



Buenas prácticas en el desarrollo temprano de una planta de amoníaco de bajas emisiones



THE WORLD BANK



FENOGE



# Contenido

Introducción .....	1
1 Estado del arte de la producción de amoníaco a través de electrolisis .....	3
1.1 Descripción general de la producción de amoníaco .....	3
1.2 Descripción detallada de la producción de amoníaco .....	5
1.2.1 Tratamiento de agua de entrada .....	6
1.2.2 Producción, almacenamiento y transporte de hidrogeno .....	7
Producción de hidrógeno a través de electrólisis .....	7
Almacenamiento de hidrógeno .....	8
Transporte de hidrógeno .....	9
1.2.3 Síntesis de amoníaco.....	9
Producción de nitrógeno en unidad de separación de aire .....	10
Proceso de Haber-Bosch – síntesis de amoníaco .....	10
Datos económicos del amoníaco .....	11
2 Dimensionamiento de equipos: metodología y configuración básica .....	13
2.1.1 Análisis de holístico de sistemas <i>Power-to-X</i> a través del <i>Systems Engineering</i> .....	13
2.1.2 Herramienta de optimización ANDREA .....	13
2.1.3 Metodología para optimización de sistemas <i>Power-to-Ammonia</i> .....	15
1. Identificación de componentes del sistema <i>Power-to-Ammonia</i> .....	15
2. Selección y evaluación de los escenarios .....	15
3. Selección de la configuración de diseño .....	16
2.1.4 Resultados de ANDREA .....	16
3 Conceptualización del modelo de negocio .....	19
3.1 Evaluación del modelo de negocio .....	20
3.1.1 Estructura de capital del proyecto .....	21
3.1.2 Acceso a incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014.....	21
3.1.3 Variación del precio de venta del amoníaco y los fertilizantes .....	22
3.2 Consideraciones finales sobre el modelo de negocio .....	23
4 Evaluación de riesgos e impactos ambientales y sociales .....	26
4.1 Evaluación de riesgos .....	26
4.2 Identificación de impactos ambientales y sociales .....	29
4.2.1 Análisis de impactos ambientales.....	29

4.2.2	Análisis de impactos sociales.....	31
5	Buenas prácticas del proceso de cotización .....	33
6	Conclusiones .....	35
	Bibliografía .....	37

## Figuras

Figura 1 Producción de amoníaco por fuente. (AEA; IRENA, 2022)	3
Figura 2. Producción de amoníaco proyectada por AEA. Considera demanda por materia prima en escenario BaU (Business as usual por sus siglas en inglés) hasta 2050 (AEA, 2022)	4
Figura 3. Cadena de valor de amoníaco renovable	6
Figura 4. a) Precios actuales y proyectados de amoníaco gris en Europa occidental y la Costa del Golfo de Estados Unidos. b) Precios de amoníaco y LNG en hubs principales (Argus, 2016) (U.S. Energy Information Administration, 2022)	12
Figura 5. Proyecciones de demanda mundial de amoníaco. Fuente: (AEA; IRENA, 2022)	12
Figura 6. Sistema energético ANDREA.	14
Figura 6. Ejemplo de resultados obtenidos de ANDREA en el dimensionamiento y perfiles horarios.	16
<i>Figura 6. Ejemplo de resultados obtenidos de ANDREA del costo nivelado de amoníaco (LCOA) y su distribución en costos de capital (CAPEX) y de operación (OPEX).</i>	18
Figura 7. Estructura del modelo de negocio planteado para la planta de amoníaco de bajas emisiones.	19
Figura 8 Ejemplo de una matriz de identificación de impactos ambientales para una planta de amoníaco	30

## Tablas

---

Tabla 1. Ventajas y desventajas técnicas de la tecnología de electrólisis Hincio (2023).	8
Tabla 2. Especificaciones técnicas de la unidad de separación de aire criogénica (Häring, 2008).	10
Tabla 3. Especificaciones técnicas proceso Haber-Bosch (IRENA, Global Trade Hydrogen, 2022).	11
Tabla 4. Listado de los 15 riesgos que presentan una mayor relevancia (probabilidad x impacto), durante el desarrollo de un proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones	26
Tabla 5 Ejemplo de posibles factores ambientales	29



## INTRODUCCIÓN

---

El amoníaco es uno de los compuestos químicos más comercializados a nivel mundial por su rol en la síntesis de fertilizantes y otras aplicaciones de la industria química. La síntesis de amoníaco requiere hidrógeno como materia prima esencial. En Colombia, la industria de fertilizantes es el segundo mayor consumidor de hidrógeno después de la refinación de petróleo (Ministerio de Energía, 2021). Esta industria se caracteriza por su alta dependencia de importaciones de países como Venezuela y Trinidad y Tobago.

En la actualidad, gran parte de la producción de amoníaco a nivel mundial se da a partir de metano, y acompañado de emisiones de dióxido de carbono. De modo que, la síntesis de amoníaco está asociada con la emisión de cerca 500 millones toneladas de dióxido de carbono cada año, que equivalen al 1% de las emisiones de efecto invernadero a nivel global. El hidrógeno renovable ha surgido como una alternativa prometedora para producir amoníaco de manera sostenible. A través del proceso de electrólisis, que utiliza únicamente agua y electricidad proveniente de fuentes renovables, se puede obtener hidrógeno sin emisiones asociadas.

Considerando la dependencia de fertilizantes importados, Colombia tiene la oportunidad de fortalecer la producción doméstica utilizando su potencial de hidrógeno renovable. Este reporte presenta buenas prácticas técnicas y económicas para la producción de amoníaco de bajas emisiones en Colombia.

Este reporte comienza por contextualizar el papel que juega la producción de amoníaco en los esfuerzos globales de descarbonización. Después hace un recorrido exhaustivo por el proceso de producción de amoníaco bajo en emisiones, abordando todos los componentes en la cadena de valor, desde la producción de electricidad renovable hasta el transporte y distribución del químico. Se proporciona una visión integral de aspectos técnicos, permitiendo una comprensión completa de las tecnologías involucradas.

Adicionalmente, se presenta una metodología para el dimensionamiento de sistemas *Power-to-Ammonia*, ilustrando la interacción entre las variables clave de este tipo de proyectos. Esta descripción incluye un desglose de indicadores económicos como los costos nivelados del producto que facilita la comparación entre diferentes configuraciones del sistema.

Después de abordar la metodología para dimensionar un proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones, el siguiente paso es la conceptualización de un modelo de negocio asociado con el proyecto. Como tal, se describe de manera general un modelo de negocio típico de proyectos de amoníaco y fertilizantes, se explican las diferentes etapas clave dentro de la cadena de valor que deben gestionarse, así como las dos fuentes de ingresos que se pueden generar. Además, se analizan aspectos que pueden impactar directamente en la viabilidad financiera del proyecto, como la estructura de capital y las condiciones de la deuda, la aplicación de incentivos tributarios derivados de la Ley 1715 de 2014 y, un factor determinante, el precio de venta de los productos finales necesario para obtener resultados positivos que permitan a los accionistas o desarrolladores lograr rentabilidades atractivas durante la ejecución del proyecto.

Así mismo, el análisis se complementa con la identificación y evaluación de riesgos y de impactos ambientales y sociales. Se resaltan los riesgos asociados con las fluctuaciones típicas del mercado del mercado de amoníaco que abarcan desde los proveedores de equipos

hasta los potenciales consumidores, y condiciones desfavorables de financiación. Los impactos ambientales y sociales son especificados a la ubicación de terreno, en general se sugiere, analizar características específicas del terreno, a fin de identificar medidas de mitigación y adaptación. y mecanismos que permitan equidad género en los sectores químico y de energías.

Finalmente, el reporte presenta lineamientos para procesos de cotización en etapas preliminares del desarrollo de un proyecto de producción. Factores como el nivel de involucramiento de los grupos de interés, y su reconocimiento en el sector energético, robustez del proyecto conceptualizado y el manejo de expectativas y riesgos son aspectos clave para la ejecución exitosa.

# 1 ESTADO DEL ARTE DE LA PRODUCCIÓN DE AMONÍACO A TRAVÉS DE ELECTROLISIS

Esta sección presenta las bases conceptuales de la producción de amoníaco. En un principio, se presenta un resumen del contexto y generalidades de la producción de amoníaco y su impacto en las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial. El capítulo posteriormente revisa la cadena de valor del amoníaco verde, centrada en las tecnologías de desanilización o desmineralización del agua, según aplique, producción de hidrógeno, y síntesis de amoníaco. Se presenta una descripción conceptual de las etapas y especificidades tecno-económicas.

En el caso del hidrógeno, se describe a detalle las tecnologías de electrolisis para su producción, así como las alternativas más usadas para almacenamiento y transporte. En cuanto al amoníaco, se analizan las unidades de separación de aire para la producción de nitrógeno (ASU, por sus siglas en inglés) y del reactor Haber-Bosch, donde se lleva a cabo la síntesis del amoníaco.

## 1.1 Descripción general de la producción de amoníaco

El amoníaco es un producto de alta relevancia industrial a nivel mundial, ya que alrededor del 85% se utiliza para producir fertilizantes como la urea y el nitrato de amonio. También se usa en aplicaciones en industrias como minería, farmacéutica, refrigeración, plásticos y textiles.

La producción de amoníaco implica principalmente la reacción de nitrógeno e hidrógeno mediante el proceso Haber-Bosch. El nitrógeno, que es abundante en el aire atmosférico, es capturado por la ASU, y el hidrógeno se puede generar a través de varios métodos. En la actualidad, la producción de hidrógeno se basa en el gas natural y en el proceso de reformado de metano con vapor, generando importantes emisiones de CO<sub>2</sub>. Por esta razón, la mayor parte de la producción mundial de amoníaco depende de combustibles fósiles, principalmente gas natural, como se observa en la Figura 1, lo que emitan alrededor de 500 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> cada año.

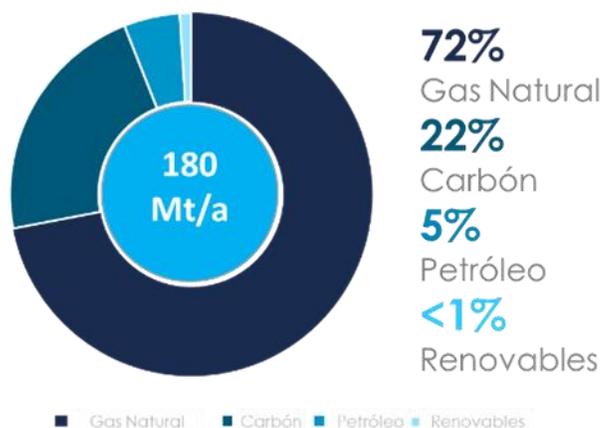


Figura 1 Producción de amoníaco por fuente. (AEA; IRENA, 2022)

En consecuencia, existe una creciente necesidad de transitar de procesos de producción de hidrógeno con importantes emisiones de CO<sub>2</sub> a aquellos que las minimicen o eliminen. Aquí la electrólisis es crucial, ya que usa electricidad para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. Si la electricidad que alimenta el electrolizador proviene de fuentes renovables, tanto el hidrógeno

como el amoníaco producido podrían considerarse verdes o renovables. Entre las fuentes de energía renovable más comunes se encuentran la solar y la eólica, pero también pueden derivarse de fuentes hidroeléctricas, geotérmicas, mareomotrices o de biomasa.

Aparte de su uso para la producción de fertilizantes nitrogenados, la producción de hidrógeno y amoníaco bajo en emisiones abre la puerta al surgimiento de nuevos usos para estas dos sustancias, con el fin de sustituir combustibles e insumos contaminantes por soluciones que contribuyan a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por ejemplo, el amoníaco podría ser usado como combustible para buques en la descarbonización del sector de transporte marítimo. Además, por los desafíos que presenta el transporte de hidrógeno debido a su baja densidad volumétrica, se ha estudiado que el amoníaco funcione como vector de energía para transportar hidrógeno a largas distancias y para aplicaciones y usos finales a gran escala. Por último, si bien podría ser un uso poco competitivo comparado con otras alternativas de descarbonización, el amoníaco también tiene potencial para ser usado como combustible en calderas, turbinas y motores para generar calor y electricidad sin producir gases de efecto invernadero<sup>1</sup> (pero sí NO<sub>x</sub> que pueden ser perjudiciales para la salud).

Los usos del amoníaco como combustible para el sector de transporte marítimo y como vector energético para transportar y almacenar hidrógeno renovable serán de especial importancia para limitar el calentamiento global a 1.5°C para mediados de siglo como se muestra en la siguiente figura (AEA, 2022). De esta manera, junto con los usos presentes, los usos futuros contribuirán a que el amoníaco verde juegue un papel crucial en la transición energética mundial.

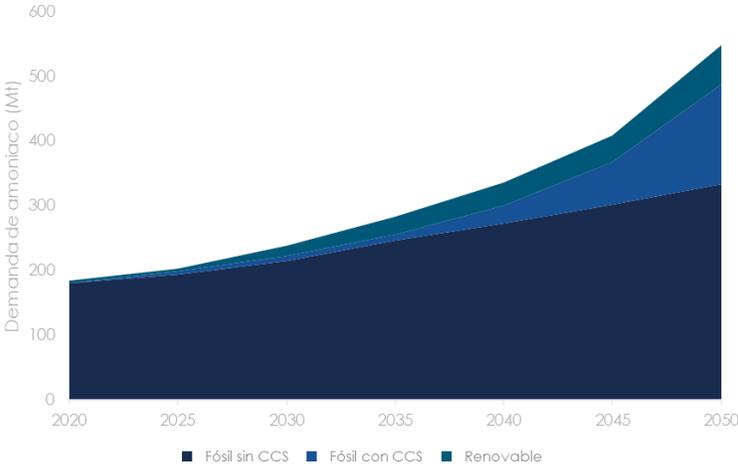


Figura 2. Producción de amoníaco proyectada por AEA. Considera demanda por materia prima en escenario BaU (Business as usual por sus siglas en inglés) hasta 2050 (AEA, 2022)

En la siguiente sección, se describirá con mayor detalle cada una de las etapas en la cadena de valor, incluyendo descripción detallada de procesos, tecnologías, insumos y productos de cada etapa, requerimientos energéticos y costos asociados.

