



UTN.BA

FACULTAD  
REGIONAL  
BUENOS AIRES

TRABAJO FINAL INTEGRADOR  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Título:  
"Planta de Producción de Amoníaco Verde:  
Ingeniería Conceptual"

Autor: Nicolás Belloni

Buenos Aires – Diciembre 2023

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

## Índice

1. OBJETIVOS .....	4
2. ALCANCE DEL DISEÑO .....	4
2.1. Inclusiones .....	4
2.2. Exclusiones .....	4
3. INFORMACIÓN DEL PROYECTO Y BASES DE DISEÑO .....	5
3.1. Introducción: El Hidrógeno Verde y el Amoníaco como Carrier energético.....	5
3.2. Localización y Áreas Disponibles .....	7
3.3. Diagrama de Bloques del Proyecto .....	9
3.4. Estimación Económica .....	11
3.5. Condiciones de diseño y datos de entrada.....	11
3.5.1. Capacidad de Producción.....	11
3.5.2. Exportación de producto.....	12
3.5.3. Alimentación de Energía Eléctrica. ....	12
4. DISEÑO DE EQUIPOS Y ANÁLISIS DE OFERTAS .....	13
4.1. Paquete Verde: Planta de Electrolización y Haber-Bosch.....	13
4.2. Sistema de Almacenamiento de Amoníaco .....	15
4.3. Planta de Desalinización .....	16
4.4. Bombas y Pipelines Principales .....	19
5. CÁLCULO DE COSTO DE PRODUCCIÓN .....	20
5.1. Sumario de CAPEX.....	20
5.1. Cálculo de OPEX Anual .....	20
5.1. Cálculo de LCOA .....	21
6. CONCLUSIONES .....	23
ANEXO I: CÁLCULO DE SISTEMA DE CARGA DE AMONÍACO .....	24
Modelado Matemático y Económico.....	24
Parámetros de Diseño .....	26
Resultados Obtenidos.....	27
ANEXO II: CÁLCULO DE SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA .....	29
Modelado Matemático y Económico.....	29
Parámetros de Diseño .....	29
Resultados Obtenidos.....	30
ANEXO III: CÁLCULO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO.....	32
Modelado Matemático y Económico.....	32
Parámetros de Diseño .....	32
Resultados Obtenidos.....	33
7. BIBLIOGRAFÍA .....	34

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

## Índice de Tablas

Tabla 1: Calidad de Amoníaco Anhídrido Comercial .....	11
Tabla 2: Barcos disponibles para transporte de amoníaco líquido .....	12
Tabla 3: Comparación de ofertas Planta Desalinizadora .....	19
Tabla 4: Resumen de resultados de Sistemas de Bombeo.....	19
Tabla 5: Sumario de CAPEX inicial .....	20
Tabla 6: Sumario de Cargas Eléctricas.....	20
Tabla 7: OPEX Anual .....	21
Tabla 8: Datos de Entrada para el Sistema de Carga .....	26
Tabla 9: Resultados modelado hidráulico Amonio ducto .....	27
Tabla 10: Resultados modelado económico Amonio ducto .....	28
Tabla 11: Resultados modelado hidráulico Acueducto .....	30
Tabla 12: Resultados modelado económico Acueducto .....	30

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Áreas Disponibles para el desarrollo del proyecto .....	8
Ilustración 2: Puntos de toma y descarga de agua de mar.....	9
Ilustración 3: Diagrama de Bloques del Proyecto.....	10
Ilustración 4: Layout propuesto por la empresa <i>Green-Ammonia</i> (600MW).....	14
Ilustración 5: Diagrama de Flujo de Planta Desalinizadora de <i>Desal-Plants</i> .....	17
Ilustración 6: Diagrama de Flujo de Planta Desalinizadora de <i>Water-Treatment</i> .....	18
Ilustración 7: Planialtimetría del Corredor Sitio A a Sitio B .....	27
Ilustración 8: Planialtimetría del Corredor Sitio B a Sitio A .....	29
Ilustración 9: Evolución del volumen de amoníaco.....	33

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### 1. OBJETIVOS

En el presente Trabajo Final Integrador se detallan los procedimientos y resultados para el desarrollo de la Ingeniería Conceptual de una planta generadora de hidrógeno verde a partir de agua de mar desalinizada utilizando amoníaco líquido anhídrido como carrier energético.

El objetivo del presente trabajo es:

- Presentar las diferentes alternativas de diseño para todas las facilidades incluidas dentro del alcance.
- Evaluar las alternativas tanto técnica como económicamente y obtener un CAPEX (Capital Expenditure) para cada una de ellas.
- Seleccionar la configuración más conveniente de la planta generadora y exportadora de amoníaco verde y de sus facilidades requeridas.
- Obtener el costo nivelado de amoníaco (LCOA) considerando el total del CAPEX y una estimación de OPEX anual.

### 2. ALCANCE DEL DISEÑO

#### 2.1. INCLUSIONES

El proyecto detallado en este trabajo incluye las siguientes facilidades:

- Planta desalinizadora de agua de mar.
- Paquete de electrolización y producción de amoníaco (a partir de ahora "Paquete Verde") incluyendo:
  - Tren de electrolización modularizado.
  - Planta Haber Bosch productora de amoníaco a partir de hidrógeno.
  - Antorcha para quema de hidrogeno o amoníaco en caso de venteo de emergencia.
  - Planta de separación de aire y producción de nitrógeno.
  - Planta demineralizadora de agua para consumo de electrolizadores y circuito de enfriamiento.
  - Circuito de enfriamiento.
  - Almacenamiento de hidrógeno en caso de ser necesario.
- Facilidades de almacenamiento, transporte y carga del amoníaco producido en barcos para su exportación.

#### 2.2. EXCLUSIONES

La generación eléctrica no será parte del alcance del proyecto. Se considera que será suministrada a partir de Power Purchase Agreements (PPAs). Su implementación se detallará más adelante.

Los siguientes sistemas también se encuentran excluidos del presente proyecto. Se considera que no afectarán significativamente el CAPEX a obtener y que no aportan mayor detalle al trabajo realizado, aunque deben ser tenidos en cuenta en cualquier proyecto a realizar:

- Sistema de distribución de aire de instrumentos.
- Sistema de lucha contra incendios.
- Sistema de tratamiento de efluentes.
- Tanques de almacenamiento auxiliares.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### 3. INFORMACIÓN DEL PROYECTO Y BASES DE DISEÑO

#### 3.1. INTRODUCCIÓN: EL HIDRÓGENO VERDE Y EL AMONIACO COMO CARRIER ENERGÉTICO

La presente búsqueda de energías que eviten la generación de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono o metano han despertado el interés por la utilización de hidrógeno como fuente de energía en celdas de combustible cuyo único subproducto es agua. El interés por el hidrógeno se complementa con varias de sus propiedades fisicoquímicas: es liviano, almacenable, altamente reactivo, tiene mucha cantidad de energía por unidad de masa y se puede producir a gran escala.

La demanda de hidrógeno hoy en día es de aproximadamente 70 millones de toneladas al año, pero es obtenido a partir de hidrocarburos casi en su totalidad [1] a partir del proceso conocido como Reformado Catalítico de Metano con Vapor (SMR). El metano y el vapor de agua reaccionan a altas presiones y temperaturas y mediante un catalizador de níquel generando hidrógeno y monóxido de carbono, mezcla conocida como Gas de Síntesis:



El hidrógeno obtenido de esta forma a nivel mundial es responsable de la emisión de aproximadamente 830 millones de toneladas de dióxido de carbono por año, con el agravante de que suele realizarse a gran escala en refinerías de gas o petróleo y acompañada de otros procesos de refinado de hidrocarburos.

El hidrógeno puede obtenerse también a partir de la electrólisis del agua. Este es un proceso que consta en aplicar una tensión eléctrica para separar los enlaces entre el hidrógeno y el oxígeno en las moléculas de agua:



Este proceso consume agua y energía eléctrica y genera hidrógeno y oxígeno como subproducto, el cual puede ser venteadado sin inconvenientes ni perjuicios apreciables. En el caso en que la energía eléctrica a utilizar tenga origen de fuentes renovables y su utilización final sea, por ejemplo, una celda de combustible que produce electricidad y agua, el proceso completo carece de puntos de generación de gases de efecto invernadero y por eso se lo conoce como "Hidrógeno Verde".

Hoy en día solamente un 0.7% de la producción mundial de hidrógeno proviene de electrólisis con fuentes renovables [1] sin embargo este proceso resulta particularmente atractivo de cara al futuro ya que las fuentes de energía renovable como la eólica o solar tienen su capacidad de generación supeditada a componentes estacionales, por lo cual la generación no es estacionaria. Este método permite almacenar químicamente la energía generada resolviendo, en parte, dicho problema.

El hidrógeno tiene, además, otros usos posibles:

- En refinado de petróleo como removedor de impurezas en crudo o petróleos pesados.
- Como materia prima para producción de químicos como amoníaco o metanol.
- Como gas de reducción en la industria metalúrgica para la producción de acero.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

Como bien se dijo anteriormente el hidrógeno tiene varias propiedades que lo convierten en un elemento atractivo: Tiene un gran poder calorífico por unidad de masa, incluso superior al del gas natural o gasolina, y puede ser almacenado de forma estable por largos períodos, permitiendo su transporte en hidrogeno ductos o barcos.

Sin embargo, este compuesto también presenta grandes desafíos. El hidrógeno es tan pequeño que puede difundirse por muchos de los materiales estándar del mercado, generando pérdidas y grietas en el mismo, y por la misma razón las uniones mecánicas deben ser manejadas con mucho cuidado para evitar fugas sobre todo considerando que su rango de flamabilidad es muy grande (4% a 75.6% en aire) y la energía de ignición en mezclas explosivas es muy pequeña. Por otro lado, debido a su baja densidad, el hidrógeno es muy costoso de almacenar y transportar. Puede almacenarse en estado líquido, lo cual requiere temperaturas criogénicas de  $-253^{\circ}\text{C}$ , o en recipientes de alta presión a temperatura ambiente requiriendo una presión aproximada de 700barg [2].

Alternativamente el hidrógeno puede ser almacenado de forma segura utilizando un carrier químico, lo que implica realizar la conversión hacia algún compuesto estable más fácil de almacenar y transportar que pueda ser eficientemente reconvertido a hidrógeno y que, en todo el proceso, no genere emisiones significativas de carbono. Entre las opciones aparecen el metanol, algunos carriers orgánicos y, fundamentalmente, el amoníaco líquido anhídrido.

