



**Universidad de Concepción**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**Diseño y evaluación tecno-económica de una  
infraestructura compartida que facilite la producción de  
amoníaco renovable con fines de exportación, en la  
región de Antofagasta.**

Por

**Yerko Sebastián Salas Jara**

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

Profesor guía

José Matías Garrido

Profesional supervisor

Hans Kulenkampff

Marzo 2024

Concepción (Chile)

©2024 Yerko Sebastián Salas Jara

©2024 Yerko Sebastián Salas Jara

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

## **Agradecimientos**

A mis padres, por el apoyo incondicional y comprensión en cada etapa de mi vida

Al equipo de HINICIO - Chile, en particular a Hans Kulenkampff por darme la oportunidad de colaborar y sumergirme en el mundo de las energías renovables y a Alvaro Bobadilla por su permanente apoyo, orientación y excelente disposición durante el desarrollo de este trabajo.

Al Departamento de Ingeniería Química, por las herramientas y conocimientos entregados a lo largo de la carrera que me formaron como profesional.

## Resumen

La producción de amoníaco ( $NH_3$ ) a partir de hidrógeno renovable es una gran oportunidad para Chile, especialmente en Antofagasta, que tiene recursos renovables de primer nivel para la producción de combustibles renovables. Surge la posibilidad de establecer una infraestructura de uso común (CUI) para coordinar proyectos, la cual tiene el potencial de reducir costos, facilitar permisos y evitar uso ineficiente del territorio, sin embargo, su efecto en Antofagasta no ha sido determinado.

Este trabajo abordó el diseño de CUI en el contexto de plantas de producción de  $NH_3$  renovable en Antofagasta, comparando la operación individual de los proyectos con la operación compartida mediante un análisis tecno-económico. Se desarrollaron dos enfoques: uno conceptual, que estimó los costos de elementos CUI; y otro práctico, que realizó un estudio de optimización de la cadena de valor. Se consideraron tres proyectos de producción, con volúmenes de producción de 20,000, 170,000, 500,000 ton  $NH_3$ /año, y distancias de 194, 152 y 100 km respectivamente al puerto de Mejillones, luego se definieron cuatro escenarios con diversas configuraciones de plantas de producción y consideraciones de CUI.

La metodología consistió en dimensionar la cadena de valor de los tres proyectos de manera individual mediante una optimización antes de evaluar el sistema completo con la integración de CUI, se mantuvieron constantes los tamaños de los equipos no compartidos. Los costos de CUI se distribuyeron proporcionalmente según el volumen de producción de cada proyecto. Se realizó una comparación de los costos nivelados de amoníaco (LCOA) sistémicos y de proyecto.

Se obtuvo una reducción promedio de la inversión CUI de un 33% la cual equivale a un 3.5% menos del LCOA sistémico. Las tuberías de hidrógeno, de agua y la planta desalinizadora, fueron los equipos con mayor influencia en la reducción de inversión CUI, con una influencia promedio del 72%, 19%, 19%, respectivamente. El proyecto 1 de menor escala, experimentó la mayor reducción del LCOA, con un promedio de 24%, mientras que el proyecto 2, asociado al mayor volumen de producción, observó la menor reducción, un 2%.

Los resultados entregan un punto de partida para considerar la implementación de una CUI en Antofagasta, sin embargo, se recomiendan más investigaciones para maximizar sus beneficios.

## Abstract

The production of ammonia ( $NH_3$ ) from renewable hydrogen presents a significant opportunity for Chile, particularly in Antofagasta, which boasts top-tier renewable resources that allows the production of renewable fuels. The possibility to establish a Common User Infrastructure (CUI) arises to coordinate ongoing projects, with potential to reduce costs, streamlined permitting processes and efficient land use, however, its potential in Antofagasta has not been determined.

This study addressed the design of a CUI in the context of renewable  $NH_3$  production plants in Antofagasta, comparing individual operation of the projects with shared operation through a techno-economic analysis. Two approaches were developed: a conceptual one, estimating the costs of CUI elements, and a practical one, optimizing and economically analyzing the value chain. Three production projects were considered, with production volumes of 20,000, 170,000, and 500,000 tons  $NH_3$ /year, and distances of 194, 152, and 100 km, respectively, to Mejillones port. Four scenarios with various production plant configurations and CUI considerations were defined.

The methodology involved sizing of the individual value chain of the three projects individually before evaluating the entire system with CUI integration. The sizes of non-shared equipment, determined during individual optimization, remained constant. CUI-associated costs were distributed proportionally according to the production volume of each project. Levelized costs of ammonia (LCOA) were compared systemically and by project across all scenarios.

An average reduction of 33% in CUI investment was obtained, corresponding to an average reduction of 3.5% in the systemic LCOA. Hydrogen pipelines, water pipelines, and the desalination plant were the equipment with the greatest influence on reducing CUI investment, with an average influence of 72%, 19%, and 19%, respectively, in their contribution to CUI investment. The smallest-scale project 1 experienced the greatest LCOA reduction, averaging 24%, while project 2, associated with the largest production volume, observed the smallest reduction, at 2%.

The results provide a starting point for considering the implementation of CUI in Antofagasta; however, further research is recommended to maximize its benefits.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>5</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	5
2.2. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>3. Materiales y metodos</b>	<b>6</b>
3.1. Software de optimización ANDREA . . . . .	7
3.2. Definición de infraestructura de uso común (CUI) . . . . .	7
3.3. Enfoque conceptual: Estimación de costos de tecnologías CUI . . . . .	9
3.3.1. Estimación de costos: Línea de transmisión . . . . .	11
3.3.2. Estimación de costos: Tubería de $H_2$ . . . . .	11
3.3.3. Estimación de costos: Tubería de $NH_3$ . . . . .	12
3.4. Enfoque práctico: Evaluación de escenarios en Antofagasta con uso de CUI . . .	12
3.4.1. Definición de escenarios . . . . .	12
3.4.2. Definición de supuestos . . . . .	17
3.4.3. Dimensionamiento de la cadena de valor individual . . . . .	17
3.4.4. Evaluación del sistema con infraestructura compartida (CUI) . . . . .	18
3.4.5. Análisis de resultados . . . . .	18
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>19</b>
4.1. Resultados análisis de costos . . . . .	19
4.2. Resultados y análisis - Escenario 1 . . . . .	21
4.3. Resultados y análisis - Escenario 2 . . . . .	25
4.4. Resultados y análisis - Escenario 3 . . . . .	30
4.5. Resultados y análisis - Escenario 4 . . . . .	33
4.6. Comparación entre escenarios . . . . .	37
<b>5. Conclusiones</b>	<b>39</b>
<b>A. Apéndice A: Supuestos tecno-económicos</b>	<b>43</b>