<sup>1</sup> Ver por ejemplo: [https://www.jera.co.jp/en/news/notice/20230616\\_1503](https://www.jera.co.jp/en/news/notice/20230616_1503)

## 1.2 Descripción detallada de la producción de amoníaco

La cadena de valor de un proyecto de síntesis de amoníaco a partir de electrólisis de energía renovable comprende varios procesos y tecnologías, incluida la generación de electricidad renovable, la transmisión eléctrica de alto voltaje, la producción, compresión y almacenamiento de hidrógeno, la producción de nitrógeno, la síntesis de amoníaco y su transporte y almacenamiento. Entre los componentes clave se encuentran los siguientes:

- **Generación de energía renovable:** Se utiliza una fuente de energía renovable, como la solar o la eólica, para generar electricidad, que luego se eleva a alto voltaje y se transporta a través de líneas eléctricas de alto voltaje.
- **Tratamiento del agua de entrada:** El agua es fundamental para la producción de hidrógeno ( $H_2$ ) a través de electrólisis. Debe ser acondicionada para los requerimientos fisicoquímicos de la producción, y los tratamientos dependerán del tipo de agua suministrada (superficial, salada, entre otros).
- **Electrólisis del agua:** Un electrolizador divide el agua en hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) utilizando un cátodo y un ánodo en un medio acuoso. Cuando se aplica una corriente eléctrica, los iones de hidrógeno se reducen en el cátodo, mientras que los iones de oxígeno se oxidan en el ánodo. El hidrógeno resultante de la electrólisis puede almacenarse a temperatura ambiente. También, puede comprimirse a presiones más altas (200 bar) al salir del electrolizador y almacenarse en estado gaseoso a temperatura ambiente.
- **Síntesis de amoníaco:** Está compuesto por las unidades de Separación de Aire "ASU" y el reactor de Haber-Boch. El nitrógeno es sintetizado en la ASU. Industrialmente, la destilación criogénica es el método estándar y rentable. El hidrógeno, producido a través de la electrólisis, y el nitrógeno extraído del aire se mezclan en un reactor de síntesis de amoníaco. Se emplea el proceso Haber-Bosch, que implica la compresión y el calentamiento de hidrógeno y nitrógeno a altas temperaturas en presencia de un catalizador de hierro o promovido por el hierro. El amoníaco gaseoso sintetizado en el reactor es acondicionado para su almacenamiento y transporte, dependiendo de los requerimientos operacionales.

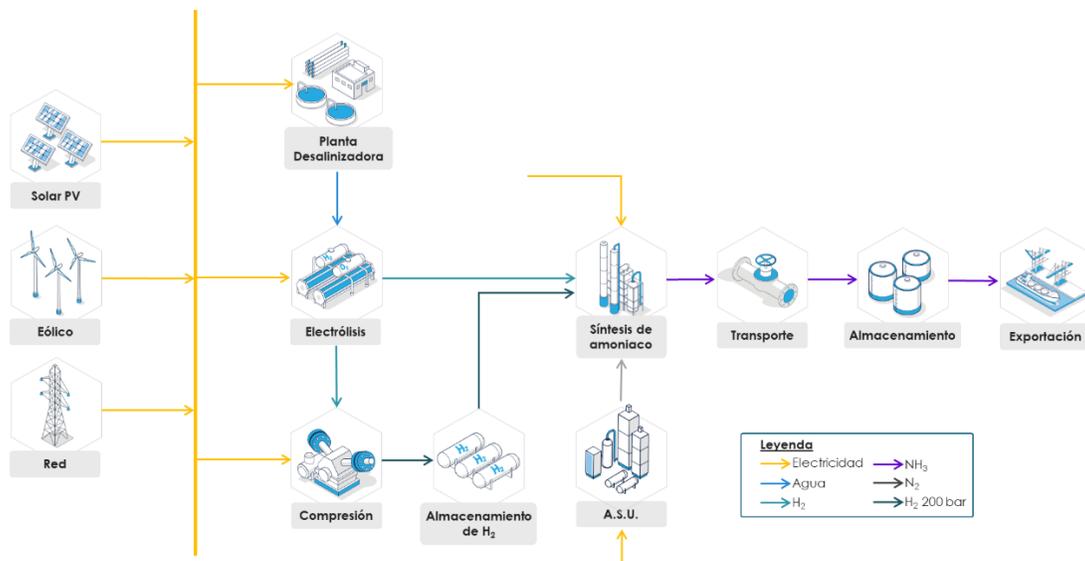


Figura 3. Cadena de valor de amoníaco renovable

### 1.2.1 Tratamiento de agua de entrada

El agua utilizada en la electrólisis debe tener una alta pureza para garantizar el buen funcionamiento del proceso. Los fabricantes de electrolizadores comerciales suelen especificar un nivel mínimo de calidad del agua en términos de conductividad, que puede ser entre 0.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Uno de los procesos más robustos de tratamiento se presenta cuando el agua usada es de mar con un alto contenido de minerales. A continuación, se describen las etapas del proceso requeridas para su desalinización.

La desalinización se entiende como el proceso por el cual el agua salobre reduce su concentración de sal o se separa de ella hasta convertirse en agua dulce, apta para beber y otros fines domésticos (Comité científico de cambio climático, 2022). Una planta desalinizadora suele incluir:

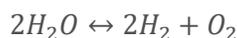
- **Suministro de agua**, compuesta por bombas y tuberías para extraer agua de la fuente (agua de mar o salobre). El suministro puede tomarse de aguas superficiales o subterráneas. En el caso de las superficiales son más usadas por sus menores costos operativos. Mientras que, las subterráneas, principalmente pozos costeros y galerías de infiltración, tienden a tener un mayor costo de construcción y operación (Comité científico de cambio climático, 2022).
- **Pretratamiento** consiste en la filtración de agua para remover componentes sólidos y la adición de sustancias químicas para reducir la precipitación salina y la corrosión del sistema. Un pretratamiento adecuado mejora el rendimiento de la planta al mejorar la calidad del agua bruta, lo que ayuda a mitigar el ensuciamiento de la membrana. Esto, a su vez, mantiene una presión de funcionamiento óptima, lo que se traduce en un menor consumo de energía y una reducción de los costes. Los compuestos utilizados para el pretratamiento incluyen coagulantes, biocidas, bisulfitos, antiincrustantes para controlar la acumulación de carbonato de calcio, sulfato y otras sales en la membrana, e inhibidores de corrosión.

- **Desalinización**, donde se eliminan las sales disueltas del agua. Hay tres categorías principales: evaporación y condensación. En el caso de las tecnologías de filtración o membranas, todas las soluciones se basan en una membrana semipermeable, una capa que presenta un comportamiento de cruce diferente según el tamaño o naturaleza de las moléculas o la naturaleza de las moléculas. En este contexto, la ósmosis inversa es la tecnología más utilizada para la desalinización. El principal reto al que se enfrentan las plantas que utilizan la tecnología de membranas semipermeables radica en la zona de pretratamiento y en la sensibilidad de la membrana al ensuciamiento. Además, la temperatura de alimentación no debe exceder los 40 °C para evitar daños térmicos en la membrana. Otras técnicas, como la ósmosis directa (FO), la nanofiltración (NF) y la deionización capacitiva (CDI), se encuentran en fase de desarrollo (Talaiepour et al., 2017).
- **Después del tratamiento**, para cumplir con los requisitos de los usos finales del agua, se llevan a cabo varios procesos, como el ajuste del pH con sales seleccionadas, la remineralización de calcio y magnesio, la eliminación de boro, la desgasificación de dióxido de carbono y otros gases, y la desinfección de microorganismos.

## 1.2.2 Producción, almacenamiento y transporte de hidrogeno

### Producción de hidrógeno a través de electrólisis

La electrólisis es un proceso químico que utiliza electricidad para descomponer el agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno. Este procedimiento utiliza un electrolizador, donde una corriente eléctrica pasa a través del agua, lo que resulta en una reacción electroquímica. Durante esta reacción, las moléculas de agua se desintegran en sus componentes cargados positiva y negativamente, lo que facilita la separación del hidrógeno y el oxígeno.



Actualmente, existen cuatro tecnologías para la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua, cada una en diferentes etapas de desarrollo. Estas tecnologías incluyen la electrólisis alcalina, la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM), la electrólisis de óxido sólido (SOEC) y la electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM).

- **Electrólisis alcalina** es la tecnología con mayor adopción a nivel industrial debido a su menor costo de inversión y, en general, a su mayor eficiencia que otras tecnologías de electrólisis, con la excepción de SOEC, que en determinados proyectos piloto ha demostrado alcanzar una tasa de conversión del 80%.
- **Tecnología PEM** se ha desarrollado principalmente en aplicaciones con limitaciones de espacio, ya que es más compacta que los electrolizadores alcalinos, y más efectiva para aplicaciones que requieren una rápida puesta en marcha y apagado.
- **En la tecnología SOEC**, dado que se necesita un suministro de calor externo, es deseable acoplar estos sistemas de electrólisis con una fuente de calor residual. Además, no es una tecnología madura, por lo que sus costos son más altos que AWE y PEM. A largo plazo, se espera que los costes de esta tecnología disminuyan para competir con otras tecnologías de electrólisis.

- **Tecnología AEM** está en desarrollo y aún requiere una investigación significativa con respecto a nuevos materiales y configuración de celdas, para optimizar su rendimiento sin aumentar significativamente los costos de producción.

Tabla 1. Ventajas y desventajas técnicas de la tecnología de electrólisis Inicio (2023).

	Ventajas	Desventajas
ALK	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Tecnología madura</b>, que se traduce en costes comparativamente más bajos que otros diseños y disponibilidad de equipos a gran escala a corto plazo.</li> <li>▶ No requiere catalizadores nobles, lo que permite una <b>mayor vida útil del stack</b> (70.000 h en promedio).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Tiene difusión cruzada de gases <math>H_2</math> y <math>O_2</math></b> lo que obliga a mantener la operación en un rango de carga parcial limitado y bajas densidades de corriente.</li> <li>▶ <b>El uso de un electrolito corrosivo puede causar daños a los componentes</b> de la pila y las tuberías y dar impurezas al hidrógeno de salida.</li> <li>▶ En los equipos atmosféricos hay una <b>baja flexibilidad de operación</b>.</li> </ul>
PEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Unidad de menor tamaño con <b>mayor densidad de corriente</b>.</li> <li>▶ El material polimérico de la membrana reduce el cruce de gases, permite un mayor rango de potencia de entrada y operación a presiones más altas.</li> <li>▶ Agua es el único subproducto de la corriente de hidrógeno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Requiere materiales más sofisticados</b> dado el ambiente ácido dentro de la pila (por ejemplo, titanio) y electrodos a base de metales nobles (por ejemplo, iridio, platino), lo que aumenta el costo del equipo.</li> <li>▶ La mayoría de las pilas actuales no han alcanzado la escala de MW.</li> <li>▶ <b>Vida útil del stack más corta</b> en comparación con la electrólisis alcalina (50.000 h de media)</li> </ul>
SOEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ No requiere catalizadores nobles</li> <li>▶ <b>Permite co-electrolisis de <math>H_2</math> y <math>CO_2</math></b>, produce syngas (<math>H_2+CO</math>) que puede ser utilizado para sintetizar e-fuels.</li> <li>▶ Puede tener <b>mayores eficiencias</b> (+95%HHV) y una <b>densidad de corriente nominal alta</b> que reduce el tamaño del stack</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Se necesita una fuente de calor adicional</b> para alcanzar las altas temperaturas necesarias para su funcionamiento. Se recomienda la integración del electrolizador en un proceso exotérmico para evitar reducciones de eficiencia.</li> <li>▶ <b>Requiere largos tiempos de encendido y apagado</b>, por lo que debe trabajar en operaciones con pocos ciclos de arranque y parada durante el año.</li> <li>▶ <b>Altos costos de la tecnología</b>, adoptada solo a escala piloto</li> </ul>
AEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Permite obtener hidrogeno de alta pureza sin uso de metales nobles.</b></li> <li>▶ <b>Puede operar a altas presiones</b>, reduciendo el tamaño de celda.</li> <li>▶ Tiene una respuesta dinámica rápida a los cambios de suministro de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Vida útil de stack corta</b> (2.000 – 30.000 h)</li> <li>▶ <b>Tecnología en desarrollo, adopción a escala de kW.</b></li> <li>▶ <b>Se requieren mejoras en diseño</b> para resolver la inestabilidad existente de la membrana del equipo.</li> </ul>

## Almacenamiento de hidrógeno

Almacenar el hidrógeno comprimido en estado gaseoso suele ser la mejor opción. Solo es necesario un tanque presurizado y un adecuado sistema de seguridad. La principal desventaja es la baja capacidad de almacenamiento como consecuencia de la densidad del gas. Por esta razón, el hidrógeno se comprime a presiones de hasta 1000 bar para ser almacenado. Dependiendo de la aplicación y la presión, existen 4 opciones de almacenamiento:

**Tipo I:** tanque metálico, generalmente acero, usado para aplicaciones industriales estacionarias. Para hidrógeno se usa una presión de 200 bar y es el tipo de almacenamiento más económico.

**Tipo II:** tanque fabricado de forro metálico recubierto en resina de fibra compuesta usado para aplicaciones industriales estacionarias con presiones entre 200 y 350 bar.

**Tipo III:** tanque fabricado de forro metálico recubierto en resina de fibra compuesta usado para aplicaciones móviles con presiones entre 350 y 700 bar.

**Tipo IV:** tanque fabricado de forro polimérico recubierto en resina de fibra compuesta usado para aplicaciones móviles con presiones entre 700 y 1000 bar. Este tipo de tanque tiene una vida útil superior al de tipo III por su resistencia a la fatiga.

En los proyectos *Power-to-Ammonia*, los tanques comúnmente utilizados son tipo I y tipo II y tienen un costo aproximado de 600 USD/kg. Otros métodos de almacenamiento de hidrógeno incluyen: Hidrógeno líquido, cavernas de sal, yacimientos de gas agotados y acuíferos o basado en materiales como hidruros metálicos y portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHC por sus siglas en inglés).

## Transporte de hidrógeno

El hidrógeno puede transportarse en su forma pura o convertirse en derivados específicamente para fines de transporte, con la posterior reversión al hidrógeno después de ser transportado. Alternativamente, puede dirigirse hacia aplicaciones alternativas como la producción de amoníaco o combustibles sintéticos. Los principales medios de transporte son (i) Camiones de gas comprimido, (ii) Camiones de hidrógeno líquido, (iii) Ferrocarril y (iv) tuberías.

**Camiones de gas comprimido** almacenan hidrógeno en tanques de alta presión que van de 200 a 700 bar. La compresión reduce el volumen y mejora la densidad para un transporte eficiente. Equipados con características de seguridad como dispositivos de alivio de presión, sistemas de detección de fugas y tanques reforzados, estos camiones garantizan el manejo y transporte seguros de gas hidrógeno comprimido.

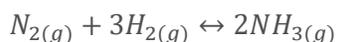
**Camiones de hidrógeno líquido** transportan hidrógeno en forma líquida (LH<sub>2</sub>) criogénica a temperaturas extremadamente bajas (-253 °C). El LH<sub>2</sub> se almacena en tanques criogénicos aislados de doble pared para minimizar la evaporación y la aparición de ebullición de hidrógeno. Las características de seguridad exigidas para el transporte de LH<sub>2</sub> abarcan sistemas de alivio de presión, mecanismos de ventilación y monitoreo de temperatura.

**Ferrocarriles** permiten transportar hidrógeno almacenado en diversas formas, como gas comprimido, hidrógeno líquido, amoníaco, metanol, hidruros metálicos o LOHC. Dada su capacidad para manejar volúmenes sustanciales y diversos tipos de carga en un solo viaje, los ferrocarriles tienen el potencial de emerger como una opción económicamente atractiva para el transporte de hidrógeno o sus derivados.