La conversión de hidrógeno a amoníaco se realiza mediante el proceso Haber Bosch. El mismo tiene muchas patentes y tecnologías [3], pero en líneas generales se trata de una reacción exotérmica a alta presión y mediante un catalizador de hierro:



El amoníaco es un producto utilizado por la industria de fabricación de fertilizantes desde hace mucho tiempo por lo que las instalaciones y facilidades de transporte y almacenamiento cuentan con tecnología muy desarrollada abaratando costos y facilitando el transporte del hidrógeno hasta su destino de uso.

El amoníaco debe ser almacenado a presión atmosférica y temperaturas de  $-33^{\circ}\text{C}$  o a temperatura ambiente y presiones de 12 a 18 barg, condiciones mucho más favorables que las de almacenamiento de hidrógeno. Entre estas alternativas la más económica para grandes volúmenes de almacenamiento suele ser el almacenamiento a presiones atmosféricas [4] sobre todo porque la mayoría de los procesos de generación de amoníaco incluyen procesos criogénicos.

El amoníaco puede ser transportado a destino de varias formas: por trenes o camiones a temperatura ambiente o por barco a temperaturas criogénicas. La gran mayoría de los barcos de transporte de gases licuados como el amoníaco cuentan con reservorios para el manejo de líquidos a bajas temperaturas incluyendo unidades de recuperación de vapores que condensan los vapores que se puedan generar por la absorción de calor del ambiente o debido al oleaje.

El gran desafío de esta alternativa es la reconversión del amoníaco en hidrógeno para su utilización in-situ. La descomposición es básicamente una reacción termo-catalítica con aire generando hidrógeno y pequeñas cantidades de agua y nitrógeno como subproductos. Se trata de una reacción endotérmica que requiere temperaturas del orden de los  $500^{\circ}\text{C}$  y los reactores todavía tienen mucho espacio para desarrollo ya que son grandes y costosos [5].

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

Es necesario entonces una comparación entre los costos de almacenar y transportar hidrógeno para su utilización directa frente a su conversión a un carrier energético, transporte y reconversión in situ. Para el actual estado de la tecnología algunos estudios llegan a la conclusión de que el transporte directo de hidrógeno en ductos y barcos es más económico hasta distancias de 1500km. Para distancias mayores la conversión, almacenamiento, transporte y reconversión de amoníaco se presenta como una alternativa más económica [6] permitiendo ahorros de hasta 1.2 USD/KgH<sub>2</sub> [1] para movimientos intercontinentales.

El presente trabajo considera la utilización de amoníaco como carrier energético y el transporte en barcos refrigerados desde el puerto de Pecém, localizado en la ciudad de Fortaleza, en Brasil.

### 3.2. LOCALIZACIÓN Y ÁREAS DISPONIBLES

El proyecto a desarrollar en este trabajo utilizará como facilidad portuaria el existente Complejo Industrial y Portuario de PECÉM, localizado en la ciudad de Fortaleza, en el estado de Ceará, Brazil.

El área disponible se divide en cuatro sitios principales:

- Sitio A: Área de 122 hectáreas reservada para la mayoría de las facilidades de la planta, excluyendo la planta de desalinización.
- Corredor: Espacio reservado para la instalación de líneas de transporte de amoníaco, agua y otros servicios desde el Sitio A hasta el puerto y las facilidades de carga.
- Sitio B: Área de 3 hectáreas reservada para la planta desalinizadora de agua.
- Facilidades de puerto: Espacio reservado para línea y brazos de carga de amoníaco dentro del puerto de Pecém, hasta el muelle donde atracarán los barcos transportadores del producto final.

A continuación, la delimitación de las áreas detalladas:

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

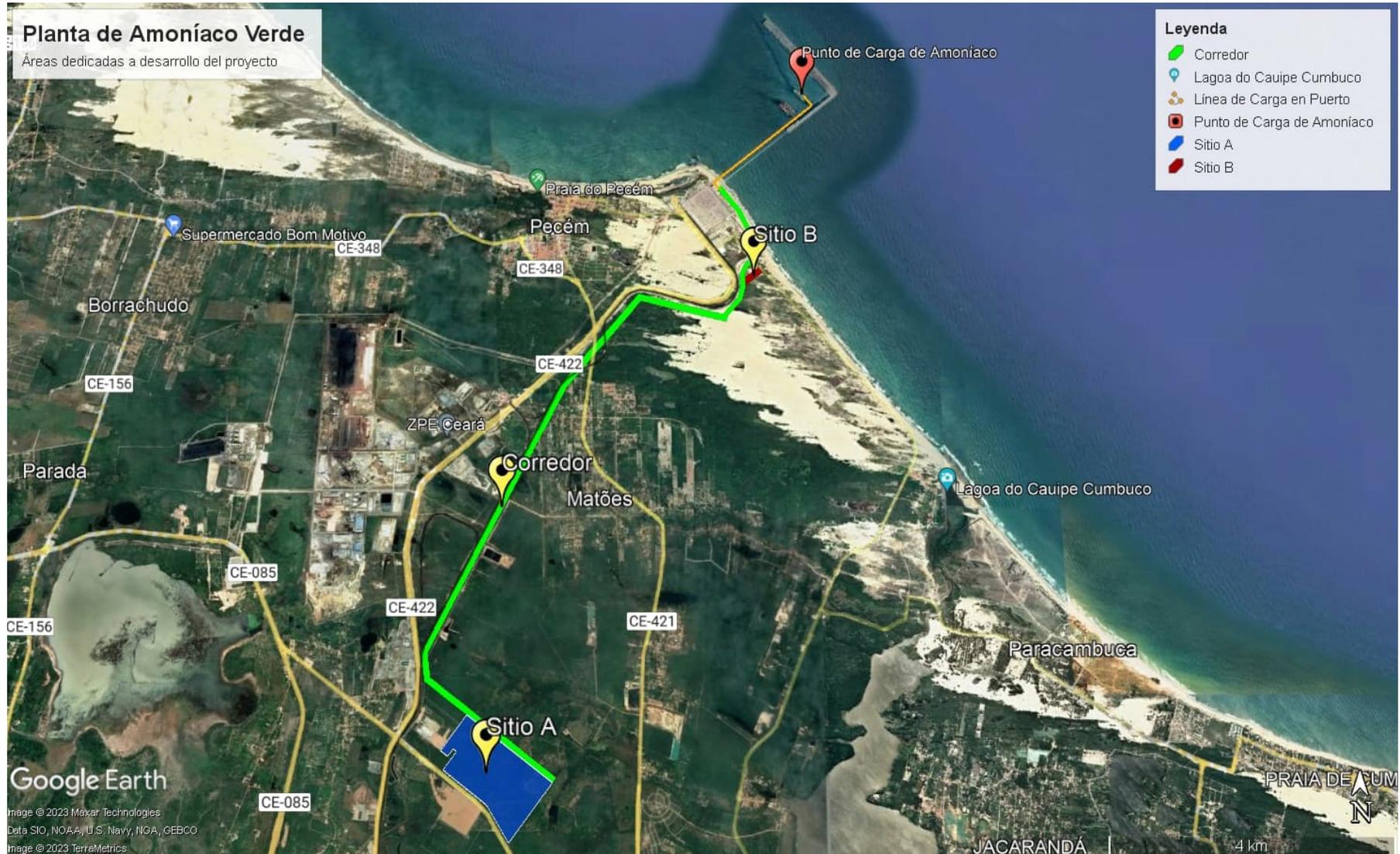


Ilustración 1: Áreas Disponibles para el desarrollo del proyecto

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

La distancia entre el sitio A y el sitio C es de aproximadamente 12 kilómetros y la distancia desde el sitio C hasta el puerto es de aproximadamente 4 kilómetros más.

Los tanques de almacenamiento de amoníaco se ubicarán en el sitio A por lo que se deberán prever facilidades de bombeo para transportar el amoníaco hasta la zona de carga en el puerto.

A su vez la planta desalinizadora deberá contar con una línea de toma de agua de mar y una línea de descarga del residuo concentrado (brine). Se prevén los siguientes puntos:

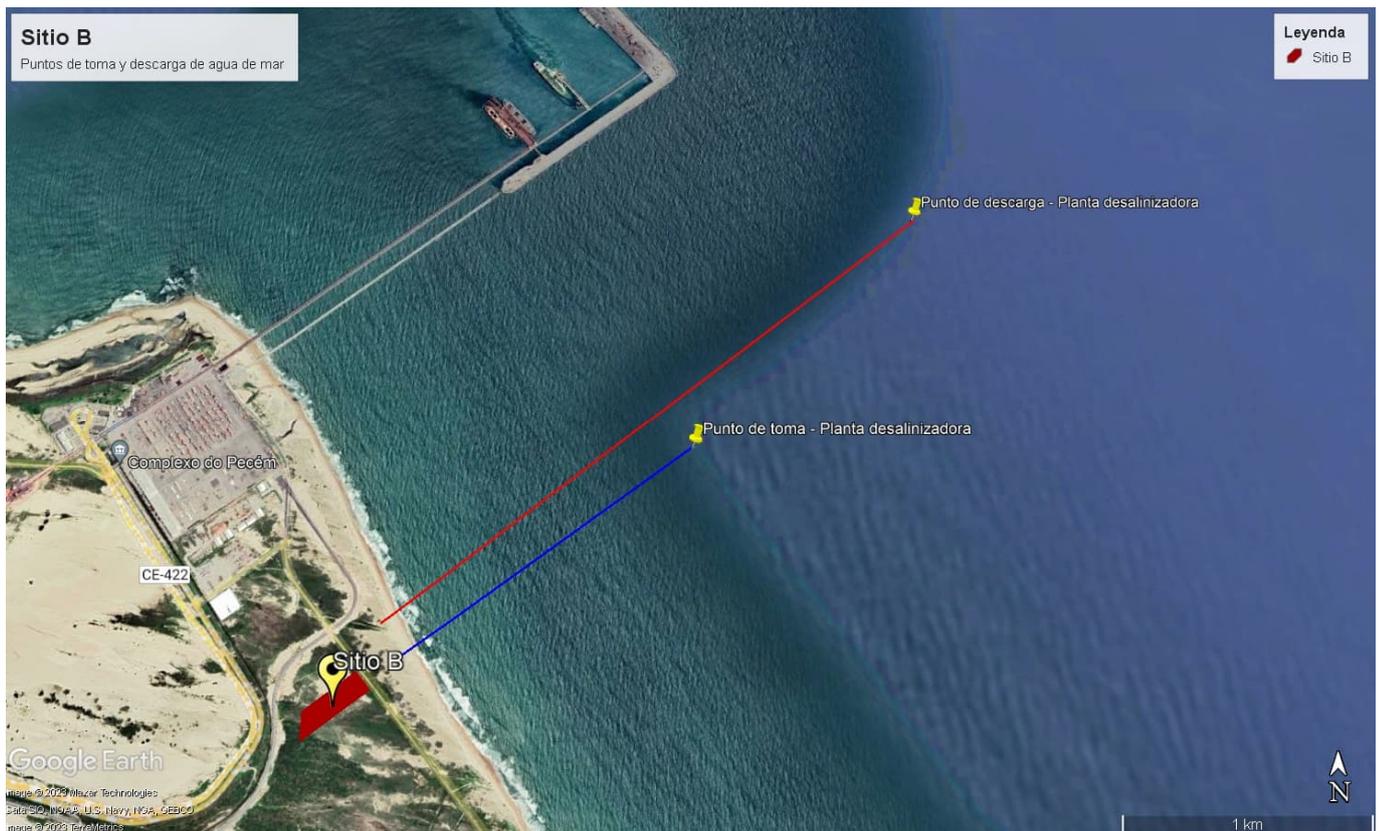


Ilustración 2: Puntos de toma y descarga de agua de mar

### 3.3. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROYECTO

A continuación, un diagrama de bloques del proyecto:

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

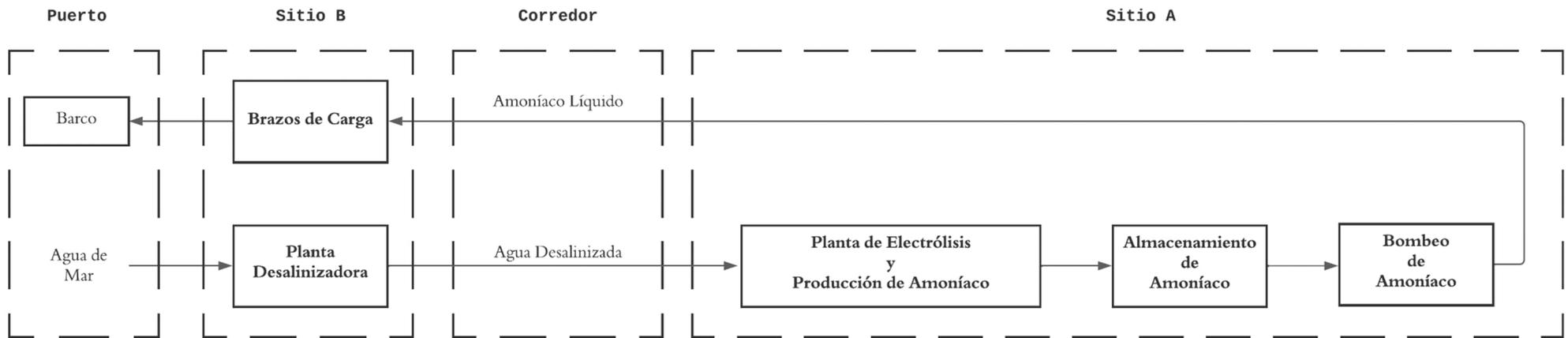


Ilustración 3: Diagrama de Bloques del Proyecto

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### 3.4. ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Para la realización de la estimación económica del proyecto es necesario obtener valores de referencia de CAPEX (Capital Expenditure) y OPEX (Operational Expenses).

El CAPEX refiere al costo o monto total de cada uno de los equipos e implica gastos puntuales que tendrá el proyecto y que son necesarios para garantizar la provisión de los mismos en tiempo y forma. Son montos que el proyecto deberá afrontar por única vez.

El OPEX se relaciona con los gastos fijos que tendrá la planta a lo largo de su vida útil. Incluye gastos de mantenimiento periódico de los equipos, salarios de los operadores de planta, el costo de la energía y otros costos fijos que pueda haber como alquileres, permisos, etc.

Dentro del rubro energético y particularmente dentro de las energías renovables un indicador muy utilizado es el costo nivelado de la energía o LCOE [7]. Este indicador es un cociente entre todos los gastos que tendrá la planta a lo largo de la vida útil, llevados a valor actual, y la producción total de energía a lo largo del mismo período:

$$LCOE = \frac{\text{Suma de costos niv. a lo largo de la vida útil}}{\text{Produc. de energía a lo largo de la vida útil}} \quad (4)$$

Este cálculo no tiene una fórmula definida si no que es particular para cada proyecto ya que el numerador debe incluir tanto el total del CAPEX, financiado a lo largo de los años de la forma que sea, como el OPEX anual sumariado a lo largo de la vida útil de la planta.

Este indicador es muy utilizado en el ámbito de la energía renovable ya que es un rubro en donde las propuestas tecnológicas son muy variables, cambiantes y aún tienen mucho potencial de desarrollo y este valor permite comparar rápidamente entre varias alternativas para el mismo fin.

En el presente trabajo el valor a calcular será el costo nivelado de amoníaco o LCOA [8] el cual tiene una forma similar al LCOE sólo que el costo se divide por la producción total de amoníaco a lo largo de la vida útil de la planta.

### 3.5. CONDICIONES DE DISEÑO Y DATOS DE ENTRADA

#### 3.5.1. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

La planta será diseñada para producir y exportar 4,725 tpd de amoníaco anhídrido, lo cual demandará una planta de electrólisis de aproximadamente 2100MW de capacidad instalada. Se considera que la planta tendrá una disponibilidad de producción del 97% anual.

El principal requerimiento del producto es que se encuentre a  $-33^{\circ}\text{C}$  al momento de su carga al barco y que tenga calidad comercial [3]:

Tabla 1: Calidad de Amoníaco Anhídrido Comercial

Parámetro	Valor de referencia
Pureza (min.)	99.5 wt %
Agua (máx.)	0.5 wt %
Hidrocarburos (máx.)	5 wt ppm

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### 3.5.2. EXPORTACIÓN DE PRODUCTO.

Para el diseño de las facilidades de exportación es necesario analizar las capacidades de los barcos transportadores de amoníaco anhídrido disponibles en el mercado. Dependiendo de la capacidad del barco variarán dos parámetros muy importantes en el diseño:

- La frecuencia entre los barcos: En base a la capacidad de almacenamiento variará la frecuencia necesaria de los barcos para poder transportar el amoníaco producido.
- El caudal de carga al barco: Este valor suele ser fijado por la autoridad portuaria. Esto es debido a que, por un lado, el costo de mantener el barco amarrado es muy alto, por lo que el sistema debe estar diseñado para que la operación de carga no dure más de 24 horas. Por otro lado, los barcos cuentan con bombas de agua de lastre y si el caudal de carga es más elevado de lo especificado el sistema de lastre puede no ser suficiente y el barco puede tener desbalances y desperfectos técnicos [9].

Por lo general este tipo de industrias no suele utilizar un solo barco de capacidad determinada si no que suele haber una distribución entre la flota que transporta el producto. Un pequeño estudio de mercado arroja los siguientes posibles navíos a considerar para la operación:

Tabla 2: Barcos disponibles para transporte de amoníaco líquido

Barco	Referencia	Volumen NH3 (m <sup>3</sup> )	Tiempo de Carga (hs)	Caudal de carga (m <sup>3</sup> /h)
<i>Very Large Ammonia Carrier</i>	Panda 93P	93000	23	4043
<i>Very Large Gas Carrier 02</i>	Mitsui - Phoenix	87000	22	3955
<i>Very Large Gas Carrier</i>	Clipper Sirius	73000	21	3476
<i>Large</i>	Clipper Neptun	59000	20	2950
<i>Medium</i>	Clipper Odin	38000	20	1900
<i>Small</i>	Clipper Eirene	20750	20	1038

El presente proyecto considera la operación con Very Large Ammonia Carrier (VLAC) para el diseño de las facilidades.

### 3.5.3. ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

La generación de energía eléctrica de fuentes renovables, como ya fue detallado, no será parte del alcance de este proyecto.

Para alimentar la planta en general y la electrólisis en particular la energía será adquirida a partir de Power Purchase Agreements (PPAs) lo cual implica un acuerdo a largo plazo que asegura al consumidor un suministro de energía certificada como renovable a un precio determinado por MWh.

Este tipo de acuerdos son muy comunes en regiones con redes de alta tensión desarrolladas y confiables y con grandes generadores de energía limpia que aportan a la misma. La red eléctrica de Brasil cumple con todas esas condiciones permitiendo que el proyecto base su consumo eléctrico en este tipo de acuerdos y pueda ser certificado como Verde [10].

En este proyecto se estimará la energía a consumir y se estudiará el costo que generará la compra de dicha energía a través de PPAs.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### 4. DISEÑO DE EQUIPOS Y ANÁLISIS DE OFERTAS

En los siguientes ítems se hará un diseño preliminar de los diferentes módulos calculando sus principales características de diseño y estimando los precios de alguna de las siguientes dos formas:

- A partir de fórmulas de estimación de costos informadas en bibliografía.
- A partir de precios obtenidos de proveedores especializados.

Vale aclarar que las ofertas recibidas de proveedores son estimaciones budgetarias y que pueden ser optimizadas en caso de que exista la posibilidad concreta de una orden de compra. Lo mismo aplica para los plazos de fabricación informados para cada módulo. De todos modos, se toman como válidas por provenir directamente del mercado de Brasil.

Los nombres de los proveedores son ficticios debido a que, por acuerdos de confidencialidad, no es posible revelarlos en este trabajo.

#### 4.1. PAQUETE VERDE: PLANTA DE ELECTROLIZACIÓN Y HABER-BOSCH

El llamado Paquete Verde consta de la planta de electrolización y del tren de reacción que genera amoníaco a partir del hidrógeno producto de la electrolisis. Se trata del corazón tecnológico de la planta y todos los servicios auxiliares se diseñan en función del correcto funcionamiento de esta parte del proceso.

Su especificidad es muy elevada por lo que requiere de proveedores especializados que conozcan las tecnologías y optimizaciones posibles. Si bien el proceso de producción de amoníaco es muy conocido y tiene muchos años de desarrollo ya que se utiliza principalmente en la industria de los fertilizantes, la planta de electrolización asociada es un producto muy joven que todavía tiene mucho por optimizar para reducir costos y tamaños.