B. Apéndice B: Gráficos de cascada cadena de valor completa	46
C. Apéndice C: Nomenclatura equipos	47

## Índice de figuras

3.1. Diagrama de funcionamiento de la herramienta ANDREA . . . . .	7
3.2. Diagrama de flujo conceptual para la configuración con línea de transmisión. . .	10
3.3. Diagrama de flujo conceptual para la configuración con tubería de $H_2$ . . . . .	10
3.4. Diagrama de flujo conceptual para la configuración con tubería de $NH_3$ . . . . .	10
3.5. Distribución de los proyectos de producción y puerto en la región de Antofagasta	13
3.6. Trazado de transporte desde cada proyecto al puerto, siguiendo la infraestructura existente (Colores usados solo para diferenciar las rutas) . . . . .	13
3.7. Escenario 1: Operación individual v/s Operación compartida . . . . .	15
3.8. Escenario 2: Operación individual v/s Operación compartida . . . . .	15
3.9. Escenario 3: Operación individual v/s Operación compartida . . . . .	16
3.10. Escenario 4: Operación individual v/s Operación compartida . . . . .	17
4.1. Mapa de calor línea de transmisión . . . . .	19
4.2. Mapa de calor tubería de $H_2$ . . . . .	20
4.3. Mapa de calor tubería de $NH_3$ . . . . .	20
4.4. Escenario 1 simplificado . . . . .	21
4.5. Resultados sistémicos escenario 1 . . . . .	22
4.6. Escenario 1- Gráfico de cascada proyecto 1 . . . . .	24
4.7. Escenario 1 - Gráfico de cascada proyecto 2 . . . . .	24
4.8. Escenario 1 - Gráfico de cascada proyecto 3 . . . . .	25
4.9. Escenario 2 simplificado . . . . .	26
4.10. Resultados sistémicos escenario 2 . . . . .	27
4.11. Escenario 2 - Gráfico de cascada proyecto 1 . . . . .	28
4.12. Escenario 2 - Gráfico de cascada proyecto 2 . . . . .	29
4.13. Escenario 2 - Gráfico de cascada proyecto 3 . . . . .	29
4.14. Escenario 3 simplificado . . . . .	30
4.15. Resultados sistémicos escenario 3 . . . . .	31
4.16. Escenario 3 - Gráfico de cascada proyecto 1 . . . . .	32
4.17. Escenario 3 - Gráfico de cascada proyecto 2 . . . . .	32
4.18. Escenario 3 - Gráfico de cascada proyecto 2 . . . . .	33

4.19. Escenario 4 simplificado . . . . .	33
4.20. Resultados sistémicos escenario 4 . . . . .	34
4.21. Escenario 4 - Gráfico de cascada proyecto 1 . . . . .	36
4.22. Escenario 4 - Gráfico de cascada proyecto 2 . . . . .	36
4.23. Escenario 4 - Gráfico de cascada proyecto 3 . . . . .	36
4.24. Contribución al LCOA sistémico de los elementos CUI de cada escenario . . . . .	37
4.25. LCOA sistémico de cada escenario . . . . .	37
B.1. Escenario 1 - LCOA cadena de valor completa . . . . .	46
B.2. Escenario 2 - LCOA cadena de valor completa . . . . .	46
B.3. Escenario 3 - LCOA cadena de valor completa . . . . .	47
B.4. Escenario 4 - LCOA cadena de valor completa . . . . .	47
C.1. Nomenclatura equipos . . . . .	47
C.2. Simplificación de símbolos de los equipos . . . . .	48

## Índice de tablas

3.1. Resumen datos de ubicación y producción de los proyectos escogidos . . . . .	14
4.1. Resultados tecno-económicos escenario 1 . . . . .	22
4.2. Resultados sistémicos escenario 1 . . . . .	22
4.3. Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 1 . . .	23
4.4. Resultados tecno-económicos escenario 2 . . . . .	26
4.5. Resultados sistémicos escenario 2 . . . . .	27
4.6. Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 2 . . .	27
4.7. Resultados tecno-económicos escenario 3 . . . . .	30
4.8. Resultados sistémicos escenario 3 . . . . .	31
4.9. Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 3 . . .	31
4.10. Resultados tecno-económicos escenario 4 . . . . .	34
4.11. Resultados sistémicos escenario 4 . . . . .	34
4.12. Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 4 . . .	35
A.2. Escenario - 1: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados . . . . .	43
A.3. Escenario - 2: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados . . . . .	43
A.1. Datos tecno-económicos cadena de valor de producción de amoníaco . . . . .	44
A.4. Escenario - 3: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados . . . . .	45
A.5. Escenario - 4: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados . . . . .	45

## Nomenclatura

$H_2$	.....	<i>Hidrógeno</i>
$NH_3$	.....	<i>Amoníaco</i>
CUI	.....	<i>Common user infrastructure</i>
ER	.....	<i>Energía renovable</i>
EZ	.....	<i>Electrolizador</i>
LCOA	.....	<i>Levelized cost of ammonia</i>
MILP	.....	<i>Mixed-Integer Linear Problem</i>
Planta HB	.....	<i>Planta Haber-Bosch</i>
PV	.....	<i>Panel fotovoltaico</i>
TAC	.....	<i>Total Annualized Cost</i>

# 1 Introducción

El hidrógeno renovable se ha destacado como una alternativa prometedora para el almacenamiento y transporte de energía, su producción a través de la electrólisis del agua utilizando energía renovable permite la generación de un combustible limpio y versátil, este puede ser utilizado como alternativa libre de emisiones de carbono en una variedad de sectores, desde la industria hasta el transporte.

Este trabajo, se centra en la producción de  $NH_3$ , como una forma utilizar, almacenar o transportar hidrógeno renovable, debido a que es más fácil de licuar, almacenar, transportar y tiene una mayor densidad energética que el  $H_2$ . Junto con lo anterior, la producción de amoníaco contribuye con más de un 1% de las emisiones globales, por lo que la transición hacia una producción renovable de amoníaco representa una oportunidad crucial para la descarbonización a corto plazo [1]. El amoníaco cuenta con un amplio mercado mundial en transporte, energía, agricultura y minería, siendo relevante en Chile para la industria de explosivos [1], lo que lo convierte en una alternativa viable y competitiva, tanto para satisfacer la demanda local, como la de exportación hacia otros mercados.