**Tuberías** ofrecen un medio continuo y eficiente para transportar grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias. Proporcionan un suministro estable y fiable a los usuarios finales, eliminando la necesidad de transporte por carretera o envío. La construcción de una nueva red de gasoductos de distribución de hidrógeno es una inversión significativa a largo plazo, puede ser rentable una vez que se transportan grandes volúmenes de hidrógeno. Una alternativa es utilizar los gasoductos de gas natural existentes, dependiendo de la configuración actual de la red y las características físicas de los gasoductos, para mezclar hidrógeno o mejorar la infraestructura existente para la distribución de hidrógeno puro.

### 1.2.3 Síntesis de amoníaco

La producción de amoníaco es un proceso fundamental en la industria, que implica la síntesis de amoníaco (NH<sub>3</sub>) a partir de nitrógeno (N<sub>2</sub>) e hidrógeno (H<sub>2</sub>) en proporciones adecuadas. Esta sustancia química es vital en diversas aplicaciones industriales, que van desde la fabricación de fertilizantes hasta la producción de productos químicos.



Si bien la reacción química que conduce a la formación de amoníaco es espontánea, requiere condiciones específicas de alta temperatura y presión, junto con la presencia de un

catalizador. El amoníaco verde se produce a partir de hidrógeno verde generado por electrólisis, como se ha explicado anteriormente.

### Producción de nitrógeno en unidad de separación de aire

La Unidad de Separación de Aire (ASU) es una tecnología que permite la separación del nitrógeno del aire. Actualmente, tres tipos principales de tecnologías facilitan esta separación: destilación criogénica, adsorción por cambio de presión (PSA) y separación por membrana. Las tres tecnologías mencionadas están disponibles comercial e industrialmente y tienen un alto nivel de madurez tecnológica. Por lo tanto, los costos no mostrarán variaciones a lo largo del tiempo, sino que variarán en función de la capacidad. Estos métodos difieren en la capacidad de producción y la pureza de los productos obtenidos. Entre estas alternativas, el proceso criogénico representa aproximadamente el 90% de la separación global de gases, ya que es el único método comercialmente práctico para la producción a gran escala.

En general, un sistema ASU criogénico consta de tres bloques principales: (i) Compresión y purificación del aire, (ii) Intercambio de calor y (iii) Destilación criogénica.

- Inicialmente, el aire atmosférico es filtrado para remover partículas de polvo y comprimido a 6 bar y enfriado a temperatura ambiente. Este proceso incluye remoción de agua y dióxido de carbono.
- Una vez purificado, el flujo de aire continua al sistema de destilación donde finalmente se usan las temperaturas de ebullición del nitrógeno y el oxígeno (-196°C y -185°C a 10 bar para nitrógeno y oxígeno, respectivamente) para obtener el nitrógeno necesario en la síntesis de amoníaco. De esta columna se obtienen dos productos: una corriente superior, compuesta principalmente por nitrógeno (el compuesto más ligero) y una mezcla de nitrógeno, oxígeno y argón inferior.
- La corriente de nitrógeno se envía a los equipos de intercambio de calor.

Las consideraciones técnicas de la destilación criogénica se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 2. Especificaciones técnicas de la unidad de separación de aire criogénica (Häring, 2008).*

	Unidad	Valor
<b>Capacidad típica</b>	barg	80-250
<b>Pureza</b>	°C	350-550
<b>Carga</b>	%	< 98
<b>Consumo eléctrico</b>	kWh/tNH <sub>3</sub>	440

### Proceso de Haber-Bosch – síntesis de amoníaco

A escala industrial, el proceso Haber-Bosch se utiliza para sintetizar amoníaco. Este método se basa en la reacción exotérmica y reversible entre hidrógeno y nitrógeno. La reacción requiere un catalizador ferroso y funciona dentro de un rango de temperatura de 350-550 °C y un rango de presión de 10-30 MPa.

La tasa de conversión suele oscilar entre el 15% y el 20% para cada paso individual. Por lo tanto, se requiere un reciclaje interno significativo para lograr una alta conversión general (hasta el 98%). Por esta razón, el proceso de producción de amoníaco se conoce comúnmente como ciclo de síntesis de amoníaco, que implica las siguientes etapas principales del proceso:

- Conversión de hidrógeno en amoníaco.
- Recuperación del calor residual y enfriamiento y condensación del gas convertido.
- Compresión del gas de recirculación.
- Separación del producto amoniacal.

Este proceso consiste en tomar corrientes de hidrógeno y nitrógeno, mezclándolas en una proporción molar de 3:1. En primer lugar, el nitrógeno se mezcla con hidrógeno a 30 barg. La corriente se calienta en el intercambiador de calor y luego ingresa a la sección de reacción. Esto se hace con el objetivo de gestionar el comportamiento exotérmico de la reacción y aumentar la conversión del proceso.

La eficiencia del proceso Haber-Bosch es de alrededor del 98 % de conversión de H<sub>2</sub>. El consumo de energía de una planta de producción de amoníaco varía y suele oscilar entre 0,5 y 2 kWh/kg de NH<sub>3</sub> (IRENA, Global Trade Hydrogen, 2022).

*Tabla 3. Especificaciones técnicas proceso Haber-Bosch (IRENA, Global Trade Hydrogen, 2022).*

	Unidad	Valor
<b>Presión de operación</b>	barg	80-250
<b>Temperatura de operación</b>	°C	350-550
<b>Conversión síntesis</b>	%	< 98
<b>Consumo eléctrico</b>	kWh/tNH <sub>3</sub>	440
<b>Relación molar del syngas (H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>)</b>	-	3
<b>Presión de entrada del syngas</b>	barg	30
<b>Consumo de hidrógeno</b>	kgH <sub>2</sub> /tNH <sub>3</sub>	177
<b>Consumo de nitrógeno</b>	kgN <sub>2</sub> /tNH <sub>3</sub>	823
<b>Turndown ratio</b>	%	30
<b>Generación de calor</b>	GJ/tNH <sub>3</sub>	3,1
<b>Vida útil</b>	años	30

Debido a la toxicidad del amoníaco, las medidas de seguridad para manipularlo, almacenarlo y transportarlo incluyen sistemas de monitoreo avanzados, mecanismos de detección de fugas, planes de respuesta a emergencias y un estricto cumplimiento de las pautas regulatorias y los estándares de la industria.

En condiciones normales, el amoníaco es un gas. Industrialmente, se utiliza en estado licuado. La licuefacción ocurre a temperaturas menores a -33°C y presión atmosférica, o presiones de 7.5 bar a temperatura ambiente.

### Datos económicos del amoníaco

En la actualidad, el 98% del amoníaco producido es gris, cuyos precios presentan variabilidad significativa a escala mundial. Esto se debe a varios factores, como las fluctuaciones de la demanda, los cambios en los niveles de producción, los cambios en los costes del gas natural y los cambios en las cadenas de suministro mundiales. Las condiciones meteorológicas y los acontecimientos geopolíticos también pueden afectar los precios. Como resultado, predecir las tendencias de los precios a corto plazo puede ser un desafío, el aumento en el precio del gas natural aumenta los costos del amoníaco.

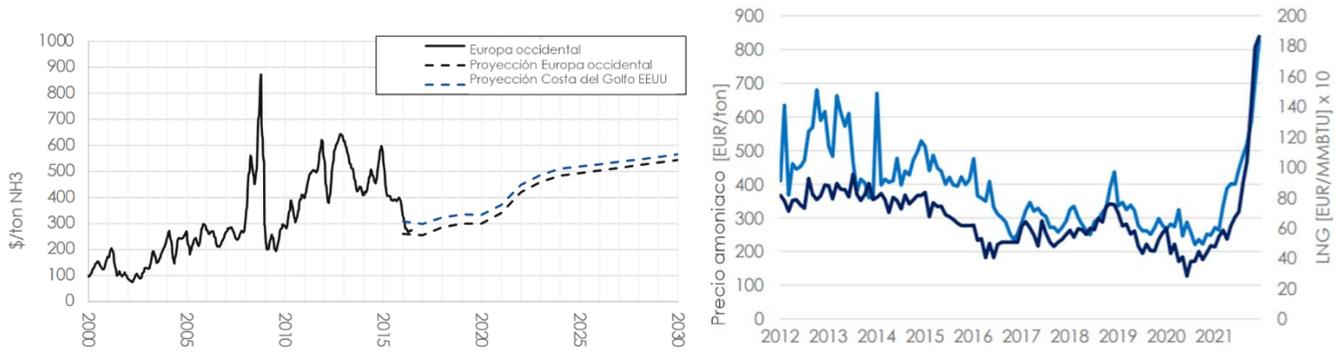


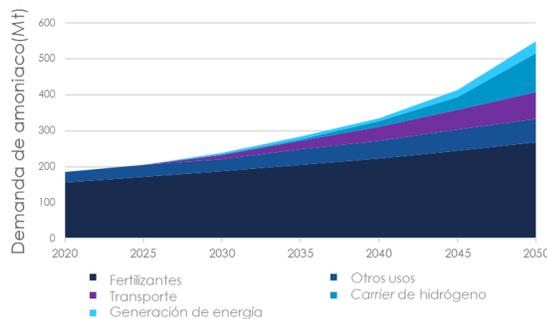
Figura 4. a) Precios actuales y proyectados de amoníaco gris en Europa occidental y la Costa del Golfo de Estados unidos. b) Precios de amoníaco y LNG en hubs principales (Argus, 2016) (U.S. Energy Information Administration, 2022)

### Demanda proyectada de amoníaco

La producción mundial de amoníaco podría aumentar a 400-700 millones de toneladas por año, impulsada por aplicaciones emergentes como portador de hidrógeno, la generación de energía eléctrica mediante turbinas y como combustible alternativo para el transporte marítimo. Se prevé que la producción de amoníaco para fertilizantes se expanda en respuesta al crecimiento de la población, y se espera que este crecimiento iguale o incluso supere la tasa de aumento del consumo de energía.

En la figura a continuación, se presentan dos posibles escenarios futuros para la demanda de amoníaco. El gráfico de la izquierda muestra la demanda en el marco de las políticas actuales (Business as usual *BaU*), mientras que la figura de la derecha refleja la previsión en el marco del Acuerdo de París. Ambas proyecciones indican un aumento de la demanda y nuevos usos del amoníaco. A 2050, en un escenario optimista y alineado con acuerdos internacionales, se proyecta que la demanda sea de 197 Mt/año para el amoníaco como combustible marítimo, 127 Mt/año como *carrier* de hidrógeno y 30 Mt/año en generación de energía, con expectativas de que este se consuma principalmente en Japón, de acuerdo con su hoja de ruta para el amoníaco.

Demanda de amoníaco proyectada para 2050 y escenario *BaU*, Mt



Demanda de amoníaco proyectada para 2050 y escenario 1.5°C, Mt

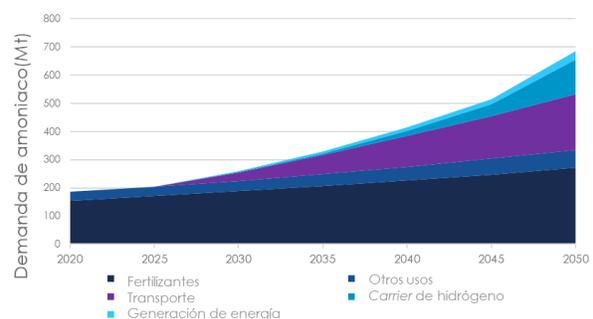


Figura 5. Proyecciones de demanda mundial de amoníaco. Fuente: (AEA; IRENA, 2022)

## 2 DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS: METODOLOGÍA Y CONFIGURACIÓN BÁSICA

Esta sección presenta la metodología para dimensionar sistemas de *Power-to-X*, con enfoque en la producción de amoníaco. Se presentan las complejidades que este tipo de sistemas y cómo a través de un análisis holístico se puede alcanzar un dimensionamiento de los componentes con el mejor desempeño técnico-económico. El capítulo presenta el análisis holístico de los sistemas, equipos, y flujos de materiales través de *Systems Engineering*. Dentro del análisis la optimización técnico-económica y dimensionamiento de las unidades de proceso se realiza a través de ANDREA, software desarrollado por Hinicio. El capítulo también presenta los resultados técnicos y económicos obtenidos, en especial una descripción de los costos nivelados. Esta es una métrica que describe los costos de capital y operación de vectores energéticos como el hidrógeno o el amoníaco.

### 2.1.1 Análisis de holístico de sistemas *Power-to-X* a través del *Systems Engineering*

Los sistemas *Power-to-X* acoplan diferentes sectores productivos, lo que aumenta la complejidad de su optimización. Un análisis holístico de todos los componentes del sistema, que sea además transdisciplinario e integrador permite optimizar tecno-económicamente la operación y el dimensionamiento de los equipos. Hinicio aplica la visión de *Systems Engineering* para modelar, optimizar y simular el funcionamiento de estos sistemas complejos. Este es un análisis multifluido, que permite identificar riesgos potenciales y garantizar factibilidad para éxito operativo a largo plazo.

El dimensionamiento de estos sistemas a través de *Systems Engineering* permite:

- Orientar eficazmente el diseño técnico, respetando las limitaciones técnicas, económicas, ambientales y sociales lo que reduce incertidumbres del sistema.
- Entender apropiadamente el sistema *Power-to-X* para que evitar que en el paso a etapa de ingeniería se presenten cambios sistémicos.
- Encontrar equilibrio entre visión partes interesadas, gestión de proyectos y características de equipos de ingeniería.
- Optimizar los sistemas energéticos multifluido abordando la compleja integración de las cadenas de valor de *Power-to-X*.

### 2.1.2 Herramienta de optimización ANDREA

En el análisis de *Systems Engineering*, la optimización se realiza a través una herramienta interna de Hinicio conocida como ANDREA, que permite modelar y simular cadenas de valor.