Se contacta con la empresa *Green-Ammonia* la cual propone un paquete incluyendo ambos procesos para la producción de 4725tpd de amoníaco de calidad comercial. La oferta técnica detalla varios aspectos importantes a ser tenidos en cuenta para el diseño de las instalaciones auxiliares:

- Se plantean electrolizadores del tipo alcalino presurizados modularizados.
- Cada módulo consume 10MW de potencia instalada por lo que el paquete cuenta con aproximadamente 210 módulos operativos en el comienzo de la vida útil.
- El paquete incluye un tratamiento de demineralización de agua que toma el agua desalinizada y la pule hasta la calidad necesaria para alimentar los electrolizadores.
- El consumo de agua desalinizada al comienzo de la vida útil (SoL: Start of Life) es de 1m<sup>3</sup>/h por cada MW de potencia instalada lo cual implica un caudal de aproximadamente 2,100m<sup>3</sup>/h. Este consumo incluye tanto la demineralización para alimentar a los electrolizadores como el make up del sistema de enfriamiento y otros consumos del paquete.
- A lo largo de los 10 años de vida útil de los electrolizadores los mismos se van degradando y su consumo de agua va en aumento llegando a un máximo de 1.66m<sup>3</sup>/h por cada MW de potencia instalada en el final de la misma (EoL: End of Life) estimándose en un total de 3,500m<sup>3</sup>/h.

Por particularidades de la forma en la que fue pedida la oferta, la empresa *Green-Ammonia* plantea trenes de 600MW de potencia instalada expandibles a 2100MW. A continuación, el layout propuesto por la empresa para un tren de 600MW:

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

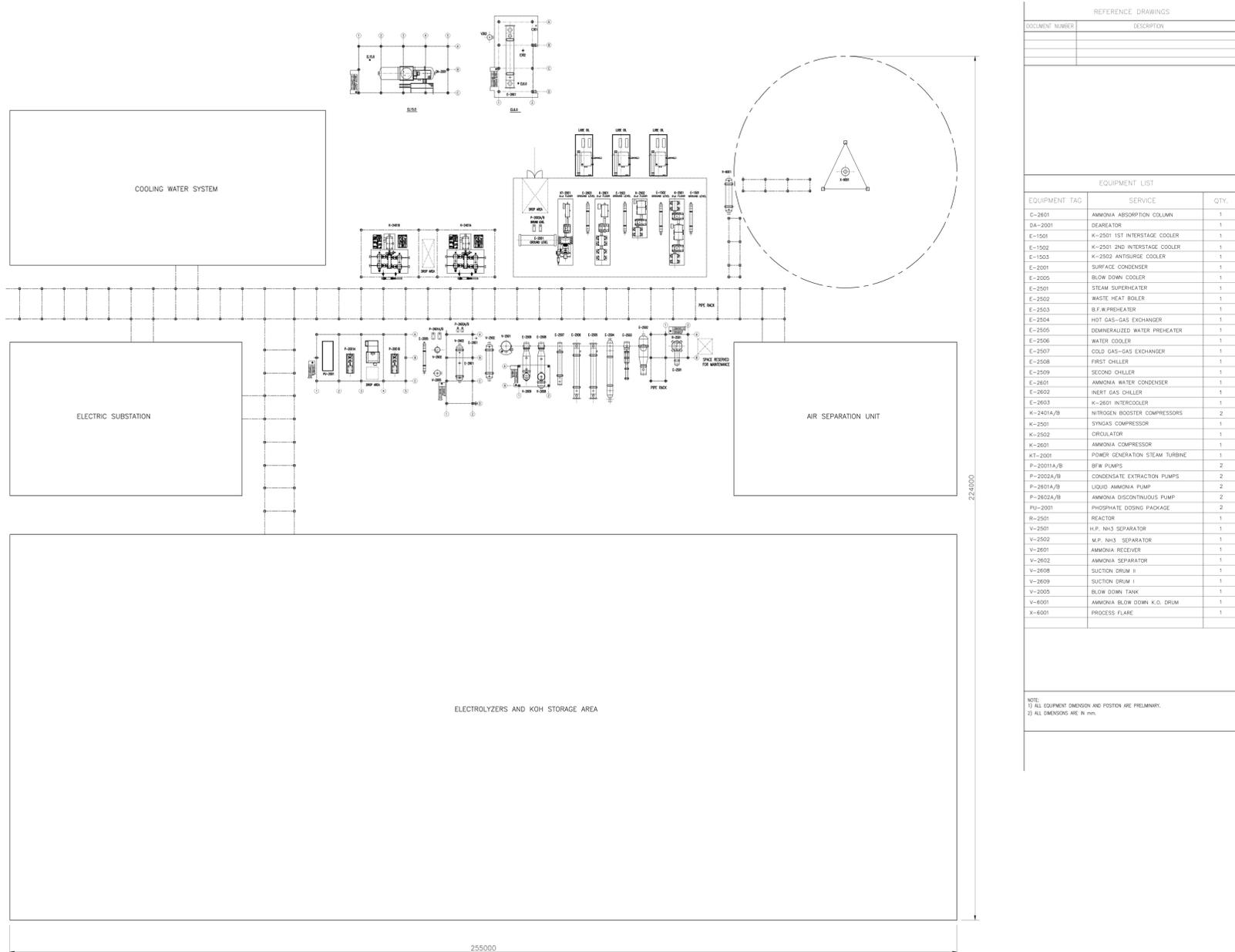


Ilustración 4: Layout propuesto por la empresa Green-Ammonia (600MW)

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

A continuación, datos importantes obtenidos de la oferta:

- Footprint estimado para toda la facilidad: 224m x 255m para un tren de 600MW. Una extrapolación para 2100MW considerando mantener constante una de las cotas arroja un aproximado de 224m x 893m lo cual implica una superficie de 199,920 m<sup>2</sup> o sea 19.9 ha.
- La potencia requerida para toda la facilidad se estima en 2100MW incluyendo los electrolizadores y la planta de amoníaco con todas sus facilidades auxiliares.
- El precio total aproximado informado es de USD 3,302,420,090.

Como se ha indicado esta oferta es prematura y está sujeta a posibles optimizaciones tanto a nivel costo como a nivel tamaño, pero sirve como un estimado para el presente trabajo.

### 4.2. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AMONÍACO

Como ya se ha referido brevemente antes, el amoníaco anhídrido se almacenará en estado líquido y para ello se pueden utilizar tres tipos de sistemas:

- Sistemas a alta presión y temperatura ambiente: Recipientes ASME horizontales sin enfriamiento externo operados a una presión de entre 12 y 18 barg.
- Sistemas semi-refrigerados: Esferas a una presión de entre 4 y 6 barg.
- Sistemas a presión atmosférica: Tanques atmosféricos mantenidos a una temperatura de -33°C a partir de una unidad de recuperación de vapores.

Para almacenamientos mayores a 2,000 toneladas los tanques criogénicos a presión atmosférica son la opción más conveniente no sólo económicamente sino a nivel seguridad de procesos. El almacenamiento de amoníaco a presión es mucho más peligroso debido a la gran dispersión de la sustancia tóxica que se produce en caso de una fuga [11]. Por otro lado, la generación de amoníaco en la planta Haber Bosch suele utilizar tecnología criogénica y produce el amoníaco en condiciones líquidas a presiones atmosféricas por lo que utilizar otras condiciones para su almacenamiento sería un desperdicio de energía.

Se consideran tanques de doble pared ya que los tanques de simple pared suelen generar riesgos inaceptables en este tipo de instalaciones cercanas a centros poblacionales.

Según se detalla en el cálculo realizado en el Anexo III el parque de tanques de almacenamiento de amoníaco debe contar con una capacidad útil de 150,000m<sup>3</sup> para garantizar la correcta recepción desde la planta de producción como así también la disponibilidad de stock al momento de cargar un barco de elevada capacidad. En el mismo anexo se detalla una estimación del precio de la instalación a partir de fórmulas en bibliografía [3] pero dada la antigüedad de la fuente se recurre al mercado de Brasil para obtener una mejor aproximación al precio.

Del contacto con el proveedor *Ammonia-Tanks* se concluye que la mejor forma de lograr obtener la capacidad deseada es con tres tanques de 50,000m<sup>3</sup> ya que capacidades mayores implican elevados costos y tiempos de fabricación por no tratarse de tamaños estándar.

La oferta de *Ammonia-Tanks* considera:

- Tres tanques de 50,000m<sup>3</sup>.
- Tanques de doble pared full containment aptos para almacenamiento de amoníaco.
- Condiciones de almacenamiento atmosféricas a -33°C.

### Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

- Diámetro de cada tanque: 42m.
- Altura de cada tanque: 38m.
- Plazo de fabricación de 37 meses.
- Costo total por los tres tanques: USD 124,050,000.

#### 4.3. PLANTA DE DESALINIZACIÓN

La planta de desalinización toma agua de mar para producir agua tratada que será enviada al Paquete Verde para su uso en los electrolizadores y en el circuito de enfriamiento.

La misma estará implantada en el área del sitio B y el agua tratada será bombeada desde ahí a lo largo de todo el corredor hasta el Sitio A. El concentrado residual o Brine será devuelto al mar de Ceará tal como se representa en la Ilustración 2. Como fue indicado en el ítem 4.1. el requerimiento de agua desalinizada es de 2,100m<sup>3</sup>/h durante el inicio de la vida útil de los electrolizadores y de 3,500m<sup>3</sup>/h al final del ciclo útil de los mismos por lo que la planta desalinizadora se diseña para poder producir el máximo caudal de agua tratada con la libertad de poder disminuir la producción hasta el mínimo.

El agua producto de la planta no debe tener la calidad suficiente para alimentar a los electrolizadores ya que para ese fin se requiere agua de calidad desmineralizada con conductividades eléctricas muy bajas. Como ya se ha referido en el ítem 4.1. la demineralización será parte del alcance del Paquete Verde ya que la calidad del agua a alimentar a los electrolizadores es un requerimiento del tecnólogo y es el que suele definir el tratamiento necesario.

Las plantas de desalinización de este tipo utilizan una combinación de tecnologías de ultrafiltración, ósmosis reversa y adición de químicos para lograr la calidad deseada del producto. Al ser una tecnología tan específica el prediseño resulta difícil sin información empírica de calidad, por lo que se contacta a proveedores de Brasil para su dimensionamiento y estimación económica.