Las condiciones de Chile, al contar con recursos de energía renovable variable de primera clase, desde el recurso solar más potente del mundo en el norte hasta excelentes vientos en el extremo sur, lo sitúa en una posición ventajosa para la producción sostenible de hidrógeno electrolítico y, por ende, de amoníaco renovable. Esta oportunidad única permite desarrollar una industria competitiva de hidrógeno y amoníaco renovable, utilizando electricidad producida con recursos renovables de bajo costo para impulsar una economía sustentable, tanto a nivel local como de exportación [2]. Se aspira a satisfacer la demanda local y parte de esta demanda internacional mediante diversos proyectos de producción de  $NH_3$  renovable actualmente en desarrollo o tramitación en el país, principalmente en Antofagasta, dado que es la capital energética del país por sus capacidades en materia de energías renovables, y las grandes posibilidades que posee la región de convertirse en un exportador de energía, presentando una de las radiaciones solares más altas de planeta, lo que le permite producir un amoníaco renovable competitivo y a gran escala [3].

Con el desarrollo de esta industria, los valles de hidrógeno están apareciendo en todo el mun-

do y Chile no es una excepción, en estos se desarrolla un ecosistema de hidrógeno con varias aplicaciones, y se presentan condiciones ideales para el desarrollo de proyectos. Considerando la simultaneidad de estos proyectos, el desarrollo de nueva infraestructura es necesario, en este contexto surge la posibilidad de establecer una infraestructura de uso común (*Common User Infrastructure*, CUI) como una opción a evaluar. Esta iniciativa de coordinación tiene el potencial de reducir costos, evitar uso ineficiente del territorio, reducir contaminación visual al centralizar ductos, líneas de transmisión, etc, beneficiando a las múltiples partes implicadas en estas iniciativas, también puede reducir las barreras de entrada para el desarrollo de proyectos y posible obtención de economías de escala, sin embargo, el potencial tecno-económico real de CUI en Antofagasta aún no se determina.

Este trabajo consiste en el diseño de una infraestructura de usuario común (CUI) y evaluación tecno-económica en el contexto de un sistema consistente en plantas de producción de amoníaco renovable que utilicen CUI diseñada en Antofagasta para la exportación de amoníaco contrastando la operación individual de productores de amoníaco con su operación usando CUI. El alcance de cada proyecto incluye una cadena de valor integrada de producción de amoníaco que comprende la generación de electricidad renovable, una planta de producción de hidrógeno, nitrógeno y plantas de producción de amoníaco, infraestructuras de transporte, almacenamiento y distribución de amoníaco al puerto.

Para seleccionar un escenario realista de implementación de CUI dentro de la región, se utilizan las posibles ubicaciones vinculadas a un factor de planta solar cercano a 30% y volúmenes de producción de amoníaco factibles dentro de las magnitudes de proyectos en desarrollo o tramitación. Dependiendo de la tecnología utilizada como CUI las plantas de hidrógeno y amoníaco están situadas en la costa o donde se encuentren los recursos renovables. En cuanto a la disponibilidad de fuentes de energía renovable (ER), el esquema de suministro eléctrico se basará en la conexión directa con activos de ER con conexión parcial a la red, considerando el uso de baterías. Las opciones de ER se centrarán en solar fotovoltaica y eólica. Al diseñar CUI, es fundamental considerar las limitaciones en el trazado de la región, por lo tanto, se parte de la premisa de que el trazado de CUI de transporte seguirá la ruta más directa hacia el puerto, este trazado se alinea con infraestructuras existente, como gaseoductos, redes de carreteras y líneas de transmisión, además, se considera que esta CUI se construirá desde cero sin reutilizar

infraestructura existente.

El proyecto consta de dos enfoques diferentes.

### 1. **Enfoque conceptual: Estimación de costos de tecnologías CUI**

El primer enfoque consta de una estimación económica para obtener los costos de transporte de línea de transmisión y tuberías de  $H_2$  y  $NH_3$  que tienen el potencial de ser utilizadas como CUI en diferentes escenarios de distancias y volumen de producción con el fin de tener los datos económicos de estos elementos y usarlos en el enfoque posterior.

### 2. **Enfoque práctico: Evaluación de escenarios en Antofagasta con uso de CUI**

La segunda etapa es un enfoque práctico que utiliza los costos de las tecnologías de interés obtenidos en el enfoque conceptual y dimensiona la cadena de valor completa utilizando el software de optimización ANDREA de Hinicio.

En primer lugar, se optimiza la cadena de valor individual de cada proyecto y luego se evalúa el sistema considerando todos los proyectos utilizando CUI, bajo un escenario realista en la región, para después determinar si existen beneficios al implementar CUI o si es más conveniente la operación individual. Se realiza en 5 pasos:

#### **a) Definición de escenarios:**

- Selección de tres proyectos de producción que poseen diferentes volúmenes de producción de  $NH_3$  y diversas distancias al puerto de Mejillones, tal que permitan entender el impacto de CUI en actores de diferentes escalas.
- Definición de 4 escenarios que usan diferentes tecnologías de transporte ya sea de electricidad,  $H_2$  o  $NH_3$ , que implican diferentes configuraciones de las plantas de producción de  $H_2$  y  $NH_3$  en cada proyecto, además de diferentes consideraciones en cada escenario sobre que activos son CUI en cada escenario.

**b) Definición de supuestos:** Se definen los supuestos tecno-económicos para cada equipo perteneciente a la cadena de suministro de producción de  $NH_3$  renovable.

**c) Dimensionamiento de la cadena de valor individual:**

- Utilización de resultados del enfoque conceptual como datos económicos de las tecnologías CUI en el software ANDREA de optimización.
- Dimensionamiento de la cadena de valor de cada proyecto operando de manera individual a partir de una optimización
- Procesamiento de resultados
- Obtención de métricas: CAPEX y costo nivelado de amoníaco (LCOA) a nivel sistémico y de cada proyecto en operación individual.