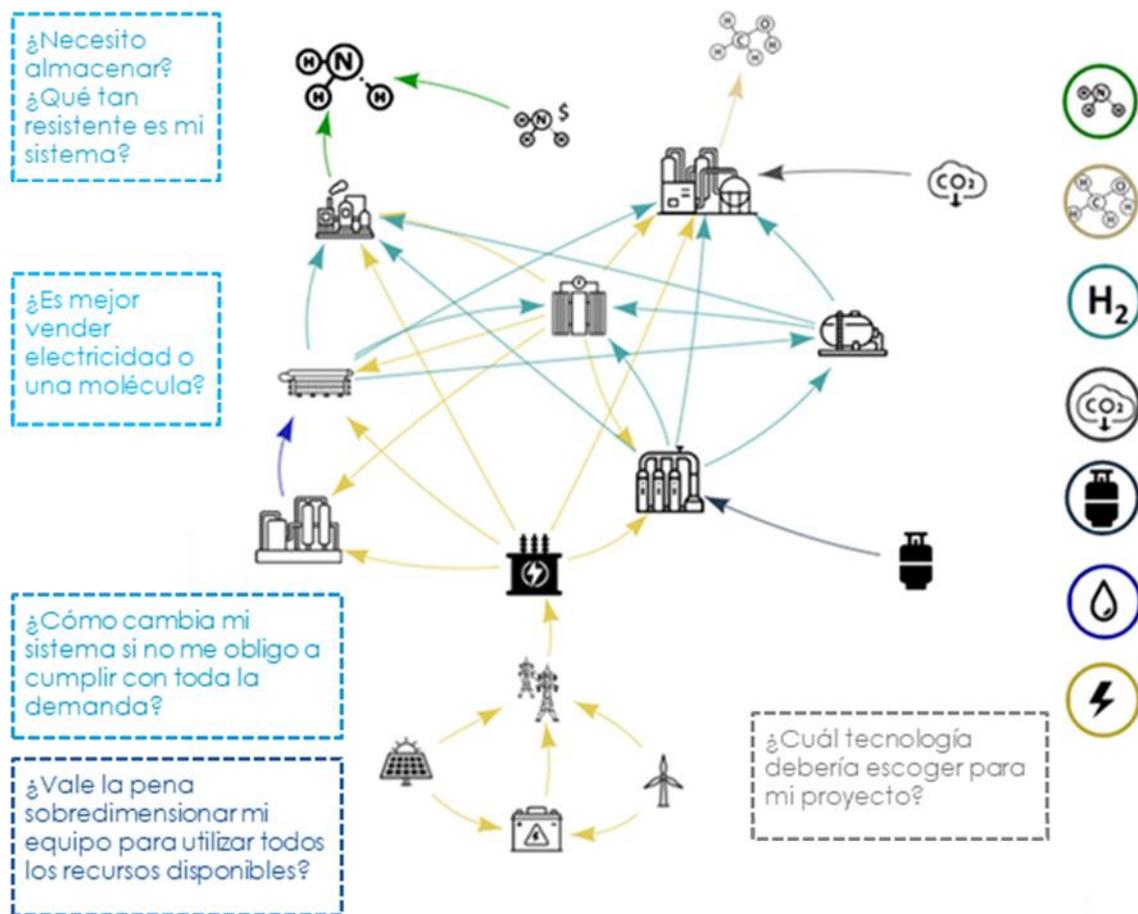


Figura 6. Sistema energético ANDREA.

Una descripción detallada de los 4 tipos de clases de tecnología modeladas en ANDREA se muestra a continuación:

**Los suministros son componentes que pueden transferir un producto dentro del límite del sistema energético.** Se utiliza para definir activos de energía renovable como paneles solares (PV), eólicos, que se caracterizan por CAPEX, OPEX, vida útil y perfiles de producción horaria. Se utiliza para simular mercados donde se puede comprar o vender una unidad de mercancía (es decir, 1 kWh, 1 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>, etc.) basada en costos de capacidad y costos de energía, como los mercados eléctricos, de gas natural y de diésel.

**Los componentes de almacenamiento cumplen la función de almacenar y transferir materiales y recursos entre pasos de tiempo.** Se caracterizan por tasas de carga/descarga, eficiencia de ida y vuelta, autodescarga, profundidad de descarga, ciclo de vida útil, y costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX), tanto fijos como variables.

**Convertidores son componentes capaces de transformar N flujos de entrada en N flujos de salida,** tales como el electrolizador (entrada: agua, salida: O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>), compresores, reactores, etc. Están definidos por su CAPEX, OPEX, vida útil y eficiencia o factores de conversión.

**Las demandas son componentes que pueden transferir un flujo fuera del límite del sistema energético.** Mediante un perfil horario el sistema modelará cualquier demanda de fluido por parte de un comprador, puede ser un valor fijo o máximo.

### 2.1.3 Metodología para optimización de sistemas *Power-to-Ammonia*

Los siguientes pasos permiten abordar de forma integral los sistemas *Power-to-Ammonia* garantiza que la planta de amoníaco verde sea factible y optimizada con todas las consideraciones técnico-económicas. Para diseñar y definir se cuenta con la siguiente metodología:

#### 1. Identificación de componentes del sistema *Power-to-Ammonia*

En esta etapa se establecen cuáles son los componentes requeridos para el sistema *Power-to-Ammonia*. Dentro de estos, toma relevancia identificar fuentes de energía renovable como solar o eólica y acometidas de agua. Los equipos requeridos para producir, distribuir y transportar los productos son analizados en términos de sus costos de inversión y operación, así como su desempeño técnico.

El sistema *Power-to-Ammonia* se divide en tres segmentos: suministro de energías renovables, producción de hidrogeno y producción de amoníaco. En el segmento de energías, todas las posibles fuentes de suministro eléctrico (solar, eólico) son consideradas. El sistema continúa con la producción de hidrógeno renovable mediante electrólisis. En el segmento de amoníaco, las unidades ASU y Haber Bosch son consideradas. De acuerdo con esto, los escenarios a analizar son configuraciones de los sistemas de *Power-to-Ammonia* que analizan los tres segmentos a partir variaciones en algunos componentes.

#### 2. Selección y evaluación de los escenarios

Combinaciones entre los componentes del sistema *Power-to-Ammonia* resultan en escenarios para optimizar. Se analizan parámetros clave como las capacidades unitarias, las estrategias de suministro de energía y los costos nivelados para comprender la influencia y el impacto de los diferentes componentes y decisiones involucradas en el diseño de la planta. Los escenarios son optimizados en ANDREA y analizados para identificar los componentes de mayor impacto en el sistema.

El sistema energético se optimiza en ANDREA resolviendo un problema lineal entero mixto. La función objetivo es encontrar el portafolio óptimo de activos que pueda cubrir la demanda en múltiples períodos de tiempo, minimizando el costo total del sistema. La herramienta determina el dimensionamiento y la asignación de los diferentes activos del sistema que minimizan el costo total descontado del sistema, considerando tanto los costos de inversión (CAPEX) como los costos de operación (OPEX).

La simulación tiene una resolución temporal horaria, o sea, considera la cantidad de electricidad que las fuentes de energía renovable o la red eléctrica podrían entregarse por cada hora de operación. Este proceso, que se repite para cada hora del año, implica la simulación de todas las conversiones de fluidos intermedios de la cadena. El despacho y el dimensionamiento de las diferentes unidades (módulos) se llevan a cabo

simultáneamente para minimizar el costo total anualizado del sistema durante toda su vida útil, bajo la restricción de proporcionar la demanda horaria de hidrógeno y amoníaco respetando los límites técnicos de los diferentes módulos.

### 3. Selección de la configuración de diseño

Una evaluación de los pros y los contras de las configuraciones resultantes conducirá a la selección de la configuración de diseño, que especificará todos los tamaños y capacidades de los componentes del sistema.

#### 2.1.4 Resultados de ANDREA

ANDREA permite el análisis de resultados técnicos como el dimensionamiento de los equipos, el factor de carga, perfiles horarios entre otros, y económicos con los costos nivelados, y estimaciones del CAPEX total de la planta.

#### Dimensionamiento de equipos y sus perfiles horarios

El dimensionamiento adecuado asegura que los equipos seleccionados puedan satisfacer las demandas operativas previstas, optimizando tanto la eficiencia como los costos. Además, el análisis de los perfiles horarios de operación permite adaptar la capacidad de los equipos a las variaciones en la demanda a lo largo del tiempo con el uso óptimo de los recursos.

ANDREA permite cambiar los parámetros técnicos de los componentes para realizar una optimización con restricciones realistas. Por ejemplo, se puede establecer un mínimo técnico para un componente para observar el diseño óptimo del sistema y los perfiles horarios horaria que resultan de esta modificación.

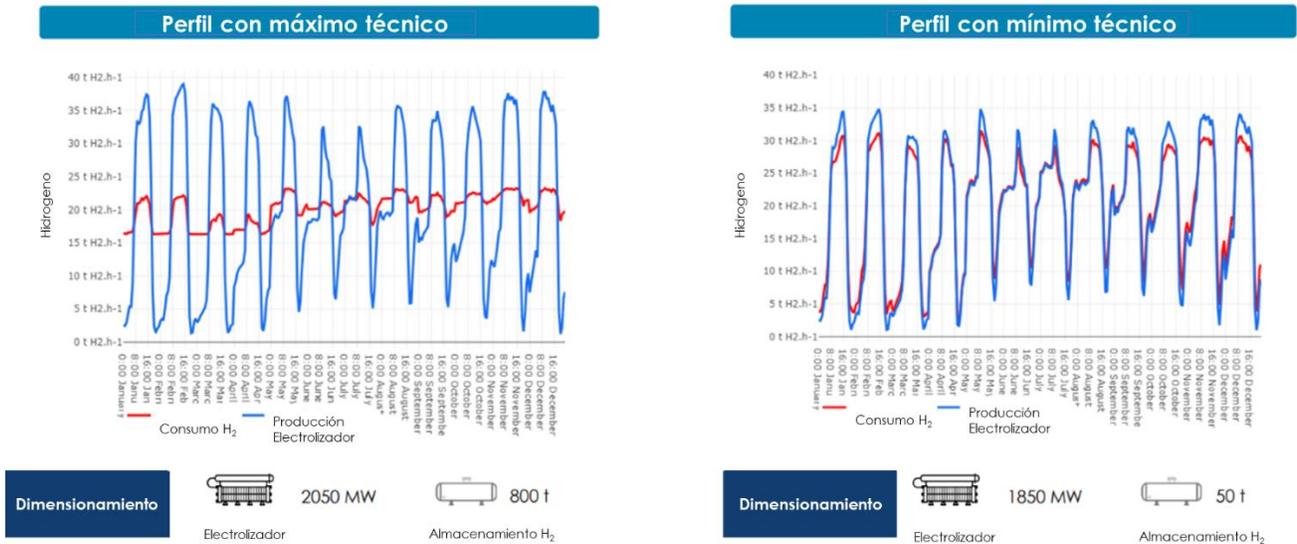


Figura 7. Ejemplo de resultados obtenidos de ANDREA en el dimensionamiento y perfiles horarios.

ANDREA también permite analizar suposiciones del sistema y conocer su impacto en el sistema de producción. Por ejemplo, se puede definir un sistema conectado a la red eléctrica y uno sin conexión para identificar y comprender las diferencias en las dimensiones y operación.

## Costos nivelados y distribución de costos de capital y operativos

El costo nivelado permite comparar entre los diferentes escenarios, configuraciones y casos analizados. Este indicador tiene en cuenta los costos de capital y de operación de la producción de cada uno de los vectores energéticos. Por ejemplo, *LCOH* es el costo nivelado de hidrogeno en el proyecto, industrialmente medido en USD/kg H<sub>2</sub>. Otros vectores analizados en los sistemas *Power-to-Ammonia* son electricidad (*LCOE*) y amoníaco (*LCOA*). Esta métrica también involucra la cantidad producida del vector energético correspondiente, de modo que los diferentes casos se puedan comparar sobre la misma base. La fórmula detrás de esta métrica es:

$$LCOA_x = \frac{NPV_{Cost}}{NPV_x} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t + O_t + V_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{x_t}{(1+d)^t}}$$

Donde,

*LCOA* es el costo nivelado del amoníaco analizado en USD/ton NH<sub>3</sub>

*t*: período que va del año 1 al año hasta el año *n*

*C<sub>t</sub>*: costo de capital en el período *t*

*O<sub>t</sub>*: costo operativo fijo en el período *t*

*V<sub>t</sub>*: costo operativo variable en el período *t*

*x<sub>t</sub>*: amoníaco producido en el período *t*

*d*: tasa de descuento

*n*: año final de operación

Tal como se define, este método considera los costos a lo largo de la vida útil de un proyecto. Mediante el uso de esta métrica, se aborda el impacto de los datos técnicos y económicos más relevantes, como el CAPEX, la operación y mantenimiento anuales, vida útil y degradación de equipos. La imagen a continuación presenta una gráfica de cascada del LCOA ejemplo, este gráfico presenta la distribución de costos de capital (CAPEX) y los operativos y anuales (OPEX) de cada uno de los componentes del costo nivelado de amoníaco.

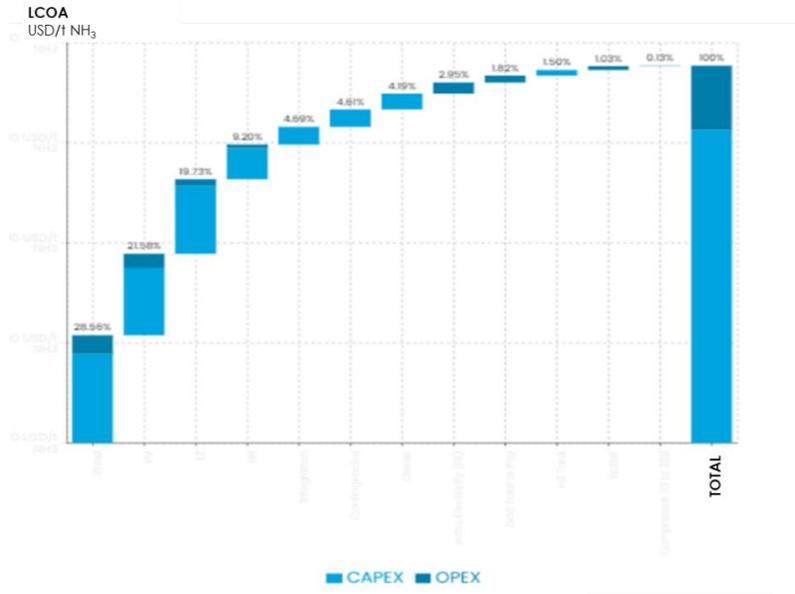


Figura 8. Ejemplo de resultados obtenidos de ANDREA del costos nivelado de amoníaco (LCOA) y su distribución en costos de capital (CAPEX) y de operación (OPEX).

### 3 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO DE NEGOCIO

Esta sección presenta la conceptualización del modelo de negocio para una planta de producción amoníaco de bajas emisiones y fertilizantes derivados, incluyendo desde la producción de energía eléctrica de origen renovable, hasta la venta de los fertilizantes y del amoníaco. El objetivo de esta conceptualización es establecer las condiciones bajo las cuales se generen los suficientes ingresos para solventar la inversión realizada por desarrolladores y accionistas, así como para cubrir los gastos operacionales del proyecto durante toda su vida útil.

Bajo este contexto, para una planta de producción de amoníaco de bajas emisiones operada por una empresa productora de fertilizantes, se presenta un modelo de negocio en el cual la empresa, que actúa como desarrolladora del proyecto, comercializa el amoníaco de dos maneras diferentes. Primero, de manera directa a sectores interesados en su consumo, tales como el sector energético y/o el sector naviero, donde el amoníaco puede ser usado como un potencial reemplazo para los combustibles fósiles tradicionales. Otros sectores como el industrial o el sector químico pueden estar también interesados en adquirir amoníaco. La segunda alternativa es el uso de amoníaco para consumo interno de la empresa productora de fertilizantes, utilizándolo como insumo para su producción de diferentes fertilizantes nitrogenados y compuestos, que serán comercializados dentro del mercado tradicional.