Al contactar el mercado se obtiene respuesta de dos proveedores especializados: *Desal-Plants* y *Water-Treatment*. A continuación, un recorte de los diagramas de flujo de ambas ofertas:

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

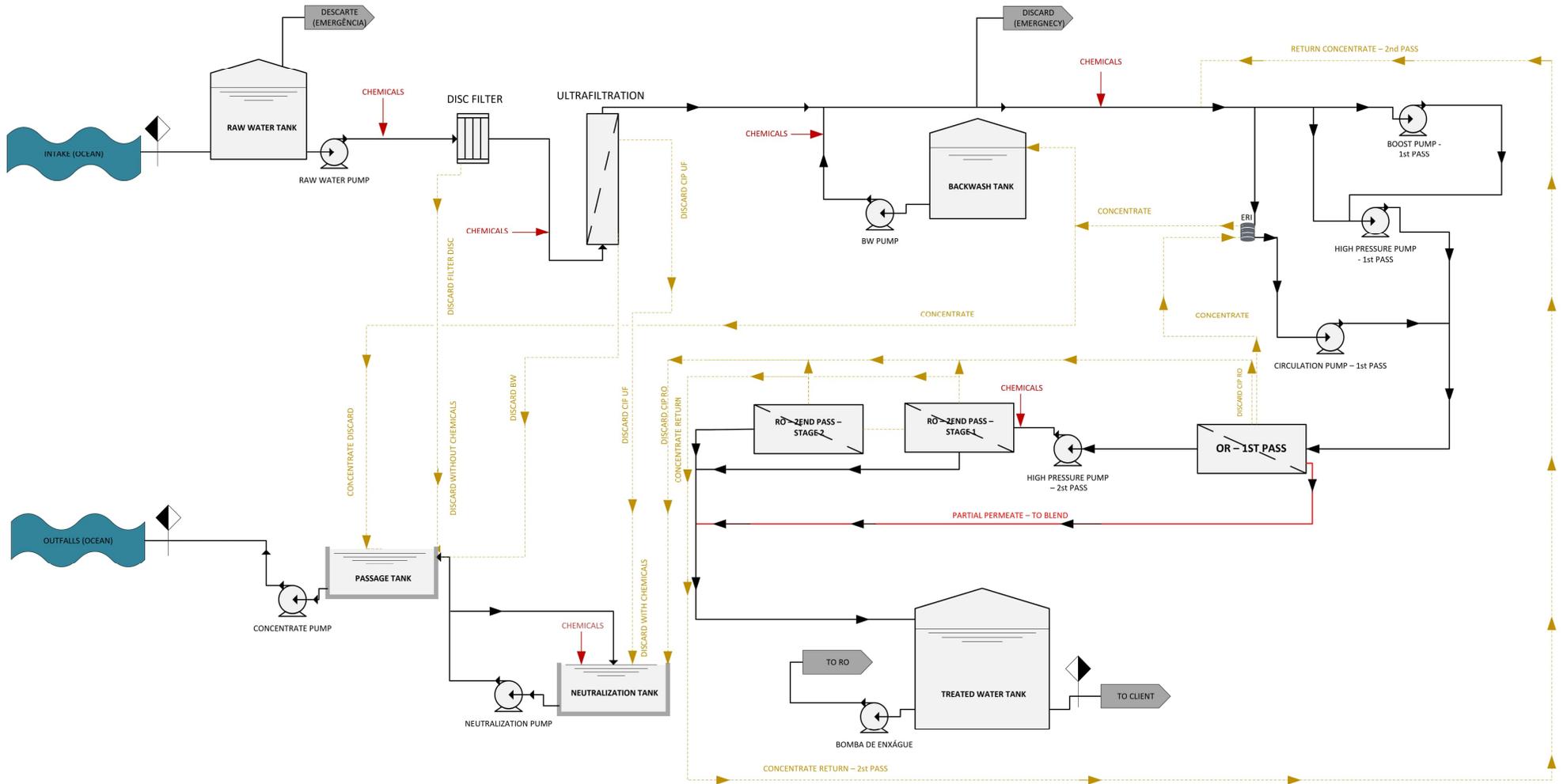


Ilustración 5: Diagrama de Flujo de Planta Desalinizadora de *Desal-Plants*

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

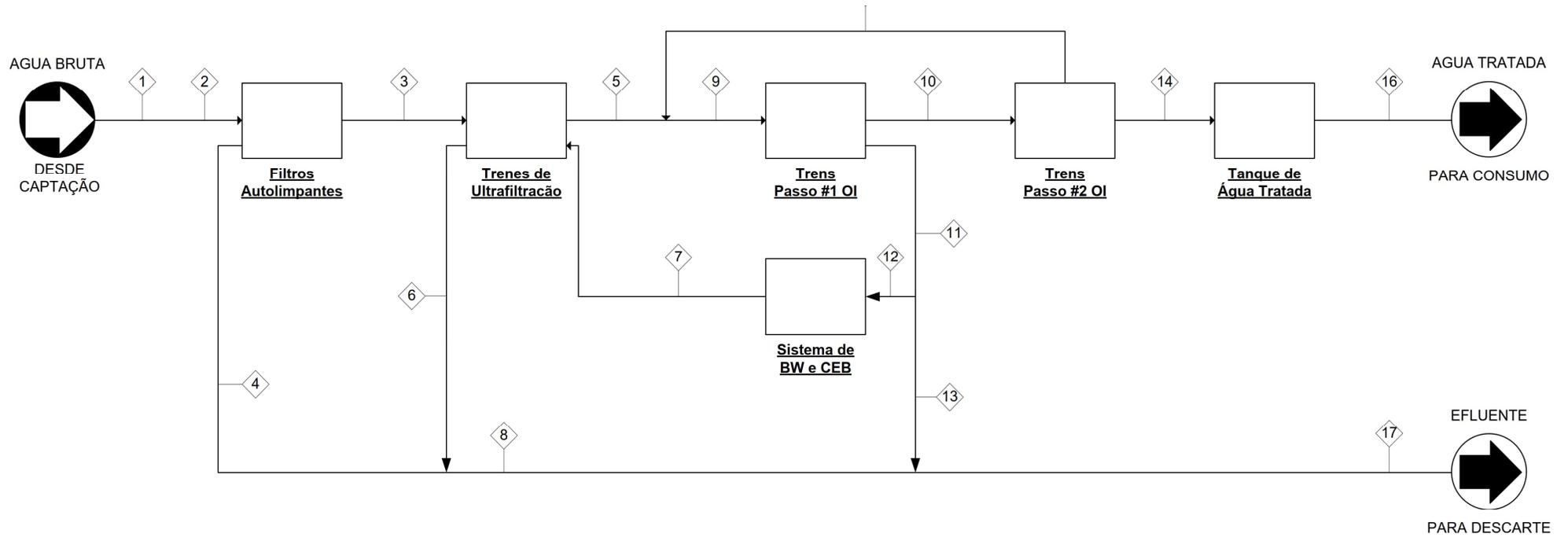


Ilustración 6: Diagrama de Flujo de Planta Desalinizadora de *Water-Treatment*

### Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

Como se puede observar las tecnologías son muy similares. A continuación, se comparan diferentes aspectos puntuales de ambas ofertas. El objetivo es seleccionar sólo una de las ofertas para el diseño y estimación integral de CAPEX de la planta:

Tabla 3: Comparación de ofertas Planta Desalinizadora

Oferente	<i>Desal-Plants</i>	<i>Water-Treatment</i>
Footprint	180m x 105m 1.91ha	302m x 149m 4.5ha
Consumo Eléctrico	13,300kW	15,260kW
Plazo de Entrega	33 meses	30 meses
Presupuesto Total (3500m <sup>3</sup> /h)	USD 111,400,000	USD 71,408,311

Si bien la oferta de *Water-Treatment* es más económica la oferta de *Desal-Plants* tiene un área requerida que coincide con las medidas disponibles para la implantación de la planta en el Sitio B e incluso deja área disponible para implantación de servicios auxiliares que serán necesarios en ese sitio. En el caso de seleccionar la oferta de *Water-Treatment* será necesario disponer de un área mayor lo cual implicará costos, plazos y permisos adicionales.

Se selecciona para el diseño final la alternativa de *Desal-Plants*.

#### 4.4. BOMBAS Y PIPELINES PRINCIPALES

La planta requiere dos sistemas principales de bombeo y pipelines a lo largo del corredor:

- Bombeo de Amoníaco desde tanques de almacenamiento en Sitio A hasta el puerto y facilidades de carga al barco
- Bombeo de agua tratada desde planta desalinizadora en Sitio B hasta el Paquete Verde para desmineralización y posterior electrolización en Sitio A.

Ambos sistemas requieren disponer del pipeline a lo largo de todo el corredor de aproximadamente 15km.

En las secciones Anexo I y Anexo II se encuentran detallados los cálculos técnicos y económicos para el diseño de ambos sistemas. Se calcularon las presiones que deben tener las bombas, así como el diámetro que deben tener las cañerías. Se realiza también una estimación de precios basados en información de bibliografía y ya que en estos casos no fue posible obtener información del mercado local. A continuación, un resumen de los resultados para ambos sistemas:

Tabla 4: Resumen de resultados de Sistemas de Bombeo

Equipo	Parámetro	Sistema de Amoníaco	Sistema de Agua
<i>Sistema de Bombeo</i>	<i>DP (bar)</i>	9.9	13.48
	<i>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</i>	4043	3500
	<i>Potencia (kW)</i>	1,852	2,185
	<i>Costo (USD)</i>	1,058,919	800,154
<i>Pipeline</i>	<i>Diámetro Nominal (in)</i>	28	26
	<i>Material</i>	ASTM A-333 Gr. 6	ASTM A-106 Gr. B
	<i>Costo (USD)</i>	18,695,404	14,780,854

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### 5. CÁLCULO DE COSTO DE PRODUCCIÓN

#### 5.1. SUMARIO DE CAPEX

A continuación, se sumarian los costos iniciales de cada una de las partes del proyecto para obtener el CAPEX inicial de la planta de producción de Amoníaco Verde. Los siguientes valores fueron reportados y seleccionados a lo largo de la sección 4:

Tabla 5: Sumario de CAPEX inicial

Equipo/Sistema	Costo Estimado (USD)
<i>Paquete Verde: Planta Demineralizadora, Parque Electrolítico y Planta de Amoníaco</i>	3,302,420,090
<i>Tanques de Almacenamiento de Amoníaco</i>	124,050,000
<i>Planta Desalinizadora</i>	111,400,000
<i>Bombas de Amoníaco</i>	1,058,919
<i>Pipeline de Amoníaco</i>	18,695,404
<i>Bombas de Agua Desalinizada</i>	800,154
<i>Pipeline de Agua Desalinizada</i>	14,780,854
<i>CAPEX Total</i>	3,573,205,421

#### 5.1. CÁLCULO DE OPEX ANUAL

Al no tener mayores certezas por parte de los proveedores, para la estimación del OPEX se utiliza una regla del dedo gordo referenciada en la bibliografía del 3% por año de la estimación inicial de CAPEX [12]. Este monto incluye los costos de mantenimiento y cambio de repuestos en equipos, así como salarios del personal que trabaja en la planta y otros gastos periódicos.