*d)* **Evaluación del sistema con infraestructura de uso común (CUI)**

- Evaluación del sistema considerando todos los proyectos utilizando CUI, manteniendo fijas las capacidades óptimas de los paneles solares, electrolizador y planta Haber-Bosch obtenidas en el dimensionamiento de la cadena de valor individual.
- Distribución de costos de CUI en base al volumen de producción de cada proyecto.
- Obtención de métricas: CAPEX y LCOA a nivel sistémico y de cada proyecto en operación compartida.

*e)* **Análisis de resultados:**

- Comparación del LCOA sistémico y de cada proyecto operando de forma individual versus el sistema operando de forma compartida.
- Análisis y justificación de las diferencias en costos de los elementos utilizados como CUI.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Diseñar y evaluar la ventaja tecno-económica de una infraestructura de uso común (CUI) en un marco multi-proyecto que permita la producción de amoníaco a partir de fuentes de energía renovable en la región de Antofagasta.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Validar los potenciales beneficios económicos de diversos escenarios con uso de CUI, tanto a nivel de sistema como a nivel de proyectos individuales.
- Demostrar la viabilidad técnica de los escenarios que involucran el uso de CUI.
- Entregar recomendaciones para el desarrollo de CUI en la región de Antofagasta.

### 3 Materiales y metodos

En esta sección, se presenta la metodología utilizada para abordar el diseño y evaluación de la infraestructura de uso común (CUI) en el contexto de proyectos en Antofagasta, la investigación adopta dos enfoques, uno conceptual inicial con uno práctico para evaluar la viabilidad de la implementación de CUI.

En primer lugar, se lleva a cabo un enfoque conceptual para estimar costos de las tecnologías de transporte de electricidad,  $H_2$  y  $NH_3$  que pueden ser CUI. Este enfoque proporciona una primera aproximación de los recursos y la inversión requerida para establecer parte de la infraestructura compartida. Posteriormente, se lleva a cabo un enfoque práctico que implica la evaluación de proyectos de producción de amoníaco en Antofagasta, se analiza la operación de estos proyectos tanto individualmente como con la presencia de CUI, con el objetivo de determinar si la implementación de esta infraestructura mejora el caso de negocio y la viabilidad económica de los proyectos.

Esta comparación se hace en base a comparar el costo nivelado de amoníaco (LCOA), el LCOA es una métrica utilizada para calcular el costo de producir amoníaco a lo largo de la vida útil de una planta de producción. Este costo se calcula considerando todos los gastos de capital, operativos y de mantenimiento asociados con la construcción y operación de la planta. El LCOA permite comparar la viabilidad económica de diferentes proyectos de producción de amoníaco.

Se habla en el trabajo de LCOA sistémico, el cual representa esta métrica para un sistema incluyendo todos los proyectos o plantas de producción de amoníaco, y de LCOA proyecto, el cual se corresponde con la métrica específicamente para una planta o proyecto de producción de  $NH_3$ .

A través de este enfoque combinado, se busca proporcionar una evaluación integral del efecto de la infraestructura de uso común en el contexto específico de Antofagasta.

### 3.1 Software de optimización ANDREA

ANDREA (Advanced Energy System Modeling and Analytics) es un software de uso interno de Inicio que permite determinar la configuración óptima de un sistema energético que involucra un proceso multi-fluido enmarcado en el desarrollo de proyectos Power-to-X.

La herramienta resuelve un MILP (Mixed-Integer Linear Problem) para obtener el diseño y curva de operación del sistema, minimizando el “Costo total anualizado (TAC)” al primer año, luego realiza un balance energético adicional que considera el consumo extra requerido para compensar la degradación de los equipos clave a lo largo de la vida útil del proyecto.

Para ejemplificar el funcionamiento de ANDREA se tiene el siguiente diagrama 3.1

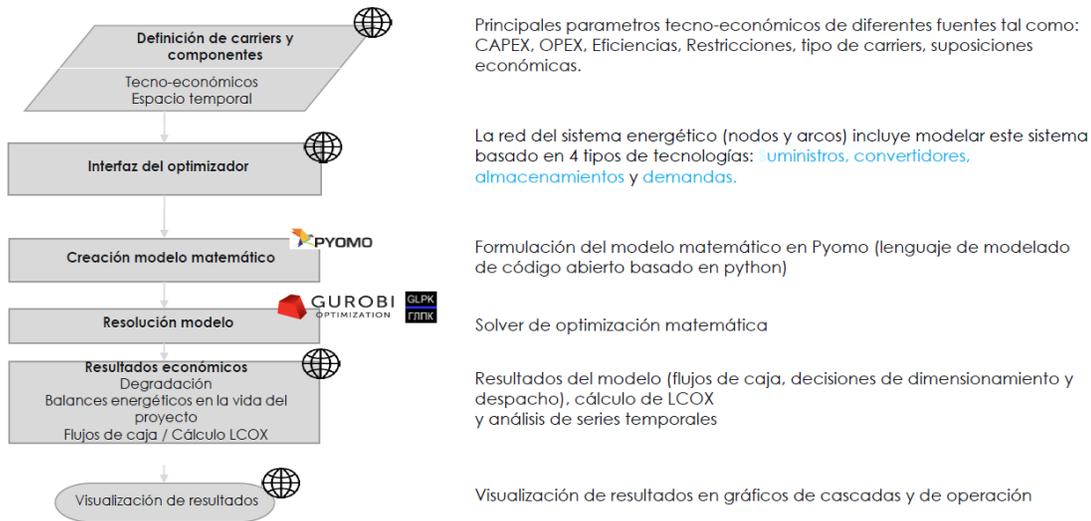


Figura 3.1: Diagrama de funcionamiento de la herramienta ANDREA

### 3.2 Definición de infraestructura de uso común (CUI)

La infraestructura de usuario común (CUI) permite compartir la capacidad de activos físicos entre múltiples usuarios sujeto a una serie de condiciones definidas, esta infraestructura puede ser propiedad de entidades públicas o privadas, que también pueden gestionarla y suministrarla. La CUI beneficia al gobierno, la industria y la comunidad cuando se propone la solución adecuada, esto puede incluir un menor coste de inversión, una mayor competitividad, una menor duplicación de las infraestructuras y un uso más eficiente del suelo [7].

La infraestructura de uso común (CUI), se corresponde con activos compartidos por los proyectos, los cuales para este trabajo pueden ser:

- Planta desalinizadora
- Tuberías de  $H_2$
- Tuberías de suministro de agua
- Tuberías de  $NH_3$
- Líneas de transmisión y subestaciones
- Estanque de  $NH_3$

Es importante mencionar que la CUI solo se puede implementar en conexiones entre proyectos que hagan sentido del punto de vista del recorrido que cada proyecto tenga hacia el puerto, bajo esa premisa habrán secciones individuales y compartidas.