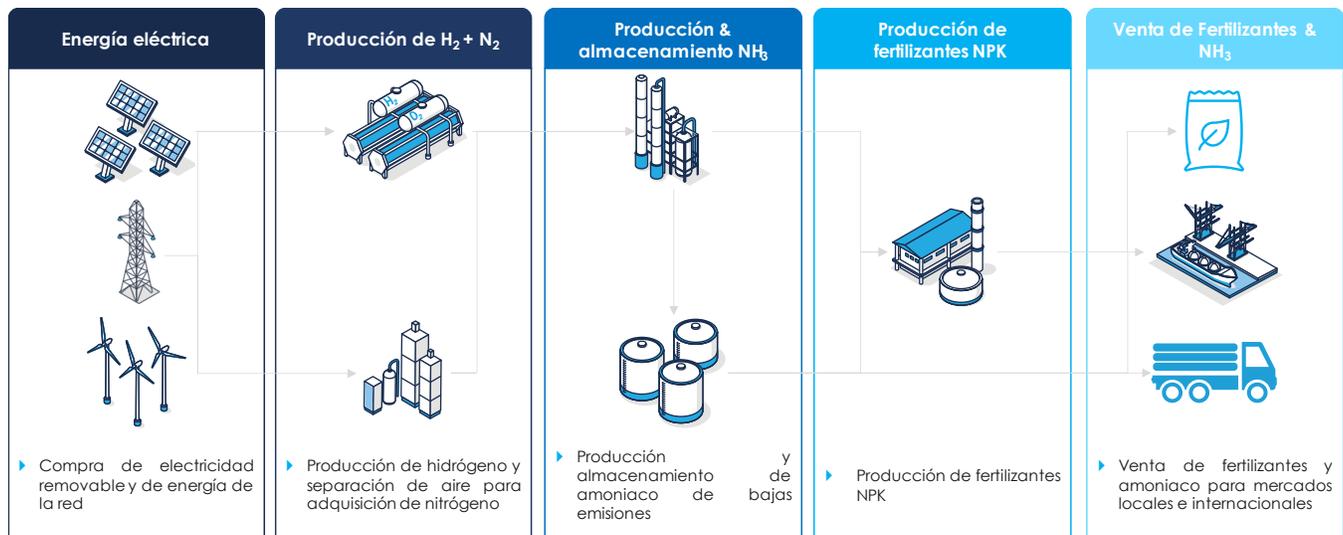


Figura 9. Estructura del modelo de negocio planteado para la planta de amoníaco de bajas emisiones.

Como se muestra en la Figura 9, el modelo de negocio propuesto comprende una serie de componentes operativos, logísticos y financieros específicos. A continuación, se presenta una descripción general del modelo de negocio para los distintos eslabones de la cadena de valor del proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones:

- Suministro de energía eléctrica:** El proceso de electrólisis para la producción de hidrógeno, necesario como insumo para la producción de amoníaco de bajas emisiones, presenta un consumo eléctrico intensivo. Como tal, dicho proceso tiene un consumo promedio de 49-54 kWh/kg  $H_2$  (aproximadamente 177 kg  $H_2$ /t  $NH_3$ ), que debe sumarse a la electricidad consumida por la Unidad de Separación de Aire, correspondiente a aproximadamente 100-110 kWh/t  $NH_3$ , y a la electricidad requerida

por la planta de producción de amoníaco, que consume aproximadamente 430-450 kWh/t NH<sub>3</sub>.

- **Producción de H<sub>2</sub> & N<sub>2</sub>:** Utilizando energía eléctrica como insumo, la siguiente fase del proyecto implica la producción de hidrógeno mediante electrólisis. Además, se requiere la implementación del proceso de producción de nitrógeno a través de una Unidad de Separación de Aire, que permite extraer nitrógeno del aire. Estos dos procesos conllevarán costos significativos que deben ser considerados en el modelo de negocio del proyecto. Adicionalmente, son procesos que pueden resultar novedosos para productores tradicionales de fertilizantes, que suelen adquirir directamente la molécula de amoníaco.
- **Producción y almacenamiento de amoníaco:** Posterior a la producción de hidrógeno a partir de energía eléctrica, y a la obtención de nitrógeno, el siguiente paso de la cadena de valor del proyecto es la producción de amoníaco, cuyo proceso se detalla en la sección 1.2.3. El amoníaco resultante será almacenado para su posterior consumo interna o su comercialización directa.
- **Venta de fertilizantes y amoníaco:** Como se ha mencionado, el modelo de negocio propuesto contempla dos fuentes de ingresos principales. Por un lado, la empresa generará ingresos por la venta de los fertilizantes producidos a partir de esta materia prima, y, por otro lado, por la venta directa de amoníaco a partes interesadas. En este sentido, la empresa desarrolladora del proyecto deberá definir y estimar la proporción que destinará al consumo interno y la cantidad de amoníaco que comercializará directamente. Es importante considerar que es posible que la fuente de ingresos asociada con las ventas directas de amoníaco adquiera mayor relevancia en el mediano y largo plazo, a medida que crezca el interés por energéticos de bajas o cero emisiones. Esto último implica que la empresa desarrolladora puede verse en la necesidad de buscar nuevos clientes a quienes pueda comercializar esta molécula, que no necesariamente pertenezcan al sector agrícola, que es donde actualmente se presenta el principal consumo de fertilizantes, e indirectamente de amoníaco, en el país.

Por último, se destaca que el desarrollo de un proyecto como este, que implica altas inversiones y, además, requiere incorporar tecnologías relativamente novedosas, requiere de un modelo de negocio bien estructurado y definido, que cuente idealmente con contratos que respalden o sustenten el desarrollo del proyecto. Estos contratos pueden incluir, por ejemplo, contratos de compra de energía eléctrica, contratos de provisión de insumos, así como contratos de venta de amoníaco/fertilizantes a largo plazo. Así, estos contratos permitirán, de alguna manera, hacer proyecciones de los flujos de caja de este tipo de proyecto y dar mayor viabilidad financiera al mismo.

### 3.1 Evaluación del modelo de negocio

La evaluación de la viabilidad financiera de un proyecto depende de varios factores. Estos incluyen los ingresos y la rentabilidad esperados, el costo de la inversión inicial necesaria, los mecanismos de financiación utilizados, así como factores externos como la existencia de incentivos tributarios u otros beneficios económicos disponibles.

A lo largo de esta subsección, se presentan algunos factores determinantes identificados en el análisis financiero del proyecto de la planta de producción de amoníaco de bajas emisiones. El objetivo es proporcionar un panorama claro de las condiciones necesarias para viabilizar el desarrollo de un proyecto de este tipo. Sin embargo, es importante considerar que el dimensionamiento exacto de los impactos financieros de diferentes variables dependerá específicamente de variables específicas asociadas al proyecto, como costos de energía, O&M o ingresos del mismo.

### 3.1.1 Estructura de capital del proyecto

Los proyectos industriales de esta envergadura y naturaleza requieren altas inversiones de capital para adquirir predios, tecnologías, infraestructura, equipos industriales y solventar gastos relacionados con adquisición de permisos, planeación, ingeniería, construcción y puesta en marcha. Por lo general, dichos proyectos se financian con una proporción considerable de deuda y un menor porcentaje de capital propio o *equity*. En Colombia, los proyectos de infraestructura en el sector energético tienden a tener una estructura de capital donde el 70% de la inversión inicial se financia con deuda, mientras que el 30% restante proviene de *equity* (Serrano, 2019). Las condiciones de la deuda dependerán principalmente del tipo de financiamiento que se obtenga, ya sea a través de bancos comerciales, entidades multilaterales, bonos verdes u otras estructuras de crédito disponibles.

Al analizar diferentes estructuras de capital para un proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones con una inversión inicial de aproximadamente 300 millones de dólares, se observa un impacto significativo en la Tasa Interna de Retorno (TIR) debido a variaciones en el porcentaje de deuda. Específicamente, financiar con deuda el 70% en comparación con el 50% de la inversión, puede aumentar la TIR para los accionistas en aproximadamente un 0.9%. Esto se debe en gran medida al beneficio fiscal derivado de la deducción de pago de intereses de la deuda en el pago de impuestos sobre la renta. En este sentido, cuanto mayor sea la deuda adquirida, mayor será este beneficio y, por ende, mayor la rentabilidad para los accionistas.

Por otro lado, las fluctuaciones en la tasa de interés aplicada sobre la deuda también tienen un impacto considerable en la rentabilidad del proyecto. Un cambio de 3 puntos porcentuales hacia arriba o hacia abajo en la tasa de interés puede generar un aumento de hasta el 5% o una reducción del 2% en la TIR, respectivamente. Este impacto también se deriva principalmente del componente de pago de intereses de la deuda.

En resumen, la estructura de capital y las condiciones de la deuda son componentes clave en la estructuración de un proyecto de este tipo. Por esto, es muy importante que durante su estructuración se busquen diferentes alternativas y fuentes de financiamiento para encontrar la combinación óptima que garantice el desarrollo exitoso del proyecto, teniendo en cuenta el perfil de endeudamiento de la empresa desarrolladora, así como la capacidad de endeudamiento del proyecto.

### 3.1.2 Acceso a incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014

Dentro del marco regulatorio que el gobierno colombiano ha establecido en los últimos años para fomentar el desarrollo y la adopción masiva de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable, la Ley 1715 de 2014, aplicable incluso a proyectos de producción de hidrógeno verde, ofrece 4 beneficios tributarios: i) deducción del 50% de la inversión total sobre la renta declarable, ii) exclusión del impuesto a las ventas para equipos nacionales, elementos,

maquinaria y servicios importados para la preinversión o inversión en proyectos de hidrógeno verde, iii) exención del pago de aranceles de importación sobre maquinaria, equipos, materiales y suministros, y iv) aplicación de depreciación acelerada. Actualmente, La resolución 319 de 2022 publicada por la UPME estableció el listado de bienes y servicios que pueden aplicar a los beneficios tributarios, en donde se incluyen principalmente aquellos asociados con la planta de producción de hidrógeno (planta de desmineralización, electrólisis, compresor, tanques de almacenamiento, etc.) y su uso final directo.

Para evaluar el impacto de estos beneficios en el proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones, se ha analizado el impacto financiero de: i) no acceder a ningún beneficio, ii) acceder únicamente a los beneficios de la planta de producción de hidrógeno, y iii) acceder a los incentivos para la planta de producción de hidrógeno y los equipos asociados con la producción de amoníaco. Este es un caso hipotético en el que, en el corto plazo, se regule la obtención de los incentivos de la 1715 para la producción y uso final de derivados de hidrógeno, como el amoníaco.

El análisis realizado permite determinar que los escenarios sin incentivos resultan financieramente inviables y requieren un aumento significativo en el precio de venta del amoníaco y los fertilizantes para alcanzar tasas internas de retorno positivas, que no superan las expectativas de los accionistas. Por otra parte, en el escenario donde se aplica el beneficio únicamente a la planta de producción de hidrógeno, aunque mejora la TIR en casi un 4%, se necesita un aumento considerable en el precio de venta (mayor al 12,5%) para alcanzar rentabilidades atractivas, lo cual se considera que es poco viable teniendo en cuenta que los consumidores de estos productos provienen principalmente del sector agrícola.

El escenario más favorable es aquel en el que se aplican los beneficios a la producción de hidrógeno y amoníaco, lo que aumenta la TIR del accionista en aproximadamente un 6%. Incluso con pequeñas variaciones en el precio de venta (alrededor del 5% sobre el precio actual), el proyecto comienza a ser rentable para los inversionistas. Por lo tanto, si en el corto plazo se logra la inclusión de los equipos de producción de amoníaco en los incentivos de la Ley 1715, y si el proyecto puede demostrar los requisitos para aplicar a estos incentivos, los desarrolladores no necesitarían agregar una prima tan alta para que la implementación de la planta sea rentable y atractiva.

En este sentido se invita al gobierno a considerar la importancia de incorporar este tipo de equipos en el listado de bienes que pueden aplicar a los beneficios, ya que el amoníaco se vislumbra como un vector energético de bajas o cero emisiones en el futuro. Esto permitirá descarbonizar ciertas industrias, avanzar hacia las metas nacionales de descarbonización y aumentar la soberanía alimentaria del país al poder producir sus propios fertilizantes, sin depender de la importación de amoníaco y de la volatilidad de sus precios.

### 3.1.3 Variación del precio de venta del amoníaco y los fertilizantes

Uno de los factores determinantes para lograr la viabilidad financiera de un proyecto de producción de amoníaco verde corresponde al precio de venta de los productos finales, específicamente el amoníaco y los fertilizantes derivados, así como la cantidad vendida de cada uno de estos. Este factor es crucial ya que será la principal fuente de ingresos que permitirá cubrir los costos de producción, amortizar la deuda solicitada para ejecutar el proyecto y generar rentabilidad para los accionistas.

Inicialmente, es importante destacar que mantener los precios iguales a los existentes actualmente en el mercado hace muy complicado conseguir la viabilidad financiera de un proyecto de estas características en el corto plazo. Específicamente, simulando que el precio de los fertilizantes se mantiene estable, para alcanzar un Valor Presente Neto (VPN) igual a cero, se necesitaría aumentar el precio de venta del amoníaco en un 63% sobre precios actuales de venta al detal. En el caso contrario, donde el precio del amoníaco se mantiene, se requeriría aumentar el precio de venta de los fertilizantes en aproximadamente un 18%. Este último aumento podría ser desafiante, ya que el sector agrícola podría no estar dispuesto a asumir dicho sobrecosto en sus costos de producción, incluso reconociendo que sea un producto con menos emisiones en su proceso productivo.

Ahora bien, al habilitar escenarios de aplicación de incentivos tributarios, se observa que aumentos relativamente bajos en los precios actuales pueden llevar a la viabilidad financiera del proyecto. Por ejemplo, para una estructura de capital del 70% deuda y 30% capital propio, aplicando incentivos tributarios únicamente a la planta de producción de hidrógeno, un aumento del 7.5% en el precio de los fertilizantes y un 10% en el precio del amoníaco generan indicadores atractivos (VPN positivo y TIR superior a la tasa de descuento aplicada para la evaluación).

Por otra parte, en el escenario donde los incentivos tributarios se aplican tanto a la planta de producción de hidrógeno como a la de amoníaco, la viabilidad financiera se logra con aumentos aún menores en los precios de venta. En este caso, un aumento del 2.5% en el precio de los fertilizantes y un 10% en el precio del amoníaco ya arroja resultados positivos y atractivos para los inversionistas.