Otra componente importante del OPEX es el consumo de energía eléctrica. A continuación, un sumario de todos los consumos eléctricos estimados para los diferentes equipos o paquetes en donde, sin lugar a duda, el mayor consumo es el del Paquete Verde:

Tabla 6: Sumario de Cargas Eléctricas

Equipo/Sistema	Carga Eléctrica (MW)
<i>Paquete Verde: Planta Demineralizadora, Parque Electrolítico y Planta de Amoníaco</i>	2100
<i>Planta Desalinizadora</i>	13.3
<i>Bombas de Amoníaco</i>	1.8
<i>Bombas de Agua Desalinizada</i>	2.2
<i>Carga Total</i>	2117.3

Como se indicó en el ítem 3.5.3. la energía será adquirida a partir de PPAs, tomando energía de la red eléctrica de Brasil certificada como generada a partir de fuentes renovables. El costo de la energía mediante este tipo de acuerdos incluye muchas negociaciones y depende de muchos factores, pero se puede tomar de referencia un valor aproximado de 45 USD/MWh [13].

Se estima el OPEX anual considerando ambas contribuciones considerando, para el cálculo de costo de la energía, una disponibilidad anual del 97%:

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

Tabla 7: OPEX Anual

Concepto	OPEX Anual (USD/Año)
<i>Servicios, Mantenimiento y Personal</i>	107,196,163
<i>Energía</i>	809,600,470
<i>OPEX Anual</i>	916,796,633

## 5.1. CÁLCULO DE LCOA

Como se detalló en el ítem 3.4. el costo nivelado de amoníaco o LCOA refiere al costo neto anual (referido a valor actual) por unidad de producción de amoníaco. Para su cálculo se sumarian todos los gastos a lo largo de la vida útil de la planta y se divide dicha suma por la producción total de amoníaco a lo largo del mismo período. Como fue detallado la expresión del LCOA depende de cada proyecto, en este caso se utiliza la siguiente [8]:

$$LCOA = \frac{P_d + P_a \left( \frac{\left( \frac{1}{1+r} \right) - \left( \frac{1}{1+r} \right)^{n_{loan}+1}}{1 - \left( \frac{1}{1+r} \right)} \right) + OPEX_{An} \left( \frac{\left( \frac{1+i}{1+r} \right) - \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^{n_{life}+1}}{1 - \left( \frac{1+i}{1+r} \right)} \right)}{Producción Total de Amoníaco} \quad (5)$$

Donde:

$P_d$ : Pago inicial de toda la planta

$P_a$ : Pago anual a entidades financieras

$n_{loan}$ : Tiempo de préstamo en años

$n_{life}$ : Vida útil de la planta en años

$OPEX_{An}$ : Gastos anuales para operación de la planta

$i$ : Tasa de inflación anual en dólares

$r$ : Tasa de retorno anual en dólares

Los términos entre paréntesis en el numerador consideran la indexación a valores actuales de los gastos a lo largo de toda la vida útil del proyecto e incluyen la tasa de inflación ya que los gastos irán en aumento a lo largo de los años. También incluyen el término "r" ya que la nivelación de los gastos considera que una alternativa a la inversión en el proyecto es el depósito del dinero en una entidad financiera que arrojará una determinada tasa de retorno [7].

El pago anual a las entidades financieras se estima con la siguiente expresión:

$$P_a = (CAPEX - P_d) \left( \frac{1}{1 - (1+b)^{-n_{loan}}} \right) \quad (6)$$

Donde:

$b$ : Tasa de interés anual del préstamo en dólares

Para este trabajo se asumen los siguientes valores:

- Pago inicial de toda la planta  $P_d$ : 10% del CAPEX Total
- Tiempo de préstamo en años  $n_{loan}$ : 15 años
- Vida útil de la planta en años  $n_{life}$ : 20 años
- Tasa de inflación anual en dólares  $i$ : 3% anual
- Tasa de retorno anual en dólares  $r$ : 7% anual

**Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual**

- Tasa de interés anual del préstamo en dólares b: 4% anual

Utilizando todos los datos detallados a lo largo de este trabajo se calcula el valor de LCOA para la planta propuesta:

$$\mathbf{LCOA = 465.7 USD/Tn_{Ammonia}} \quad (7)$$

El valor obtenido es mayor al informado en bibliografía para proyectos de producción de amoníaco a partir de gas natural [7] [8] lo cual es esperable ya que la producción de amoníaco a partir de la electrólisis de agua con fuentes renovables es una industria joven que tiene todavía mucho espacio para la mejora y la optimización.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo de especialización fue realizado a partir de configuraciones reales que se están analizando para proyectos de este tipo en todo el mundo y, si bien la información de las ofertas de diferentes equipos y paquetes son mejorables y optimizables en cuanto a CAPEX y demandas de footprint, se consideran confiables.

Fundamentalmente la contribución más grande al CAPEX proviene de los electrolizadores y la planta de amoníaco los cuales se espera que tomen un mayor grado de especificidad y optimización en el corto plazo debido al gran interés mundial que hay por aprovechar de la manera más eficiente posible las fuentes de energía renovables.

El costo de la energía es un factor importantísimo ya que al ser una de las "materias primas" del proceso su demanda es muy alta y permanente. El desarrollo de la generación y transmisión de energía limpia será decisivo para el asentamiento de esta nueva tecnología en el futuro. En caso de que los costos no bajen será muy difícil que el Hidrógeno Verde tome fuerza como intermediario entre las fuentes de energía renovable y los usuarios finales.

Por otro lado, otro de los grandes desafíos que tiene esta industria es la de generar una demanda mundial constante de hidrógeno o amoníaco verde. Las celdas que aprovechan al hidrógeno como combustible todavía deben evolucionar para ser alternativas competitivas frente al motor de combustión interna. Si eso sucede la demanda aumentará y esta industria tendrá un mayor desarrollo a nivel mundial. Hoy en día, si bien se encuentra en la agenda de las principales compañías de energía del mundo, no hay proyectos en etapas avanzadas de ingeniería o construcción fuera de proyectos piloto. Como ya se refirió es una industria joven y todavía muy cara, pero con mucho potencial para aprovechar la energía de fuentes renovables.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### ANEXO I: CÁLCULO DE SISTEMA DE CARGA DE AMONÍACO

El sistema de carga consta de una estación de bombeo que debe mover el amoníaco desde los tanques de almacenamiento inyectando el amoníaco en la línea principal el cual recorre toda la longitud del corredor. Al llegar al puerto la línea cuenta con una válvula de control que regula el caudal luego de la cual el amoníaco llega a los brazos de carga y de ahí al barco.

El cálculo a realizar consta en estimar la pérdida de carga del amoníaco a lo largo del corredor para poder dimensionar la línea junto con la estación de bombeo y con los parámetros obtenidos estimar su costo. El precio de la línea depende del diámetro escogido y el precio de la estación de bombeo depende del caudal y de la presión de descarga necesaria.

#### MODELADO MATEMÁTICO Y ECONÓMICO

Para el cálculo de pérdida de carga de la línea se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach para caída de presión en tramos rectos y fluidos incompresibles:

$$\Delta P = \frac{2f\rho V^2 L}{D} \quad (8)$$

Donde:

$\Delta P$ : Caída de presión

f: Factor de fricción

$\rho$ : Densidad

L: Longitud de la línea

V: Velocidad

D: Diámetro de la línea

El factor de fricción se calcula utilizando la correlación de Churchill:

$$f = 2 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (9)$$

Con:

$$A = \left[ 2.457 \ln \frac{1}{(7/Re)^{0.9} + 0.27\epsilon/D} \right]^{16} \quad (10)$$

Y:

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (11)$$

Siendo:

### Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

Re: Número adimensional de Reynolds

$\epsilon$ : Rugosidad específica del material (0.046mm para Acero al Carbono)

A su vez el ducto tendrá accesorios, cuyas pérdidas de carga se estiman utilizando el método de la doble K [14]:

$$\Delta P = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (12)$$

Donde:

$$K = \frac{K_1}{Re} + K_\infty \left(1 + \frac{1}{D}\right) \quad (13)$$

Siendo  $K_1$  y  $K_\infty$  constantes que dependen del tipo de accesorio. Se consideran para este cálculo codos de 90°, codos de 45° y válvulas de bloqueo a lo largo de toda la línea.

Los cambios de altura se traducen en cambios de presión y se estiman con un balance de energía mecánica.

Es necesario también estimar la potencia eléctrica requerida por las bombas para lo que se utiliza la siguiente fórmula [15]:

$$P_w = \Delta P Q / \eta \quad (14)$$

Siendo:

$P_w$ : Potencia eléctrica absorbida por la bomba

$\eta$ : Eficiencia de la bomba como valor adimensional (típicamente en etapas de estimación se considera 0.6)

Para la estimación económica del sistema, los costos de bombeo se calculan con la siguiente fórmula [16]:

$$C_{bomba} = F_M F_T C_b \quad (15)$$

Donde:

$$C_b = 1.39 e^{[8.833 - 0.6019 \ln Q\sqrt{H} + 0.0519 (\ln Q\sqrt{H})^2]} \quad (16)$$

Y:

$$F_T = e^{[5.1029 - 1.2217 \ln Q\sqrt{H} + 0.0771 (\ln Q\sqrt{H})^2]} \quad (17)$$

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

Con:

Q: Caudal volumétrico de bombeo.

H: Altura requerida de la bomba.

Además:

$F_M=1.35$  para bombas de acero forjado.

Para la estimación del costo del amonio ducto se calcula la cantidad de material requerida y luego se multiplica por el costo del material:

$$C_{pipe} = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) L \rho_{mat} C_{mat} \quad (18)$$

Donde:

$\rho_{mat}$ : Densidad del material del pipeline.

$C_{mat}$ : Costo por tonelada del material.

La densidad y el costo del material ASTM A-333 se obtiene de catálogos de internet [17].