Respecto a los equipos a compartir, para la planta desalinizadora se considerará ubicada en lugares convenientes en la costa donde ya existen otras plantas. El trazado escogido para las tuberías o líneas de transmisión compartidas, es el trazado más directo que permita compartir infraestructura, alineando lo anterior con los trazado que sigue la infraestructura existente (tuberías de gas y carreteras). Se considera que la CUI es construida desde cero, sin reutilización o consideración de infraestructura existente.

Como la inversión en CUI es compartida, es necesario definir una forma de distribución de costos para repartir la inversión, esto se realizará proporcionalmente al volumen de amoniaco que produce cada proyecto respecto al total, se muestra un ejemplo de calculo:

- Planta desalinizadora | inversión de 20 M USD: Compartida por tres proyectos, los cuales tienen un volumen de producción de 50 000 ton  $NH_3$ /año, 100 000 ton  $NH_3$ /año, 150 000 ton  $NH_3$ /año respectivamente.

La distribución de costos sería de la siguiente manera:

Inversión proyecto 1 :

$$\$20\,000\,000\ USD * \frac{50000}{50000 + 100000 + 150000} = \$ 3\,333\,333\ USD (16.67\%)$$

Inversión proyecto 2 :

$$\$20\,000\,000\ USD * \frac{100000}{50000 + 100000 + 150000} = \$6\,666\,667\ USD\ (33.33\%)$$

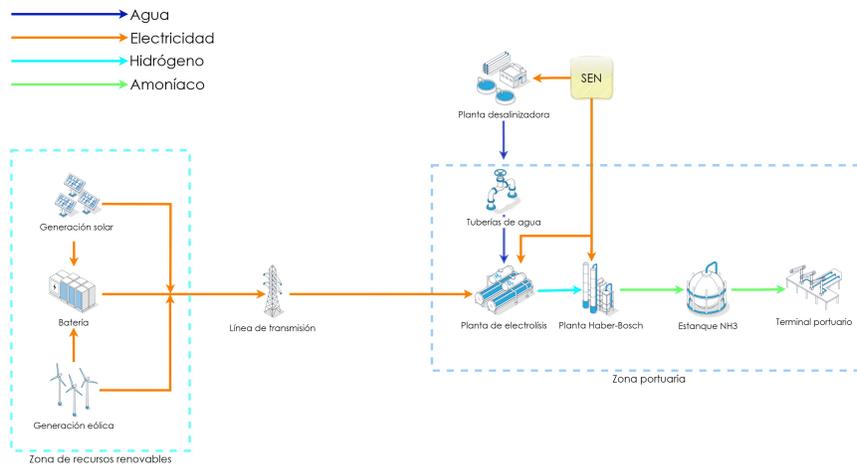
Inversión proyecto 3 :

$$\$20\,000\,000\ USD * \frac{150000}{50000 + 100000 + 150000} = \$10\,000\,000\ USD\ (50\%)$$

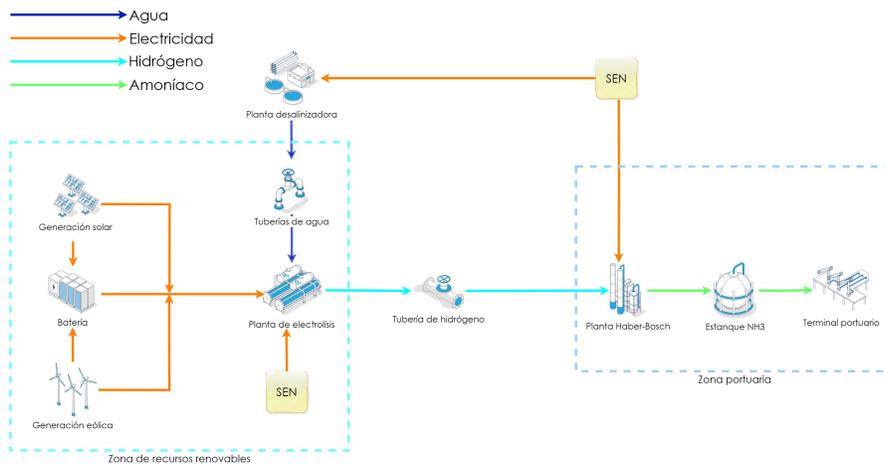
### 3.3 Enfoque conceptual: Estimación de costos de tecnologías CUI

Las diversas configuraciones que puede tener un proyecto Power-to-Ammonia, están determinadas por la ubicación del electrolizador y la planta Haber-Bosch respecto a la ubicación de los recursos renovables. En términos generales dependiendo la tecnología de electrones o moléculas utilizada se pueden tener tres tipos de configuraciones.

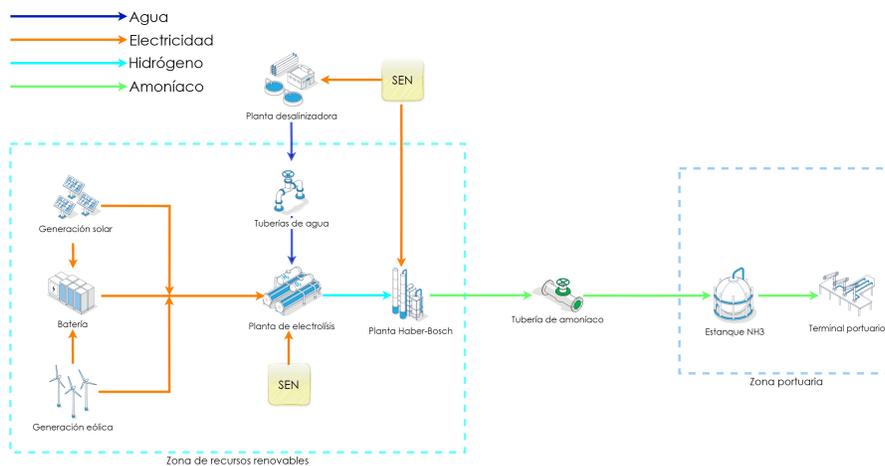
1. **Producción de  $H_2$  y  $NH_3$  cerca del puerto de exportación con recursos renovables alejados:**
  - Requerimiento de una línea de transmisión para transportar la electricidad renovable hasta los equipos en el puerto (Ver Fig. 3.2).
2. **Producción de  $H_2$  en el lugar de los recursos renovables y  $NH_3$  en el puerto:**
  - Utilización de tuberías de  $H_2$  para transportar el  $H_2$  producido hasta el puerto, donde se alimenta a la planta Haber-Bosch (Ver Fig. 3.3).
3. **Producción de  $H_2$  y  $NH_3$  cerca de los recursos renovables:**
  - Utilización de tuberías de  $NH_3$  para llevar el producto final al puerto donde se almacena en espera de la exportación (Ver Fig. 3.4).



