of Safety*. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d\\_1624.html](https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html) Ingreso [25/03/2022]
- [11] International Gas Union, «World LNG Report», (2021).
- [12] NASA, «Safety Standar For Hydrogen and Hydrogen Systems», (2005)
- [13] R. Cancino., «PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO VERDE PARA APLICACIONES ENERGÉTICAS EN CHILE», (2021).
- [14] Yunus A. Cengel, «*Transferencia de Calor y Masa*», (2007)

- [15] Dhara Shah, «Comparative Study of Berthing Mechanism and Optimum Fender System for RCC Pile Supported Wharf as Per Indian Standard IS4651 Part-3:1974 and British Standard BS6349 Part-4:1994», (2016).
- [16] Z. Yanxing, G. Maoqiong, Z. Yuan, D. Xueqiang, S. Jun., «Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen», *Internation Journal of Hydrogen*, (2019).
- [17] F. Calise, M. Dentice D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, D. Ferrero, “*Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*”. Agosto (2019).
- [18] Al-Breiki, M. Bicer, Y., “*Comparative cost assessment of sustainable energy carriers produced from natural gas accounting for boil-off gas and social cost of carbon*”. Julio (2020).
- [19] Innovación y Emprendimiento, “*Los 6 proyectos que marcarán el despegue del hidrógeno verde en Chile*”. <https://marcachile.cl/innovacion-emprendimiento/los-6-proyectos-que-marcaran-el-despegue-del-hidrogeno-verde-en-chile/> Enero (2022).
- [20] TCI-Gecomp, “*Revolucionando la economía del Hidrógeno Verde y la Economía Circular, HOASIS*”. <https://www.tci-gecomp.com/project/hoasis/> Mayo (2022).
- [21] Gabrian Team, “Aluminio 6061: Conozca sus Propiedad y Usos”. <https://www.gabrian.com/es/aluminio-6061-conozca-sus-propiedades-y-usos/> Mayo (2022).
- [22] “*Invar-Tabla de materiales-Aplicaciones-Precio*”. <https://material-properties.org/es/invar-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/> Mayo (2022).
- [23] Matmatch, “*AISI 316 Stainless Steel: Specification and Datasheet*”. <https://matmatch.com/learn/material/aisi-316-stainless-steel>. Mayo (2022).

# Anexos

## Anexo A

Resultados análisis térmico para obtener espesor capa aislante estanque LH<sub>2</sub>

Espesor Capa Aislante [m]	T <sub>2</sub> asumida [K]	$\dot{Q}$ [W]	T <sub>2</sub> calculada[K]	% error T <sub>2</sub>	% LH <sub>2</sub> evaporado diariamente
0,4	300	79099	308,13	2,71	1,07
0,4	302	79100	308,14	2,03	1,07
0,4	304	79100	308,14	1,36	1,07
0,4	306	79100	308,14	0,70	1,07
0,4	308	79100	308,14	0,05	1,07
0,5	300	64112	308,14	2,71	0,86
0,5	302	64112	308,14	2,03	0,86
0,5	304	64112	308,14	1,36	0,86
0,5	306	64112	308,14	0,70	0,86
0,5	308	64112	308,14	0,05	0,86
0,6	300	53996	308,14	2,71	0,73
0,6	302	53996	308,14	2,03	0,73
0,6	304	53996	308,14	1,36	0,73
0,6	306	53996	308,14	0,70	0,73
0,6	308	53996	308,14	0,05	0,73
0,7	300	46708	308,14	2,71	0,63
0,7	302	46708	308,14	2,03	0,63
0,7	304	46708	308,14	1,36	0,63
0,7	306	46708	308,14	0,70	0,63
0,7	308	46708	308,14	0,05	0,63
0,8	300	41208	308,14	2,71	0,56
0,8	302	41209	308,14	2,03	0,56
0,8	304	41209	308,14	1,36	0,56
0,8	306	41209	308,14	0,70	0,56
0,8	308	41209	308,15	0,05	0,56
0,9	300	36910	308,15	2,72	0,50
0,9	302	36910	308,15	2,03	0,50
0,9	304	36910	308,15	1,36	0,50
0,9	306	36910	308,15	0,70	0,50
0,9	308	36910	308,15	0,05	0,50

# Anexo B

## Datos de referencia del buque *SUIISO FRONTIER*

Eslora total [m]	116
Eslora entre perpendiculares [m]	109
Manga máxima [m]	19
Puntal [m]	10,6
Calado [m]	4,5
Tonelaje del buque [ton]	Aproximadamente 8000
Capacidad de carga [m <sup>3</sup> ]	Aproximadamente 1250 m <sup>3</sup>
Sistema de Propulsión	Diesel Electric
Velocidad del buque [nudos]	Aproximadamente 13 nudos
Tripulación	25 personas
Clasificación	Nippon Kaiji Kyokai (Class NK)
País de registro	Japón
Dueño del buque	CO <sub>2</sub> - Free Hydrogen Energy Supply Chain Technology Research Association (HySTRA)

# Anexo C

## Curvas características bombas SUBTRAN Cryostar