Se estima el costo de instalación del ducto con la siguiente fórmula [18]:

$$C_{instpipe} = (22000USD)LD \quad (19)$$

### PARÁMETROS DE DISEÑO

El principal dato de entrada para el cálculo del sistema de bombeo es el caudal de amoníaco a ser utilizado. La planta será diseñada considerando que la exportación del amoníaco se hará utilizando el barco Very Large Ammonia Carrier. Esto define el caudal que debe manejar el sistema de carga al barco:

Tabla 8: Datos de Entrada para el Sistema de Carga

Barco	Referencia	Volumen NH3 (m <sup>3</sup> )	Tiempo de Carga (hs)	Caudal de carga (m <sup>3</sup> /h)
<i>Very Large Ammonia Carrier</i>	Panda 93P	93000	23	4043

La planialtimetría del corredor por el cual pasará la traza del caño se puede obtener del software Google Earth. A continuación, un gráfico con los datos extraídos del software siendo la distancia cero el punto inicial de bombeo y el punto final el punto de inyección en el barco:

Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

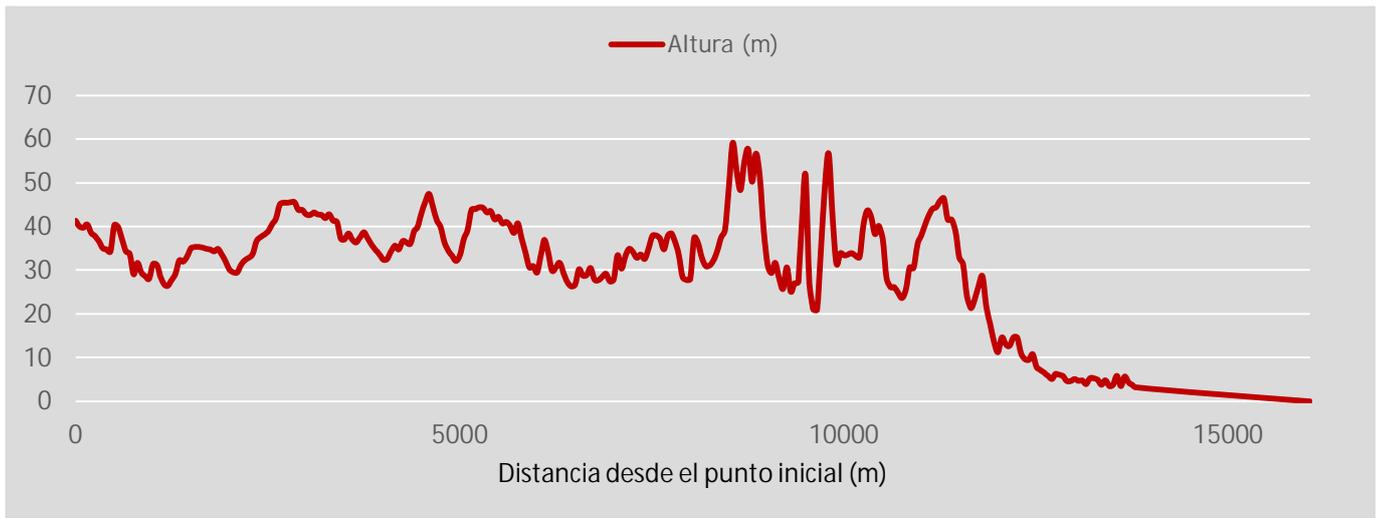


Ilustración 7: Planialtimetría del Corredor Sitio A a Sitio B

Como se puede observar en Ilustración 7 la traza del amonio ducto tiene puntos altos y bajos intermedios entre el bombeo y el puerto por lo cual se entiende que los puntos de menor presión se encontrarán en alguno de esos puntos del ducto. Como premisa de cálculo se busca el punto de menor presión y se diseña el sistema para que el mismo cuente con, por lo menos, 0.5barg de forma tal de evitar vaporización de amoníaco dentro del ducto. La sobrepresión que esto genera en la zona cercana al puerto será absorbida por la válvula de control en esa zona.

El diámetro del ducto será seleccionado de forma tal de no superar una velocidad de 3 m/s [19] ya que la utilización de velocidades más elevadas puede generar problemas de erosión en el ducto.

El material considerado para el ducto es una aleación de acero al carbono para baja temperatura ASTM A-333 el cual es apto para temperaturas criogénicas como la del almacenamiento del amoníaco. Los parámetros importantes para el diseño como el costo del material o las especificaciones del mismo se obtienen de catálogos de internet [17]

RESULTADOS OBTENIDOS

Se resumen los resultados obtenidos detallando, para cada diámetro de cañería comercial, la presión de descarga de bombeo necesaria y la velocidad obtenida en el ducto:

Tabla 9: Resultados modelado hidráulico Amonio ducto

Diámetro Amonio ducto (in)	Variable	Barco: VLAC Carga: 23 hs
		Caudal (m <sup>3</sup> /h)
		4043
32	Pres. Desc (barg)	5.08
	Velocidad (m/s)	2.25
28	Pres. Desc (barg)	9.89
	Velocidad (m/s)	2.93
26	Pres. Desc (barg)	14.41
	Velocidad (m/s)	3.41

### Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

De los resultados obtenidos se puede concluir que diámetros de 26 pulgadas o menos arrojan velocidades por encima de la máxima permitida para un amonio ducto. Por otro lado, diámetros más elevados que 32'' darían velocidades demasiado bajas y por ende costos innecesariamente altos.

Se analizan económicamente las alternativas de 28'' y 32'' estimando, para ambos casos, el costo de la estación de bombeo y el costo del amonio ducto para el diámetro seleccionado. A continuación, los resultados obtenidos:

Tabla 10: Resultados modelado económico Amonio ducto

Diámetro Amonio ducto (in)	Variable	Barco: VLAC Carga: 23 hs
		Caudal (m <sup>3</sup> /h) 4043
32	<i>Costo Bomba (USD)</i>	326,895
	<i>Costo Línea (USD)</i>	13,834,580
	<i>Costo Total (USD)</i>	14,161,476
28	<i>Costo Bomba (USD)</i>	531,592
	<i>Costo Línea (USD)</i>	11,668,170
	<i>Costo Total (USD)</i>	12,199,761

Como se puede observar la alternativa más económica es la de un amonio ducto de 28 pulgadas de diámetro.

La potencia requerida de la bomba se estima utilizando la ecuación (14) y los datos reportados en la Tabla 9 para la opción del ducto de 28'' de diámetro y se obtiene un valor de 1852kW.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### ANEXO II: CÁLCULO DE SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA

El agua desalinizada se produce en la planta ubicada en el Sitio B el cual se encuentra a una distancia aproximada de doce kilómetros de la planta electrolizadora (Ver Ilustración 1). Es necesario contar con un sistema de bombeo que pueda transportar el agua hasta el Sitio A e instalar un acueducto para realizar la operación.

#### MODELADO MATEMÁTICO Y ECONÓMICO

Para diseñar este sistema tanto hidráulica como económicamente se utilizan las ecuaciones (8) a (19) detalladas en Anexo I.

#### PARÁMETROS DE DISEÑO

El principal parámetro de diseño es el caudal de agua desalinizada requerido por la planta electrolizadora el cual irá en aumento a medida que los electrolizadores vayan sufriendo degradación por su propio uso desde un valor informado para SoL (Start of Life) a uno informado para EoL (Endo of Life). Los consumos de agua informados por el proveedor de la planta son los siguientes:

Consumo de agua en SoL (m <sup>3</sup> /h/MW)	1
Consumo de agua en EoL (m <sup>3</sup> /h/MW)	1.66

El sistema se diseña para el estado End of Life por lo que se estima un caudal total de 3500m<sup>3</sup>/h de agua desalinizada a bombear desde el Sitio B al Sitio A.

La planialtimetría es la misma que la considerada en el Anexo I, solo que el punto inicial es el Sitio B y el punto final el Sitio A y que no se considera el tramo de la zona portuaria:

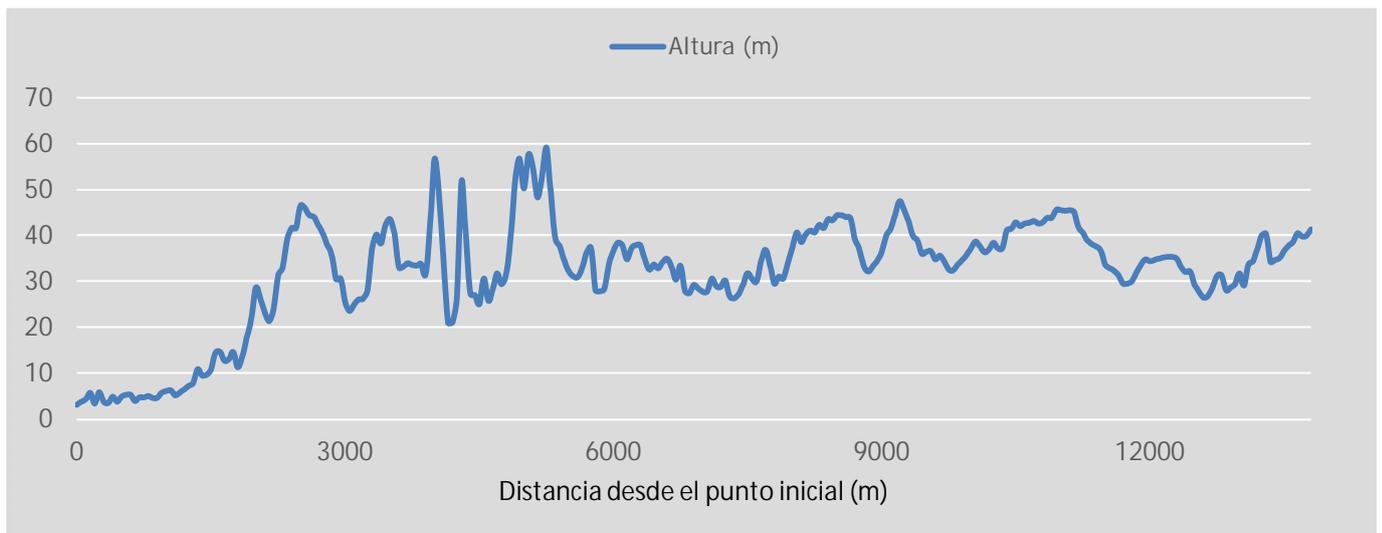


Ilustración 8: Planialtimetría del Corredor Sitio B a Sitio A

El límite de velocidad para el acueducto es mayor que el considerado para un amonio ducto por ser otro fluido. Se considera un valor límite de 4,5 m/s [19].

### Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

El material utilizado es Acero al Carbono ASTM A 106 Gr. B, material estándar en la industria para agua e hidrocarburos sin requerimientos especiales. Los parámetros necesarios para la estimación económica se obtienen de catálogos de internet [20]

#### RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, los resultados obtenidos para diferentes diámetros de ducto:

Tabla 11: Resultados modelado hidráulico Acueducto

Diámetro Acueducto (in)	Variable	Consumo End of Life
		Caudal (m <sup>3</sup> /h)
		3500
32	<i>Pres. Desc (barg)</i>	6.04
	<i>Velocidad (m/s)</i>	1.95
28	<i>Pres. Desc (barg)</i>	9.70
	<i>Velocidad (m/s)</i>	2.54
26	<i>Pres. Desc (barg)</i>	13.48
	<i>Velocidad (m/s)</i>	2.95
24	<i>Pres. Desc (barg)</i>	19.48
	<i>Velocidad (m/s)</i>	3.47

El ducto de 24'' de diámetro nominal arroja presiones de descarga de bomba muy cercanas al límite presiones admisibles para series #150 de bridas. Esto implica que habría que utilizar sistemas de cañerías mucho más robustos encareciendo notablemente tanto el ducto como la estación de bombeo por lo que se descarta esta alternativa.