**Figura 3.2:** Diagrama de flujo conceptual para la configuración con línea de transmisión.



**Figura 3.3:** Diagrama de flujo conceptual para la configuración con tubería de  $H_2$ .



**Figura 3.4:** Diagrama de flujo conceptual para la configuración con tubería de  $NH_3$ .

Las tres tecnologías mencionadas son potencial candidatas para formar parte de la infraestructura común compartida, por ende, se consideró de gran importancia en una primera etapa estimar los costos de estas tecnologías, para realizar un análisis más preciso.

### **3.3.1. Estimación de costos: Línea de transmisión**

Dentro del ámbito de la infraestructura de líneas de transmisión eléctrica, la magnitud de un proyecto influye directamente en la potencia necesaria de la línea para transportar energía a través de esta. La capacidad de transmisión a lo largo de una distancia determinada está directamente vinculada al voltaje requerido, esta relación incide notablemente en el costo global de la línea, ya que la necesidad de un voltaje mayor implica la necesidad de cables de mayor grosor, generando así costos adicionales en materiales.

Para analizar estos costos en relación con los factores mencionados, se empleó una herramienta interna de Hinicio, la cual aplica una regresión a los datos económicos del sistema eléctrico nacional, considerando datos de velocidad del viento, material y distribución de los conductores.

### **3.3.2. Estimación de costos: Tubería de $H_2$**

Para el caso de la tecnología de tubería de  $H_2$ , este se transporta presurizado en estado gaseoso, la estimación de costos se basó en literatura especializada [5], la cual permite un análisis técnico-económico de tuberías de hidrógeno, incluidos su dimensionamiento y funcionamiento. Esta estimación de costes es basada en datos históricos de costes total instalados de gaseoductos estadounidenses, que se escala con un factor multiplicador para tener en cuenta los mayores costes previstos para las tuberías de  $H_2$ , estos mayores costes se derivan de unas inspecciones más estrictas de las soldaduras y de la necesidad de sellos sin fugas en las válvulas de aislamiento y control.

Dentro de los supuestos utilizados para el diseño se tiene:

- Velocidad máxima equivalente a la mitad de la velocidad de erosión
- Material: Acero al carbono

- Presión de entrada de 100 bar
- Presión de llegada de 30 bar

### **3.3.3. Estimación de costos: Tubería de $NH_3$**

En el caso de las tuberías de  $NH_3$ , el amoníaco se transporta en tuberías de acero al carbono en estado líquido a temperatura ambiente con una presión de alrededor de 17 bar. El costo de estas tuberías se estima al dimensionarlas como tuberías de transporte de líquidos, con una velocidad máxima de 3 m/s.

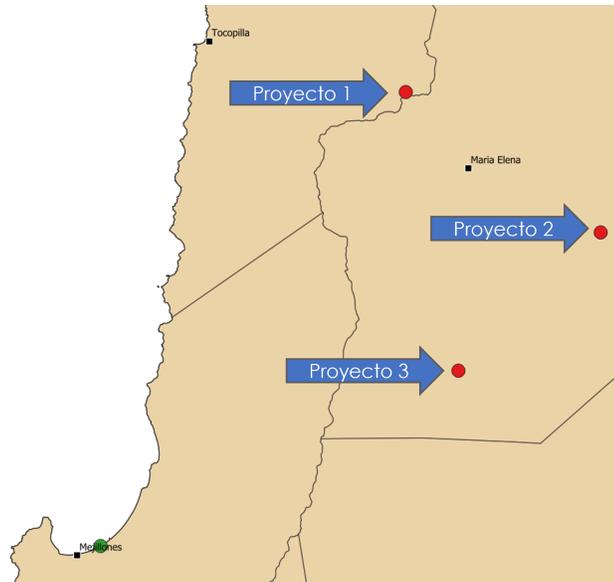
Los costos del acero se calculan en función del diámetro de la tubería, y luego se relacionan con los gastos de instalación, mano de obra y derecho de paso para obtener una estimación completa del costo de las tuberías.

## **3.4 Enfoque práctico: Evaluación de escenarios en Antofagasta con uso de CUI**

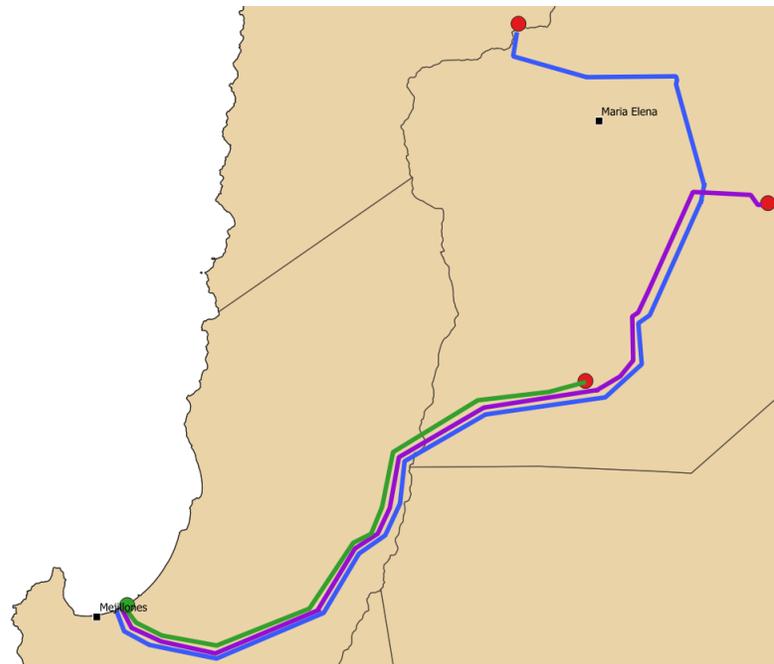
### **3.4.1. Definición de escenarios**

Como el objetivo de este trabajo es en el contexto de la región de Antofagasta, se deben seleccionar los proyectos de producción a considerar en el sistema a evaluar, con sus respectivas distancias al puerto, volúmenes de producción de  $NH_3$  y factores solares/eólicos.