En este contexto, es esencial considerar que pueden existir diferentes combinaciones de precios de venta y cantidades vendidas de los productos, las cuales dependerán, en parte, de las capacidades de producción y la cobertura del mercado del desarrollador del proyecto. No obstante, este análisis resalta la importancia de que un proyecto de esta naturaleza, que podría ser pionero a nivel nacional y tener un impacto significativo en el país, pueda acceder a los incentivos tributarios. Estos incentivos, como se ha venido mencionando, son cruciales para facilitar la viabilidad financiera del proyecto y habilitar el desarrollo de este.

Por último, es relevante reconocer que el sector agrícola puede tener una menor capacidad y disposición para asumir sobrecostos en sus insumos, como los fertilizantes. Por esta razón, cualquier aumento en los precios de estos productos debe realizarse de manera cautelosa y fundamentada, por ejemplo, a través de un estudio de mercado detallado. Sin embargo, sectores como el industrial y el naviero, que están promoviendo su descarbonización mediante la adquisición de nuevos energéticos bajos en emisiones, muestran una mayor disposición a pagar por alternativas bajas en emisiones. En este sentido, un proyecto de esta naturaleza puede expandir su portafolio de clientes y no centrarse únicamente en el sector de fertilizantes, para asegurar ingresos que apalanquen su desarrollo. Esta estrategia, además, representa una oportunidad para diversificar las líneas de negocio y las fuentes de ingresos de los desarrolladores del proyecto.

### **3.2 Consideraciones finales sobre el modelo de negocio**

Para cerrar esta sección de conceptualización y evaluación del modelo de negocio, se presentan a continuación una serie de consideraciones finales que recogen los mensajes clave para tener en cuenta en Colombia para el desarrollo de un proyecto de una planta de producción de amoníaco de bajas emisiones:

- El tipo de deuda adquirida para financiar el proyecto, junto con la estructura de capital definida, es una variable significativa que impacta la economía del proyecto. Por lo tanto, es esencial que el desarrollador explore mecanismos y estrategias de financiamiento óptimos que ofrezcan condiciones favorables, asegurando así la viabilidad económica del proyecto. Como se ha mencionado, incluso una ligera variación en la tasa de interés de la deuda puede influir directamente en la Tasa Interna de Retorno del proyecto, resaltando la importancia de buscar opciones de financiamiento con términos y condiciones favorables. Estas pueden incluir períodos de gracia para el inicio del reembolso de capital, provisión de asesoría técnica o apoyo durante las etapas de preinversión, términos de pago flexibles y la promoción de iniciativas de sostenibilidad que impacten positivamente el proyecto y su entorno.
- Se recomienda que la empresa que tome la iniciativa de desarrollar un proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones entable, desde etapas tempranas, conversaciones con entidades gubernamentales para abogar por la consideración del hidrógeno/amoníaco producido con fuentes de energía limpias y la inclusión de los equipos asociados, como la planta Haber-Bosch o la Unidad de Separación de Aire, dentro del ámbito de los beneficios tributarios de la Ley 1715 de 2014. Estos incentivos pueden facilitar la viabilidad financiera del proyecto y, por consiguiente, su potencial desarrollo, contribuyendo a estructurar un entorno favorable para futuros proyectos de esta naturaleza en el país.
- Un aspecto importante identificado durante la evaluación del modelo de negocio es la oportunidad de ofrecer a los clientes un precio fijo y constante por los productos. Típicamente, estos son contratos a largo plazo que garantizan el suministro de amoníaco/fertilizantes requeridos por el cliente, asegurando al mismo tiempo un flujo de ingresos definido y constante para la empresa desarrolladora, lo que permite proyecciones de flujo de caja más precisas. Además, ofrecer un precio fijo puede permitir cobrar una prima adicional en los productos, que no impacta significativamente al cliente al asegurar su suministro.
- Una consideración clave en el modelo de negocio es la disponibilidad de electricidad de bajo costo, así como la posibilidad de utilizar la red eléctrica como fuente de respaldo. Esta opción, además de permitir una operación continua, reduce los riesgos asociados con la utilización de fuentes de energía renovable, que no solo son variables y dependientes de las condiciones climáticas y ambientales, sino que también pueden presentar demoras en su fecha de entrada en operación. Bajo este contexto, un factor clave para promover un modelo de negocio rentable es acceder a energía de la red eléctrica a costos competitivos. Por ello, es fundamental aplicar estrategias que promuevan eficiencias en costo energético como contratos a largo plazo con tarifas competitivas o buscar acuerdos con el gobierno para el desarrollo de subsidios o apoyos gubernamentales para el uso de esta energía en la producción de hidrógeno y derivados (ej: reducción de tarifas de transmisión/distribución para este tipo de proyectos).
- Es relevante destacar que iniciativas como la planta de producción de amoníaco de bajas emisiones representan proyectos innovadores en el país. Este tipo de proyectos requiere de una curva de aprendizaje durante su desarrollo, la expansión de

capacidades internas para operar dichas plantas y la participación de diversos actores dentro de la cadena de valor. En consecuencia, estos proyectos no deben evaluarse únicamente con métricas de rentabilidad. Otros factores, como el posicionamiento regional de la empresa, adquisición de conocimientos, y la creación de nuevas oportunidades laborales, también deben considerarse al evaluar el impacto y la viabilidad general de la iniciativa.

## 4 EVALUACIÓN DE RIESGOS E IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIALES

Una parte integral del desarrollo de un proyecto de amoníaco verde es la consideración de los aspectos ambientales y sociales del proyecto, así como la correcta identificación y evaluación de los riesgos propios de la naturaleza de la planta, a fin de implementar medidas de mitigación oportunas y apropiadas.

La primera parte de esta sección presenta los principales riesgos identificados para el modelo de negocio propuesto para una planta de amoníaco verde y las medidas de mitigación más relevantes. Posteriormente, se presentan los principales aspectos que se deben considerar en relación con temas ambientales y sociales, a fin de identificar los principales impactos provenientes de un proyecto de amoníaco verde y que pueden afectar a las comunidades y en el medio ambiente.

### 4.1 Evaluación de riesgos

La evaluación de riesgos es un proceso sistemático para evaluar los posibles riesgos, amenazas o eventos adversos que pueden surgir en diferentes contextos y podrían tener un impacto positivo o negativo sobre los objetivos de un proyecto bajo consideración. Típicamente, esta evaluación tiene como objetivo identificar, analizar y priorizar los riesgos para permitir la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas efectivas de gestión de riesgos.

En el contexto de un proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones, es crítico identificar y categorizar todos los riesgos que podrían afectar sus objetivos y los del modelo de negocio planteado. Ahora bien, mediante un ejercicio con actores de la industria de fertilizantes, se identificó una serie de riesgos asociados con este tipo de proyecto. Al analizar detalladamente cada uno de los riesgos en función de su probabilidad de ocurrencia y su impacto, fue posible identificar aquellos riesgos que mayor relevancia pueden tener para un proyecto de este tipo y requieren de medidas de gestión específicas. A continuación, la Tabla 4 presenta los 15 riesgos más relevantes, para los cuales se propondrán acciones de gestión y mitigación con el fin de reducir su probabilidad de ocurrencia y/o su nivel de impacto sobre el modelo de negocio.

Tabla 4. Listado de los 15 riesgos que presentan una mayor relevancia (probabilidad x impacto), durante el desarrollo de un proyecto de producción de amoníaco de bajas emisiones

#	Riesgo	Descripción
1	<b>Adquisición de financiamiento externo</b>	Riesgo de no obtener financiamiento externo para financiar el proyecto de producción de amoníaco.
2	<b>Suministro de materias primas y equipos</b>	Riesgo de escasez, falta de disponibilidad o retrasos en la entrega de materias primas y equipos necesarios para la construcción y operación de la planta de producción de amoníaco de bajas emisiones.
3	<b>Variación en la disposición del cliente a pagar por el amoníaco/fertilizantes de bajas emisiones</b>	Riesgo de variación en la disposición del cliente a pagar por amoníaco/fertilizantes de bajas emisiones, influenciado por factores como disponibilidad, competitividad, metas de sostenibilidad, entre otros.
4	<b>Proyectos prioritarios a nivel país</b>	Riesgo asociado con que el tipo de proyecto en estudio se convierta o deje de ser una prioridad nacional, lo que podría afectar su apoyo y recursos.
5	<b>Cambios en los precios de la energía</b>	Riesgo de un potencial aumento o disminución en los precios de la energía eléctrica que utilizará la planta de producción.

#	Riesgo	Descripción
6	<b>Cambios tributarios</b>	Cambios en el régimen tributario que pueden llevar a un aumento, disminución, creación o eliminación de ciertos impuestos que la empresa debe asumir para actividades asociadas con el desarrollo del proyecto.
7	<b>Condiciones del mercado: Fluctuación del precio del NH<sub>3</sub></b>	Impacto potencial asociado con las fluctuaciones en los precios globales del amoníaco, afectando la atractividad de los precios de amoníaco/fertilizantes para los clientes.
8	<b>Cambio climático (aumento de Temperatura o Humedad, Sequías, Lluvias Excesivas, Tormentas Eléctricas, etc.)</b>	Impactos potenciales por cambios en la temperatura, humedad y eventos climáticos extremos como sequías, lluvias excesivas y tormentas eléctricas. Dentro de este riesgo se incluyen efectos adversos sobre la infraestructura.
9	<b>Estabilidad/Inestabilidad Política</b>	Riesgo de estabilidad/inestabilidad política se refiere a los efectos potenciales en una empresa o proyecto derivados de cambios políticos, como cambios de gobierno, políticas imprevistas, disturbios civiles o conflictos armados.
10	<b>Tasas de Interés</b>	Riesgo asociado con fluctuaciones en las tasas de interés de la deuda que impactan significativamente el modelo de negocio (incluida la implementación de una tasa de interés significativamente diferente a la que se modeló el negocio).
11	<b>Cambios Legislativos</b>	Impacto potencial de la introducción de nuevas regulaciones, regímenes fiscales y tributarios, normas ambientales, entre otros, debido a cambios en la legislación.
12	<b>Inflación/Deflación</b>	El riesgo se refiere a la posibilidad de que los niveles generales de precios en la economía aumenten (inflación) o disminuyan (deflación) y cómo esto puede afectar los costos e ingresos del proyecto.
13	<b>Permisos Ambientales</b>	Desafíos/barreras para obtener permisos ambientales para la planta de amoníaco, lo que puede llevar a retrasos, cambios en los requisitos o condiciones restrictivas que afectan la viabilidad o el cronograma del proyecto.
14	<b>Disminución/Aumento de demanda</b>	Riesgo asociado con un aumento o disminución en la demanda de amoníaco/fertilizantes, ya sea debido a condiciones del mercado, competitividad o sostenibilidad, entre otros.
15	<b>Duración de los trámites y procesos regulatorios/normativos</b>	Posibles retrasos en la obtención de aprobaciones y permisos regulatorios necesarios para la construcción y operación de la planta de producción de amoníaco, lo que podría obstaculizar la construcción o ejecución del proyecto.

Ahora bien, para cada uno de estos 15 riesgos, se han propuesto una serie de acciones y medidas para la gestión/mitigación de riesgos con el fin de reducir la probabilidad de ocurrencia y/o el nivel de impacto de cada riesgo. Estas acciones son tareas que los desarrolladores deben comenzar a implementar desde las primeras etapas del diseño y desarrollo del proyecto, así como actividades que deben llevarse a cabo de manera constante durante su ejecución y operación. Es crucial enfatizar que la evaluación y monitoreo de los diferentes riesgos deben realizarse de manera continua, ya que los riesgos pueden variar en términos de su probabilidad e impacto a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

A continuación, se presentan las principales recomendaciones que permiten mitigar de manera transversal, la mayoría de los riesgos presentados en la Tabla 4:

- **Contratos a largo plazo:** Para mitigar los riesgos relacionados con las fluctuaciones de precios de los insumos (electricidad, materias primas para la producción de fertilizantes,

servicios generales, etc.), así como las fluctuaciones en la venta de amoníaco y fertilizantes derivados, los desarrolladores deberían adquirir contratos a largo plazo tanto para la compra de insumos como para la venta de productos. Este enfoque establecerá una base y asegurará volúmenes mínimos de insumos y productos, manteniendo la estabilidad en el flujo de caja. Además, estos contratos facilitarán la planificación a largo plazo en la producción de fertilizantes y el escalamiento potencial de la producción final.

- **Relacionamiento con entidades gubernamentales:** Mantener un compromiso constante con entidades gubernamentales, informándolas sobre el progreso del proyecto, sus impactos y beneficios a nivel nacional (por ejemplo, desde las perspectivas de soberanía alimentaria, beneficios ambientales y/o económicos) y participando activamente en discusiones políticas o toma de decisiones dentro del sector industrial y agrícola será crucial. Como tal, al asegurar que el gobierno esté al tanto del proyecto promueve el establecimiento de marcos regulatorios y normativos que faciliten su desarrollo. Además, el compromiso continuo con estas entidades proporcionará acceso directo a información sobre posibles cambios regulatorios/normativos que puedan impactar el proyecto y a su modelo de negocio asociado.
- **Diversificación de fuentes de financiación:** Diversificar las fuentes de financiamiento es crucial para el desarrollo del proyecto. El potencial desarrollador de la planta de amoníaco de bajas emisiones deberá buscar financiamiento de bancos multilaterales, bancos internacionales e inversores privados. Se resalta que los bancos multilaterales ofrecen condiciones atractivas, la banca internacional brinda alcance global, y los inversores privados ofrecen no solo capital, sino también experiencia, networking y transferencia de conocimientos.
- **Análisis de sensibilidad:** Es importante realizar un análisis de sensibilidad a medida que el proyecto avanza a través de diferentes etapas de diseño, ingeniería y estructuración. Este análisis evalúa resultados potenciales al variar factores como los precios de venta de productos, los precios de compra de electricidad y la presencia de diferentes incentivos durante el desarrollo del proyecto. Aunque no es 100% certero, este análisis permite a los tomadores de decisiones evaluar escenarios optimistas y pesimistas que pueden surgir durante la implementación.
- **Cronograma detallado:** Dadas las características y desafíos de un proyecto como la planta de producción de amoníaco de bajas emisiones, tener un equipo dedicado y un cronograma detallado es esencial. Este equipo definirá el cronograma de actividades y supervisará el seguimiento y la coordinación de las diferentes acciones. Es importante que el cronograma sea lo suficientemente flexible para acomodar posibles retrasos causados por procesos internos o externos, pero también debe permitir medir el progreso y alinear a todas las partes involucradas.

Como mensaje final y como se mencionó anteriormente, es importante destacar que este tipo de análisis y las medidas de mitigación propuestas son flexibles y deben adaptarse periódicamente para considerar las etapas de desarrollo del proyecto y su entorno económico/político. Sin embargo, es crucial enfatizar la importancia de realizar este análisis y proponer medidas para reducir la probabilidad e impacto de cada riesgo en el modelo de negocio objetivo.