A continuación, los resultados de la estimación de costos:

Tabla 12: Resultados modelado económico Acueducto

Diámetro Amonio ducto (in)	Variable	Consumo End of Life
		Caudal (m <sup>3</sup> /h)
		3500
32	<i>Costo Bomba (USD)</i>	455,748
	<i>Costo Línea (USD)</i>	18,581,137
	<i>Costo Total (USD)</i>	19,036,885
28	<i>Costo Bomba (USD)</i>	632,159
	<i>Costo Línea (USD)</i>	15,918,799
	<i>Costo Total (USD)</i>	16,550,959
26	<i>Costo Bomba (USD)</i>	800,154
	<i>Costo Línea (USD)</i>	14,780,854
	<i>Costo Total (USD)</i>	15,581,008

### Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

Al igual que en el caso del amonio ducto, la alternativa más económica resulta ser la de menor diámetro ya que el costo del sistema de bombeo es mucho menor que el del ducto. Se selecciona entonces el acueducto de 26'' de diámetro nominal.

La potencia requerida de la bomba se estima utilizando la ecuación (14) y los datos reportados en la Tabla 11 para la opción del ducto de 26'' de diámetro y se obtiene un valor de 2185kW.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### ANEXO III: CÁLCULO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

El almacenamiento de amoníaco se hará en tanques criogénicos que cuenten con unidad de recuperación de vapores. Estas unidades mantienen la temperatura del amoníaco para mantenerlo en estado líquido de forma similar a como funciona un refrigerador: toman los vapores que se generan por la absorción de calor del ambiente y los comprimen para condensarlos y reinyectarlos al tanque como líquidos enfriados.

#### MODELADO MATEMÁTICO Y ECONÓMICO

El cálculo del volumen necesario de amoníaco se hará modelando la evolución del volumen a lo largo del tiempo. Se calcula el volumen día a día considerando la entrada (producción desde la planta de amoníaco) y la salida (carga al barco luego de una determinada cantidad de días) y asegurando que nunca sea insuficiente ni genere inconvenientes.

Se realizará un primer modelado económico utilizando la siguiente ecuación [3] para tanques criogénicos de doble pared:

$$C_{Tanques} = (456USD)M \quad (20)$$

Siendo:

M: Toneladas de amoníaco a almacenar.

#### PARÁMETROS DE DISEÑO

El objetivo es elegir un volumen óptimo tomando dos principales hipótesis:

- El sistema debe estar preparado para cargar un barco de 93000m<sup>3</sup> en menos de 23hs de forma tal de no generar extra-costos. Los tanques deben contar con ese volumen al momento de la llegada del navío ya que el caudal de producción de amoníaco (alimentación al tanque) es notablemente inferior al de carga al barco (salida del tanque) por lo que no se puede contar con la producción simultánea a la carga.
- Por otro lado, los tanques de almacenamiento deben tener un margen por sobre el volumen del barco debido a que en caso de que el mismo se retrase la falta de margen puede generar la parada de producción de amoníaco por falta de pulmón de recepción, lo cual generaría grandes pérdidas.

El margen de días de producción de amoníaco a considerar por sobre el volumen de un barco no se encuentra claramente definido en la bibliografía. Se considera un margen mínimo de 7 días de producción tomando criterios internos de la compañía "Green Ammonia Future Industries" o sea 49087m<sup>3</sup>.

El barco considerado es el Very Large Ammonia Carrier que cuenta con una capacidad de 93000m<sup>3</sup>. La planta de amoníaco tarda 13.3 días en producir ese volumen, por lo que se considera que el puerto recibirá un barco cada aproximadamente 14 días.

Los caudales de entrada y salida para los tanques son:

- Caudal de Entrada: Producción de Amoníaco de 4725 tpd o 292.2 m<sup>3</sup>/h.
- Caudal de Salida: Carga de Amoníaco al barco de 4043 m<sup>3</sup>/h.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

### RESULTADOS OBTENIDOS

Como se detalló previamente el margen mínimo requerido en volumen por sobre el del barco es de  $49087\text{m}^3$  o sea que el volumen mínimo de almacenamiento debe ser de  $142087\text{m}^3$ . Los volúmenes comerciales de tanques de este tipo son de  $45000\text{m}^3$  o  $50000\text{m}^3$ , por lo que se considera un volumen de  $150000\text{m}^3$  correspondiente a tres tanques de  $50000\text{m}^3$ .

La evolución del volumen a lo largo del tiempo para una frecuencia de barcos de 14 días es la siguiente:

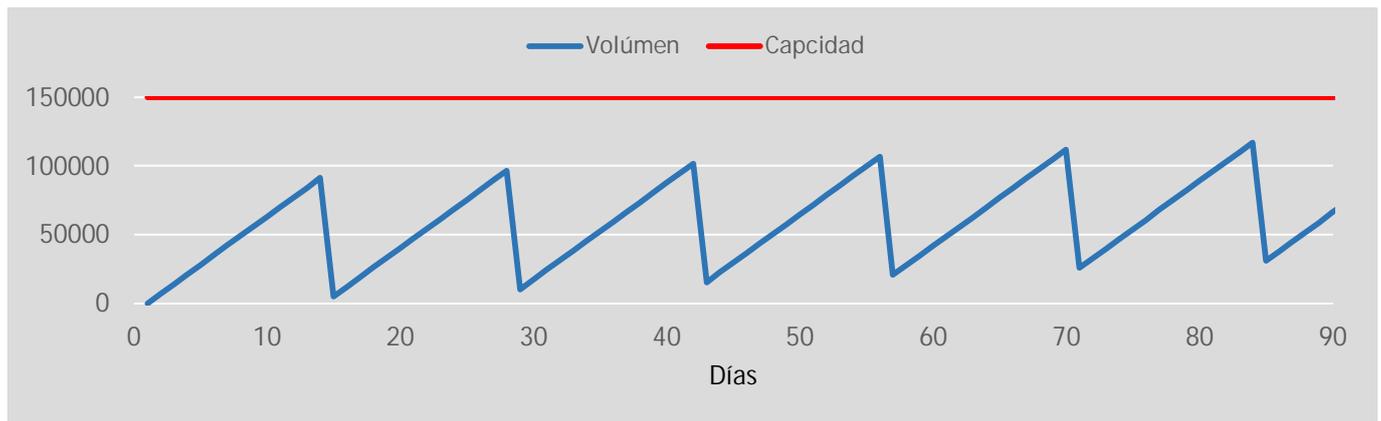


Ilustración 9: Evolución del volumen de amoníaco

En la ilustración se observan los tanques siendo alimentados con la producción diaria de amoníaco y la caída abrupta de volumen cuando se realiza la carga de un barco. El sistema tiene suficiente margen como para que el barco se atrase 7 días, tal como se especificó anteriormente.

Para este diseño el costo total de los tanques de amoníaco es de USD 94,396,365. Vale aclarar que la fuente bibliográfica consultada tiene más de veinte años desde su publicación por lo que la estimación económica puede no ser confiable. Se intentan conseguir precios en el mercado brasilero para mejorar este valor.

## Planta de Producción de Amoníaco Verde: Ingeniería Conceptual

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEA, *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*, 2019.
- [2] Z. Wan, Y. Tao, J. Shao, Y. Zhang y H. You, «Ammonia as an effective hydrogen carrier and a clean fuel for solid oxide fuel cells,» *Energy Conversion and Management*, vol. 228, 2021.
- [3] M. Appl, *Ammonia Principles and Industrial Practice*, Weinheim: Wiley-VCH, 1999.
- [4] T. P. Hignett, «Transportation and Storage of Ammonia,» de *Fertilizer Manual*, Springer Science+Business Media, 1985.
- [5] G. Thomas y G. Parks, «Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy,» 2006.
- [6] M. Reuß, T. Grube, M. Robinius, P. Preuster, P. Wasserscheid y D. Stolten, «Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model,» *Applied Energy*, vol. 200, pp. 290-302, 2017.
- [7] J. F. Manwell, J. G. McGowan y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Segunda ed., John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [8] E. R. Morgan, *Techno-Economic Feasibility Study of Ammonia Plants Powered by Offshore Wind*, Massachusetts: University of Massachusetts Amherst, 2013.
- [9] Gate Terminal, *LNG Carrier Master's Marine Services Manual*, 2022.
- [10] Green Hydrogen Organisation (GH2), *Green Hydrogen Standard*, 2023.
- [11] G. S. Lele, «Ammonia Storage: Selection & Safety Issues,» *Chemical Industry Digest*, pp. 85-90, Mayo 2008.
- [12] M. Hafner y G. Luciani, *The Palgrave Handbook of International Energy Economics*, Cham: Palgrave Macmillan, 2022.
- [13] L. Morais, «Renewables Now,» 2023. [En línea]. Available: <https://renewablesnow.com/news/brazil-sets-price-cap-for-may-27-auction-782505/>.
- [14] W. B. Hopper, «The Two-K Method Predicts,» *Chemical Engineering*, 24 Agosto 1981.
- [15] D. W. Green y R. H. Perry, *Perry's Chemical Engineer Handbook*, Octava ed., McGraw-Hill, 2008.
- [16] J. R. Couper, *Process Engineer Economics*, New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [17] Reliable Pipes & Tubes Ltd., «ASTM A333 GRADE 6 PIPE SUPPLIERS,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.reliablepipestubes.com/astm-a333-grade-6-1-3-pipes-low-temperature-tubes-supplier/>.
- [18] E. S. Menon, *Gas Pipeline Hydraulics*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.
- [19] Green Ammonia Future Industries, *Engineering Requirements for Piping*, 2022.
- [20] Reliable Pipes & Tubes Ltd., «ASTM A106 GRADE B PIPE SUPPLIERS,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.reliablepipestubes.com/astm-a106-grade-b-a-seamless-welded-pipes-tubes-supplier/>.
- [21] M. Koike, H. Miyagawa, T. Suzuoki y K. Ogasawara, «Ammonia as a hydrogen energy carrier and its application to internal combustion engines,» Toyota Central R&D Labs., Japan, 2012.
- [22] «Pecém: Complexo Industrial e Portuário,» [En línea]. Available: <https://www.complexodopecem.com.br/>.
- [23] V. Parmar, J. Manwell y J. McGowan, «Ammonia Production from a Non-Grid Connected Floating Offshore Windfarm,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1452, nº 012015, 2020.