Se seleccionaron tres proyectos para ser parte del sistema, se realizó un trazado referencial de la ubicación de los recursos renovables de cada proyecto (Ver Fig. 3.5), a partir de ese trazado, siguiendo la infraestructura existente (Líneas de gas existente, carreteras, etc) se genera un trazado hacia el puerto, el cual siendo medido en el software QGIS permite obtener la distancia de los renovables de cada proyecto hasta el puerto (Ver Figura 3.6)



**Figura 3.5:** Distribución de los proyectos de producción y puerto en la región de Antofagasta



**Figura 3.6:** Trazado de transporte desde cada proyecto al puerto, siguiendo la infraestructura existente (Colores usados solo para diferenciar las rutas)

Respecto a los volúmenes de producción, se utilizaron magnitudes que se han observado para proyectos en tramitación o desarrollo en la región [6], 20,000 ton NH<sub>3</sub>/año, 170,000 ton NH<sub>3</sub>/año y 500,000 ton NH<sub>3</sub>/año respectivamente, bajo la premisa de tener distintos volúmenes de producción para observar el efecto de la utilización de infraestructura común para actores

de diversas escalas. Con la información seleccionada se genera la siguiente tabla que agrupa los datos de los proyectos considerados en el sistema.

**Tabla 3.1:** Resumen datos de ubicación y producción de los proyectos escogidos

N° proyecto	Volumen de producción [ton $NH_3$ /año]	Distancia al puerto [km]
1	20,000	194
2	500,000	152
3	170,000	100

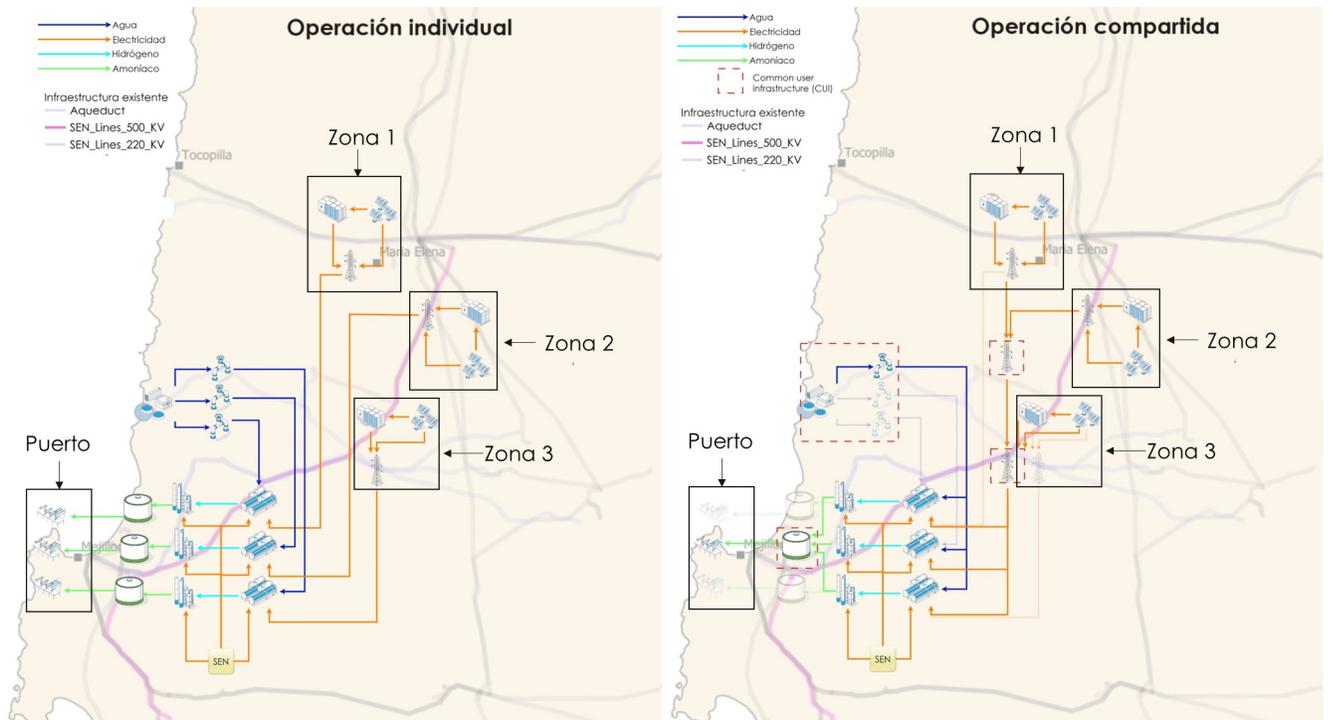
Como se indicó previamente en la sección 3.2, se identificaron ciertos equipos susceptibles de ser CUI, considerando que no todos pueden ser compartidos, debido a que en un contexto realista, algunos equipos específicos, como el electrolizador o la planta Haber-Bosch, no se vislumbran como opciones viables para ser compartidos entre proyectos individuales. A partir de la selección de elementos susceptibles de ser CUI de la sección 3.2, se generaron cuatro escenarios a evaluar, cada escenario tiene el caso de los tres proyectos operando individualmente y el caso de operación compartida usando CUI.

La nomenclatura de los equipos usados en los diagramas de cada escenario se puede revisar en el Apéndice C.