## 4.2 Identificación de impactos ambientales y sociales

Esta sección presenta los principales impactos ambientales que pueden derivarse de una planta de amoníaco de bajas emisiones. Para el análisis social, se hace énfasis en las oportunidades que formación de capital humano y especialmente en la posibilidad de minimizar la brecha de género en la industria química, si la implementación de la planta va acompañada de las medidas adecuadas para incentivar la participación de las mujeres en la fuerza laboral.

### 4.2.1 Análisis de impactos ambientales

El análisis de impactos ambientales o evaluación del impacto ambiental se utiliza para evaluar las posibles consecuencias o impactos ambientales de un proyecto o actividad. El propósito de una evaluación ambiental es identificar, predecir y analizar los posibles efectos de una acción sobre el medio ambiente y proponer medidas de mitigación. Existen diferentes metodologías para realizar evaluación de impactos ambientales, una de ellas es la Matriz de Leopold, un método cualitativo que tiene como objetivo evaluar los impactos ambientales y establecer la importancia de cada actividad del proyecto como generadora de impactos, analizando el nivel de significancia de los impactos causados, su magnitud y probabilidad de ocurrencia.

Un primer paso del análisis consiste en la identificación de los impactos ambientales. Para esta identificación es necesario conocer y entender las principales características del terreno en el cual se llevará a cabo el proyecto, así como evaluar la compatibilidad del uso de suelo con las actividades propias del proyecto. De igual forma, es importante identificar posibles sitios de interés ambiental y/o cultural que puedan ser afectados por el proyecto. Algunos de estos sitios de interés, pueden ser, yacimientos arqueológicos, zonas de conservación ambiental, rutas de especies migratorias de interés de conservación, ecosistemas estratégicos, etc. Una vez establecidas las características del terreno y la zona de influencia directa e indirecta del proyecto, se pueden determinar los factores ambientales que pueden ser afectados por actividades puntuales dentro de la ejecución de este, para cada componente ambiental pertenecientes a los medios Abiótico, Biótico, Paisaje y Servicios Ambientales. La tabla a continuación presenta un ejemplo de posibles factores ambientales.

Tabla 5 Ejemplo de posibles factores ambientales

Medio	Componente ambiental	Factores ambientales
Abiótico	Aire	F01. Calidad del aire
		F02. Ruido
		F03. Uso
	Suelo	F04. Procesos erosivos
		F05. Estabilidad
	Agua superficial	F06. Calidad
		F07. Disponibilidad

Posteriormente, es importante identificar todas las actividades que se realizarán dentro del marco del proyecto, que incluyan las fases de ejecución del mismo: i) Preparación del sitio, ii) Construcción, iii) Operación, iv) Cierre y abandono. Dentro de cada una de estas fases se deben listar todas las actividades a realizar que tendrán algún tipo de interacción con los factores ambientales identificados en las zonas de influencia del proyecto.

A partir de esta primera identificación, se desarrolla una matriz de identificación de impactos ambientales, en la que no solo se muestren las interacciones de medios ambientales y actividades específicas, sino que también se puedan calificar estas interacciones en función de su intensidad, extensión, persistencia y efecto, entre otros parámetros. Esta calificación permite determinar qué interacciones son de mayor relevancia debido a su nivel de afectación del entorno. La Figura 10 muestra un ejemplo de una matriz de evaluación de impactos ambientales para una planta de amoníaco de bajas emisiones, donde las interacciones identificadas se clasifican como de baja relevancia (marcadas en verde), de relevancia media (marcadas en amarillo) y de alta relevancia (marcadas en rojo). Como se observa en la Figura, la fase del proyecto correspondiente a *Operación* contiene las actividades con mayores interacciones ambientales calificadas como de mayor relevancia, especialmente las actividades de producción de hidrógeno, producción de amoníaco y generación de residuos.

Ejemplo matrix de identificación de impactos ambientales																							
Medio	Componente ambiental	Factores	Preparación del sitio					Construcción					Operación					Cierre y Abandono					
			A1. Caminos de acceso	A2. Excavaciones, nivelaciones y compactaciones	A3. Obras de drenaje pluvial	A4. Compromisos	A5. Generación de residuos	A6. Transporte de personal e insumos	A7. Compromisos y obras provisionales	A8. Hincado de pilotes	A9. Construcción de edificaciones	A10. Montaje de infraestructura	A11. tendido de líneas eléctricas	A12. Generación de residuos	A13. Mantenimiento de maquinaria y equipos móviles	A14. Transporte de personal y abastecimiento de insumos	A15. Producción de Hidrógeno	A16. Producción de amoníaco	A17. Planta de potabilización de agua	A18. Generación de residuos	A19. Mantenimiento	A20. Desmantelamiento de infraestructura	A21. Disposición de residuos
Medio abiótico	Aire	Calidad del aire	6	9			6	4		6	9	9	6		6	6	10		6	4	7	9	
		Ruido	9	12	9	6		6	6	9	6	6	6		6	6	9	4	6		6	6	6
	Suelo	Uso								8	8	5										6	6
		Estabilidad	5	9	5					6													5
Medio biótico	Agua superficial	Calidad	5	9	6	6			6	9	6		6	5			4	10	7	11	8	8	5
		Disponibilidad				6			6									9	9		7	8	
	Vegetación terrestre	Riqueza		8	4												10	10					
		Abundancia															10	10					
Servicios Ecosistémicos	Fauna	Riqueza	6	9	4	4	4	4	4	4	4	7	4		4	10	10		10			4	
		Abundancia															10	10		10			4
	De aprovisionamiento	Riqueza					4		4	4	4		4			8	11	8	10	7	4	4	
		Abundancia		5	4		4						4			7	10	4	4			4	
De soporte	Riqueza																						
	Abundancia	6	9	5	6	4			9	9	12	4									9	6	

Figura 10 Ejemplo de una matriz de identificación de impactos ambientales para una planta de amoníaco

A partir de los resultados obtenidos se debe desarrollar un plan de manejo ambiental que permita determinar las medidas de prevención y mitigación de los impactos ambientales de una manera concreta, priorizando aquellos impactos que sea calificados como más severos. Para el ejemplo mostrado en la figura, se establecen las siguientes medidas de mitigación, de acuerdo con la fase del proyecto donde se produce el impacto:

### Medidas de mitigación para los impactos ambientales de la etapa de preparación del sitio:

- Implementar medidas de reducción de ruido, como el uso de barreras acústicas, programar actividades ruidosas durante las horas de menor actividad, o implementar tecnologías de control de ruido para minimizar la perturbación a los residentes y la fauna cercanos durante las actividades de excavación y nivelación.
- Implementar medidas de control de polvo, como riego, supresores de polvo o barreras temporales contra el viento, para minimizar las emisiones de polvo en el aire provenientes de las actividades de excavación y nivelación, reduciendo los posibles impactos en la calidad del aire y la salud humana.
- Implementar programas de monitoreo ambiental para evaluar la efectividad de las medidas de mitigación y asegurar el cumplimiento de las regulaciones y permisos ambientales. Esto puede implicar realizar inspecciones regulares, monitorear la calidad del agua, los niveles de sedimentación y los impactos en la fauna, y tomar acciones correctivas según sea necesario para abordar cualquier problema de incumplimiento.

### Medidas de mitigación para los impactos ambientales de la etapa de Operación:

- Tecnologías de control de emisiones: Instalar y utilizar tecnologías avanzadas de control de emisiones, como la reducción catalítica selectiva (SCR) o quemadores de baja emisión de NOx, para minimizar la liberación de óxidos de nitrógeno (NOx), que pueden contribuir a la formación de smog y problemas respiratorios.
- Realizar un monitoreo regular de la calidad del aire tanto dentro de las instalaciones de la planta como en el área circundante para asegurar el cumplimiento de los estándares regulatorios y detectar cualquier problema potencial de manera temprana.
- Establecer prácticas adecuadas de gestión de residuos para manejar los desechos sólidos, materiales peligrosos y subproductos generados durante el proceso de producción.
- Planificación de Respuesta a Emergencias: Desarrollar e implementar planes de respuesta a emergencias para abordar incidentes potenciales, como fugas o liberaciones de sustancias peligrosas que podrían afectar la calidad del aire, asegurando medidas de respuesta oportunas y efectivas para minimizar el daño ambiental.
- Asegurar el cumplimiento de las regulaciones y estándares ambientales que rigen la operación de la planta, incluyendo permisos, límites de emisiones y requisitos de informes. Esto puede implicar realizar auditorías e inspecciones regulares para garantizar el cumplimiento y tomar acciones correctivas según sea necesario para abordar cualquier problema de incumplimiento

#### 4.2.2 Análisis de impactos sociales

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del análisis de impactos sociales es identificar medidas para mejorar la sostenibilidad de una planta de amoníaco verde, centrándose en las oportunidades que pueden surgir en términos de empleabilidad y equidad de género, en la industria de manufactura de productos químicos, como es el caso de la producción de amoníaco y de fertilizantes derivados.

Según el Departamento Nacional de Estadísticas (DANE), la industria manufacturera en Colombia genera 680,000 empleos directos, con un total de 2.5 millones de empleos directos e indirectos en el sector industrial. La última encuesta anual de manufactura, realizada en 2021, reveló que los hombres constituyen el 65% de la fuerza laboral en la manufactura, mientras que las mujeres representan el 35% restante. Sin embargo, esta distribución de género varía significativamente entre industrias. En la manufactura de productos químicos, los hombres representan alrededor del 74% de la fuerza laboral total. En cuanto al rol de mujeres y hombres dentro de este subsector específico, a nivel nacional, las mujeres representan el 28% de los profesionales técnicos y el 49% de los empleados en posiciones de ventas y administración. Por lo tanto, la representación de las mujeres en esta industria no solo es mucho menor comparada con la de los hombres, sino que también demuestra que las mujeres suelen emplearse principalmente en roles que no son misionales del sector, como los administrativos.

El desarrollo de la planta de amoníaco verde representa una oportunidad prometedora para la creación sustancial de empleo calificado. Sin embargo, es necesario equilibrar esto con la capacitación de los trabajadores en tecnologías emergentes de energía renovable. Sin medidas proactivas para fomentar una mayor participación de mujeres en programas educativos y de capacitación, especialmente en ingeniería química y disciplinas relacionadas, existe el riesgo de aumentar la brecha de género en la fuerza laboral. Por este motivo se debe entender la transición energética del sector como una oportunidad para promover la igualdad

de género en la industria manufacturera de insumos químicos. En este sentido, es importante reconocer la relación entre energía y género, para asegurar una representación equitativa de todos los grupos de la sociedad en el proceso de toma de decisiones y prestación de servicios, garantizando que los proyectos de hidrógeno y energía renovable no perpetúen las desigualdades de género que tradicionalmente se han presentado en el sector. Para abordar este desafío, es importante implementar medidas que promuevan la diversidad y la inclusión. Algunas de estas medidas se presentan a continuación:

- Implementar campañas de divulgación dirigidas específicamente a mujeres jóvenes de comunidades vulnerables para fomentar su participación en estas oportunidades. Esto puede lograrse mediante asociaciones con organizaciones locales de mujeres o iniciativas que promuevan la educación STEM (Ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas) entre niñas.
- Trabajar con universidades locales y otras instituciones educativas para desarrollar contenidos curriculares que promuevan la igualdad de género y aborden cualquier sesgo de género existente en programas de ciencias e ingeniería. Fomentar la inclusión de temas relacionados con equidad de género, diversidad e inclusión en los cursos para aumentar la conciencia entre estudiantes y profesores.
- Establecer programas de mentoría donde empleadas de la compañía actúen como mentoras para mujeres jóvenes que participan en programas de formación, aprendizajes o pasantías. Estas relaciones de mentoría pueden proporcionar orientación, apoyo y aliento a mujeres que buscan carreras en campos tradicionalmente dominados por hombres como la ingeniería.
- Implementar iniciativas para incentivar a más mujeres a seguir estudios y formación en campos STEM, particularmente en ingeniería química y disciplinas relacionadas. Proporcionar becas, programas de mentoría y redes de apoyo puede ayudar a atraer y retener a mujeres en estos campos.
- Aumentar la visibilidad de líderes femeninas exitosas y modelos a seguir dentro de la industria. Resaltar sus logros y trayectorias profesionales puede inspirar y motivar a otras mujeres a seguir carreras en la manufactura química.
- Combatir sesgos inconscientes y estereotipos que perpetúan las desigualdades de género en el lugar de trabajo. Ofrecer programas de capacitación en diversidad y concienciación para educar a los empleados sobre la importancia de la diversidad de género y el impacto de los sesgos en los procesos de toma de decisiones.
- Establecer oportunidades de networking y grupos de apoyo para mujeres en la industria de la manufactura química. Estas plataformas proporcionan un foro para compartir experiencias, intercambiar ideas y ofrecer mentoría y apoyo. Se pueden abordar asociaciones como *Women in Green Hydrogen*, como una plataforma potencial para conectar y empoderar a mujeres que trabajan en el sector del hidrógeno verde y sus derivados.

## 5 BUENAS PRÁCTICAS DEL PROCESO DE COTIZACIÓN

Los procesos de cotización presupuestaria y no vinculantes son relevantes en etapas tempranas del desarrollo de sistemas de producción. Estas cotizaciones proporcionan estimaciones aproximadas de los costos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX) que permite analizar la viabilidad financiera del proyecto. Esta fase se lleva a cabo en colaboración con proveedores de tecnología u OEMs (*Original Equipment Manufacturer*), quienes proveen información técnica y económica relevante para el diseño del sistema. En la etapa de prefactibilidad, las cotizaciones además permiten validar las suposiciones realizadas en el estudio y mejorar la precisión de la estimación para la planta. En la producción de amoníaco, la cotización debería enfocarse en las unidades de proceso principales: la producción de hidrógeno mediante electrólisis, la unidad de separación de aire (ASU) y la síntesis de amoníaco.

En general, las actividades clave en los procesos de cotización son las siguientes:

- 1. Dimensionamiento del proyecto de producción y especificación de parámetros técnico-económicos a consultar:** El primer paso es tener claridad en el dimensionamiento del proyecto y sus equipos para saber qué es exactamente lo que se le va a pedir a los OEMs. En específico:
  - Dimensionamiento del proyecto: Se realiza un análisis exhaustivo para determinar el tamaño óptimo de los equipos, las capacidades requeridas y otros aspectos esenciales en línea con el modelo de negocio establecido.
  - Solicitud de información a los OEM: Se identifican y especifican los datos técnicos y económicos esenciales que se necesitarán de cada fabricante de equipos originales (OEM). Esta información será vital para las etapas posteriores de ingeniería, por lo que se establecen parámetros clave que deben ser definidos con precisión.
- 2. Identificación y contacto con proveedores potenciales:** Una vez definidos con claridad los requisitos del proyecto, se procede a seleccionar cuidadosamente proveedores de equipos originales (OEM) que puedan satisfacer estas necesidades. Esta selección se basa en criterios como la idoneidad tecnológica, la disponibilidad geográfica y la reputación y experiencia del proveedor en el mercado.
- 3. Relacionamiento con OEMs:** Esta fase inicia con una reunión de introducción en donde se presenta un contexto detallado del proyecto, y los hitos específicos y alcance de cotización. En esta etapa también contempla el análisis de la información por parte de los OEMs, reuniones adicionales de profundización y la potencial firma de acuerdos de confidencialidad para el intercambio de información.
- 4. Análisis de cotizaciones y alcances:** Después de recibir las cotizaciones de los proveedores, se realiza un análisis detallado de aspectos técnicos, plazos y costos, incluyendo CAPEX, OPEX y cargos adicionales. Esto permite seleccionar al proveedor más competitivo. Es esencial considerar si la oferta abarca todas las fases del proyecto (EPC siglas de *Engineering, Procurement, Construction*) o solo algunas, para tomar una decisión informada sobre el proveedor más adecuado para cumplir con los objetivos del proyecto.

Adicionalmente **factores externos como el nivel de involucramiento de los grupos de interés y la robustez del proyecto conceptualizado son aspectos clave para la ejecución exitosa de un proceso de cotización.** A continuación, se describen factores relevantes a considerar:

**Demostrar madurez del proyecto de producción y su modelo de negocio** en términos de concepto, consideraciones técnicas y de mercado. Los OEMs reciben demasiadas solicitudes de cotización con diferentes niveles de desarrollo y seriedad. Por esta razón estos típicamente priorizarán las solicitudes que tengan demuestren mayor madurez de los proyectos. Así mismo, entre más avanzado esté un proyecto más probable será obtener respuestas detalladas de los OEMs. Consideraciones como costos, dimensiones y detalles técnicos sólidos deben hacer parte del estudio de prefactibilidad. Además, es crucial elaborar un caso de negocio sólido y transparente que demuestre la viabilidad y el potencial de éxito del proyecto, aumentando así la confianza de los posibles proveedores.

**La participación activa de actores reconocidos en el sector energético/industrial** es fundamental para asegurar un proceso de cotización exitoso.

- Organizaciones responsables del estudio de prefactibilidad con relaciones consolidadas con proveedores.
- Participación de desarrolladores del proyecto en el proceso de cotización.
- El respaldo de grupos de interés externos, como entidades gubernamentales o bancos multilaterales, al estudio de prefactibilidad o al desarrollo del sistema de producción.

**Manejar expectativas y adaptación al mercado:** Es esencial comprender las capacidades y limitaciones de los proveedores y adaptar las especificaciones de la cotización. En general habrá una relación indirectamente proporcional entre la rapidez de respuesta y la cantidad de información requerida. Además, se debe comunicar claramente qué se espera de los OEMs y qué pueden esperar estos actores del proceso.

**Protocolos de comunicación claros y seguimiento continuo:** La comunicación efectiva y el seguimiento constante son fundamentales para garantizar un proceso fluido y transparente. Esto implica establecer puntos únicos de contacto (SPOC) para facilitar la comunicación entre las partes y definir claramente los plazos y expectativas en términos de respuesta y seguimiento.

**Contemplar contingencias de tiempo y riesgos del proceso:** Anticipar posibles contratiempos y riesgos es crucial para mantener el proyecto en curso y evitar interrupciones significativas. Esto puede implicar identificar posibles demoras en el proceso de cotización y establecer planes de contingencia para mitigar su impacto. Por ejemplo, es importante considerar los tiempos que pueden tomar los diferentes ciclos de conversación típicamente requeridos para cerrar acuerdos de confidencialidad con el fin de proteger la información sensible del proyecto y garantizar que se maneje de manera segura y adecuada durante todo el proceso de cotización.

## 6 CONCLUSIONES

Esta sección sintetiza las principales buenas prácticas a ser tenidas en cuenta a durante el desarrollo temprano de una planta de amoníaco de bajas emisiones, tomando en cuenta consideraciones de diseño, modelo de negocio, evaluación de riesgos e impactos ambientales/sociales, y procesos de cotización.

Los sistemas de producción de amoníaco son complejos, requieren el acoplamiento de equipos, unidades y su desempeño técnico-económico, y la integración de componentes socioambientales. La metodología *Systems Engineering* permite encontrar el diseño óptimo del sistema y considere restricciones técnicas, económicas, ambientales y sociales. Este diseño asegura un dimensionamiento robusto que maximiza el rendimiento y la eficiencia del sistema, y al mismo tiempo considera intereses de involucrados. Este enfoque sistémico minimiza cambios abruptos en etapas posteriores de ingeniería, y fortalece la sostenibilidad y competitividad en el mercado.

Considerando la viabilidad financiera del modelo de negocio de una planta de producción de amoníaco de bajas emisiones, se ha identificado que esta podría beneficiarse significativamente con la aplicación de los incentivos tributarios establecidos en la Ley 1715 de 2014. Aunque actualmente estos incentivos solo se aplican a la cadena de producción del hidrógeno, la incorporación de los equipos asociados con la producción de amoníaco aumentaría considerablemente el beneficio y la rentabilidad del proyecto. Adicionalmente, esta medida también evitaría que el precio final del amoníaco y los fertilizantes tenga que aumentar de manera drástica para alcanzar rentabilidades atractivas, lo que evitaría un impacto negativo directo en los clientes finales.

En este sentido, se invita al gobierno a considerar la importancia de incluir los equipos para la producción de amoníaco en el listado de bienes elegibles para estos beneficios. El amoníaco se perfila como un vector energético de bajas o nulas emisiones en el futuro, por lo que esta medida contribuiría a la descarbonización de ciertas industrias y a avanzar en las metas nacionales de descarbonización. Esta inclusión promoverá la soberanía alimentaria del país al permitir la producción local de fertilizantes, sin depender de la importación de amoníaco y de la volatilidad de sus precios.

En etapas tempranas de sistemas de producción de amoníaco, analizar riesgos e impactos ambientales y sociales favorece el cumplimiento de regulaciones ambientales y estándares de sostenibilidad mientras son abordados puntos críticos de su desarrollo. La evaluación de riesgos permite desarrollar estrategias a corto, mediano y largo plazo para reducir la exposición del proyecto a factores que puedan afectar el modelo de negocio. Entre estas estrategias, se resalta la importancia de poder concretar contratos a largo plazo, tanto con proveedores de equipos como con potenciales consumidores, a fin de mitigar los riesgos asociados con las fluctuaciones típicas del mercado. Así mismo es clave optar por fuentes de financiación de procedencia diversa, que permita acceder a condiciones de préstamo atractivas y lograr retornos financieros.

Actualmente la regulación ambiental del país no cuenta con términos de referencia para la evaluación ambiental de proyectos de hidrógeno y de amoníaco bajos en emisiones, se debe hacer un análisis meticuloso de los posibles impactos ambientales que se puedan derivar del proyecto, teniendo en cuenta las características específicas del terreno donde este será desarrollado, a fin de identificar medidas de mitigación y adaptación que deban ser puestas

en marcha durante todas las fases de desarrollo, operación y cierre del mismo. En cuanto a los impactos sociales, existen varios mecanismos que pueden ser adoptados por los desarrolladores del proyecto, a fin de que este contribuya a reducir la brecha de género en los sectores químico y de energías. Algunas de estas estrategias incluyen establecer programas de mentoría, implementar campañas dirigidas a mujeres interesadas en seguir carreras técnicas y trabajar con universidades locales para promover la igualdad de género y combatir sesgos y estereotipos que impacten la participación de las mujeres en la industria química.

La consecución de cotizaciones presupuestarias es clave para conseguir estimaciones de costos operativos y de capital que permiten evaluar la viabilidad financiera del proyecto y confirmar supuestos utilizados en el estudio de prefactibilidad. En la producción de amoníaco, se debe priorizar la cotización de las unidades de proceso principales: producción de hidrógeno, la unidad de separación de aire y la síntesis de amoníaco. La definición de un modelo de negocio robusto en términos de diseño, análisis de mercado e involucramiento de grupos de interés son factores favorecen la ejecución del proceso. La comunicación clara y el seguimiento continuo, junto con la previsión de contingencias y riesgos, son elementos esenciales para mantener el proyecto en curso y evitar interrupciones significativas.

## BIBLIOGRAFÍA

- A. Abdalla, S. H. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Convers Manag*.
- AACE Internacional. (2020). *Cost Estimate Classification System*.
- AEA. (2020). *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*. Oxford: Elsevier.
- AEA, I. a. (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. Abu Dhabi, Brookly: International Renewable Energy Agency, Ammonia Energy Association.
- AEA; IRENA. (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. Abu Dhabi, Brooklyn: International Renewable Energy Agency, Ammonia Energy Association.
- Air Liquide. (2023, 6 1). *Hidrogênio, da produção à distribuição*. Retrieved from <https://br.airliquide.com/hidrogenio-da-producao-a-distribuicao>
- ALADYR. (2019). *ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE DESALACIÓN Y REÚSO DE AGUA*. Retrieved from <https://aladyr.net/>
- Argus. (2016). *World Ammonia Outlook to 2030*. Argus Media Group.
- BloombergNEF. (2020). *Hydrogen Economy Outlook*.
- Böhm, M., Rey, A. F., Pagenkopf, J., Varela, M., Herwartz-Polster, S., & Calderón, B. N. (2022). Review and comparison of worldwide hydrogen activities in the rail sector with special focus on on-board storage and refueling technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38003-38017.
- Brown, T. (1 de 6 de 2023). *MAN Energy Solutions: an ammonia engine for the maritime sector*. Obtenido de <https://www.ammoniaenergy.org/articles/man-energy-solutions-an-ammonia-engine-for-the-maritime-sector/>
- Cai, R., Ma, H., Yang, C., Zhao, K., Liang, X., & Han, Y. (2021). Research on the Problem of Salt Carried by Gas Injection and Withdrawal of Underground Salt Caverns Gas Storage. *U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*.
- Comité científico de cambio climático. (2022). *Desalinización: Oportunidades Y Desafíos Para Abordar La Inseguridad Hídrica En Chile*. Santiago.
- Confederação Nacional da Indústria. (2022). *Hidrogênio sustent vel : perspectivas e potencial para a indústria brasileira*. Brasília.
- Deloitte, Monitor. (2021). *Fueling the future of mobility: hydrogen electrolyzers*.
- Department for Business, Energy and Industrial Strategy. (2021). *UK Hydrogen Strategy*. UK.
- Ecuity; STFC; Engie; Siemens. (2020). *Ammonia to Green Hydrogen Project*.
- Elberry, A. M., Thakur, J., Santasalo-Aarnio, A., & M. Larmi. (2021). Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15671-15690.
- European Hydrogen Backbone. (2021). *Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen*.

- Ghafri, S. Z., Munro, S., Cardella, U., Funke, T., Notardonato, W., Trusler, J. P., . . . R. Span, S. K. (2022). Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities. *Energy Environ. Sci*, 2690-2731.
- Google Maps. (2023). Google Maps. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.com/maps>
- H2e Power. (2023, 12 1). *Green Hydrogen*. Retrieved from <https://www.h2epower.net/green-hydrogen/>
- Hwang, H. T., & Varma, A. (2014). Hydrogen storage for fuel cell vehicles. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 42-48.
- Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective*. Hydrogen Council.
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. Paris: IEA.
- IEA. (2021). *Ammonia Technology Roadmap*. International Energy Agency.
- IEA. (2021). *World Energy Outlook 2021*. Paris.
- IEA. (2022). *Global Hydrogen Review 2022*. Paris: IEA.
- IRENA . (2022). *Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Part II Technology review of hydrogen carriers*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- jizanne, H., Rueda, C. M., Brouard, B., Bérest, P., & Hévin, G. (2022). Blowout Prediction on a Salt Cavern Selected for a Hydrogen. *Energies*, 7755.
- Kawasaki. (01 de 08 de 2023). *Kawasaki Completes Basic esign for World's Largest Class (11,200-cubic-meter) Spherical Liquefied Hydrogen Storage Tank*. Obtenido de <https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20201224>
- Martins, W. (2023, 6 2). *White Martins - Hidrogênio*. Retrieved from <https://www.whitemartins.com.br/gases/buy-compressed-hydrogen-gas-or-liquid-hydrogen?tab=op%C3%A7%C3%B5es-de-abastecimento>
- Modisha, P. M., Ouma, C. N., Garidzirai, R., Wasserscheid, P., & D. Bessarabov. (2019). The Prospect of Hydrogen Storage Using Liquid Organic Hydrogen Carriers. *Energy Fuels*, 2778-2796.
- Monsma, V., Illson, T., Thodla, R., & Hussain, A. (2023, 12 1). *Repurposing Onshore Pipelines for Hydrogen: Guiding operators through the re-evaluation process*. Retrieved from <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/repurposing-pipelines-for-hydrogen-guiding-operators-through-the-re-evaluation-process.html>
- Moradi, R., & Groth, K. (2019). Hydrogen storage and delivery: review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Muhammed, N. S., Haq, B., Shehri, D. A., Al-Ahmed, A., Rahman, M. M., & Zaman, E. (2022). A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. *Energy Reports*, 461-499.

- Nel. (2023, 12 1). *Atmospheric Alkaline Electrolyser*. Retrieved from <https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>
- Papadias, D. D., Peng, J.-K., & Ahluwalia, R. K. (2021). Hydrogen carriers: Production, transmission, decomposition, and storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24169-24189.
- Patonia, A., & Poudineh, R. (2023). *Hydrogen storage for a net-zero carbon future*. Oxford: The Oxford Institute for Energy Studies.
- Serrano, A. (2019). *Project Finance Aplicado a Energía Renovable*. Financiera de Desarrollo Nacional, Financiación. Obtenido de [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Finanzas-del-Clima-2019/5.%20Financiaci%C3%B3n%20de%20Proyectos\\_Andr%C3%A9s%20Serrano\\_FDN.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Finanzas-del-Clima-2019/5.%20Financiaci%C3%B3n%20de%20Proyectos_Andr%C3%A9s%20Serrano_FDN.pdf)
- Tang, D., Tan, G.-L., Li, G.-W., Liang, J.-G., Ahmad, S. M., Bahadur, A., . . . M. Bououdina. (2023). State-of-the-art hydrogen generation techniques and storage methods: A critical review. *Journal of Energy Storage*, 107-196.
- Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86-94.
- The Oxford Institute For Energy studies. (2022). *Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolyzers?*
- TransAtlantic. (2023, 7 1). *Helpful Information: The basic information you need to know before shipping your cargo*. Retrieved from <http://www.t-atlantic.com/?p=792>
- U.S. Energy Information Administration. (2022). Obtenido de U.S. Energy Information Administration: <https://www.eia.gov/naturalgas/data.php#prices>
- Union Pacific. (2023, 8 1). *12 Train Facts You Might Not Know*. Retrieved from <https://www.up.com/customers/track-record/tr030822-12-train-facts-you-might-not-know.htm#:~:text=Most%20rail%20cars%20can%20have,the%20intersta>
- Xu, Z., Zhao, N., Hillmansen, S., Roberts, C., & Yan, Y. (2022). Techno-Economic Analysis of Hydrogen Storage Technologies for Railway Engineering: A Review. *Energies*.