#### 3.4.1.1. Escenario 1: Ver (Figura 3.7)

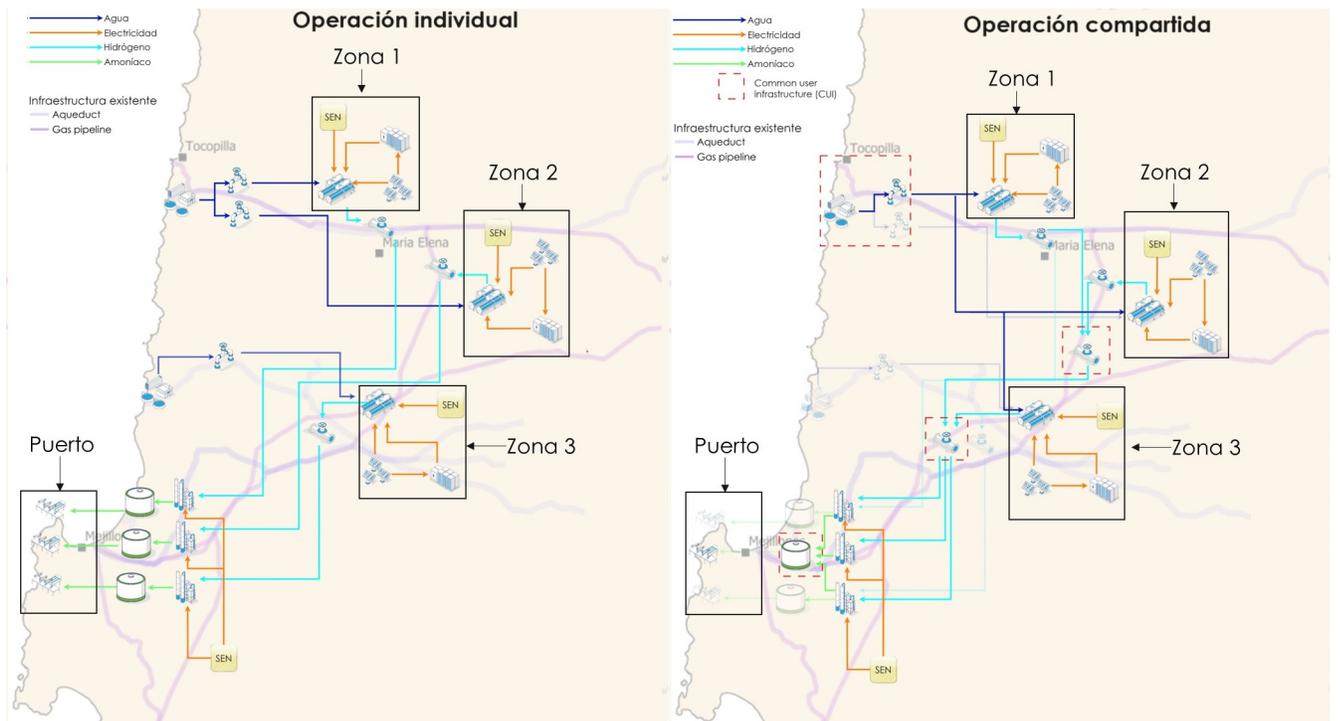
Donde es infraestructura compartida:

- Líneas de transmisión
- Tuberías de agua
- Planta desalinizadora
- Estanque de  $NH_3$



**Figura 3.7:** Escenario 1: Operación individual v/s Operación compartida

**3.4.1.2. Escenario 2:** Se tiene el escenario 2 (Figura 3.8)

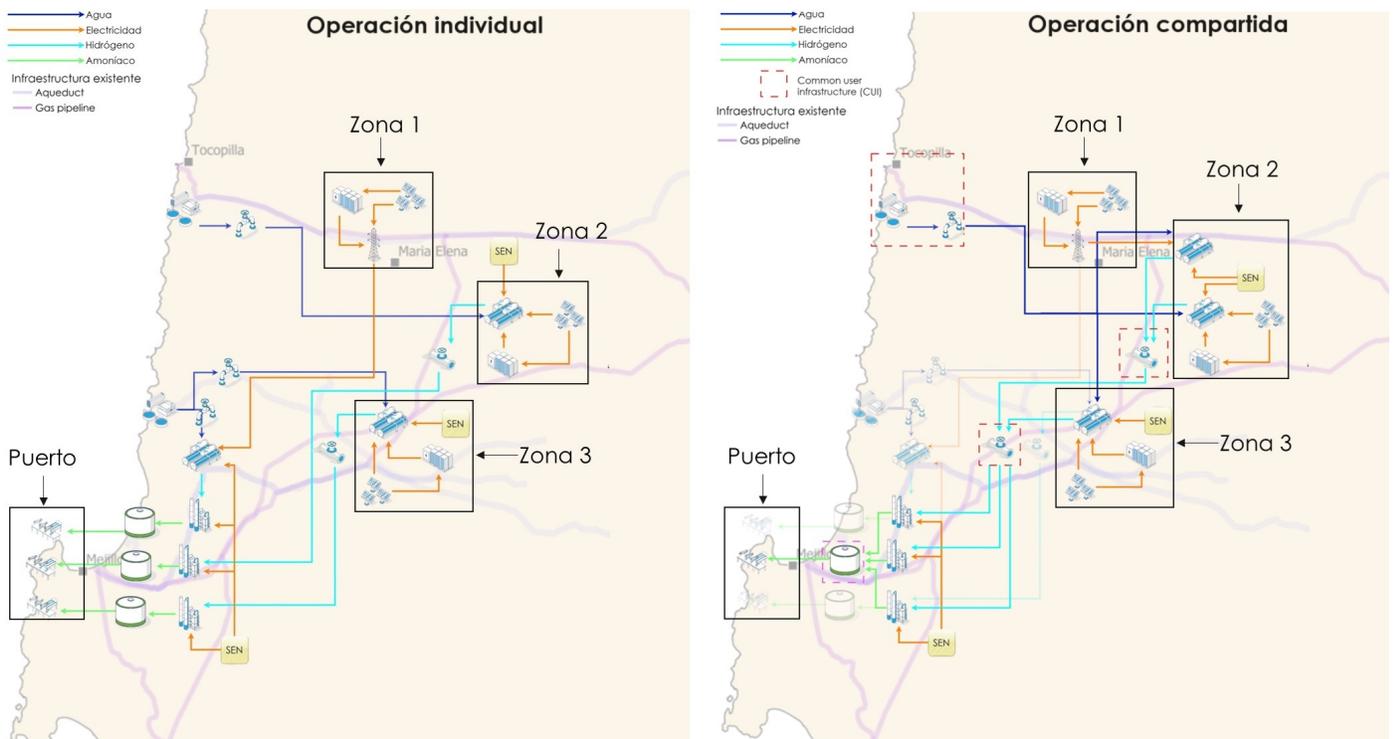


**Figura 3.8:** Escenario 2: Operación individual v/s Operación compartida

Donde es infraestructura compartida:

- Tuberías de hidrógeno
- Tuberías de agua
- Planta desalinizadora
- Estanque de  $NH_3$

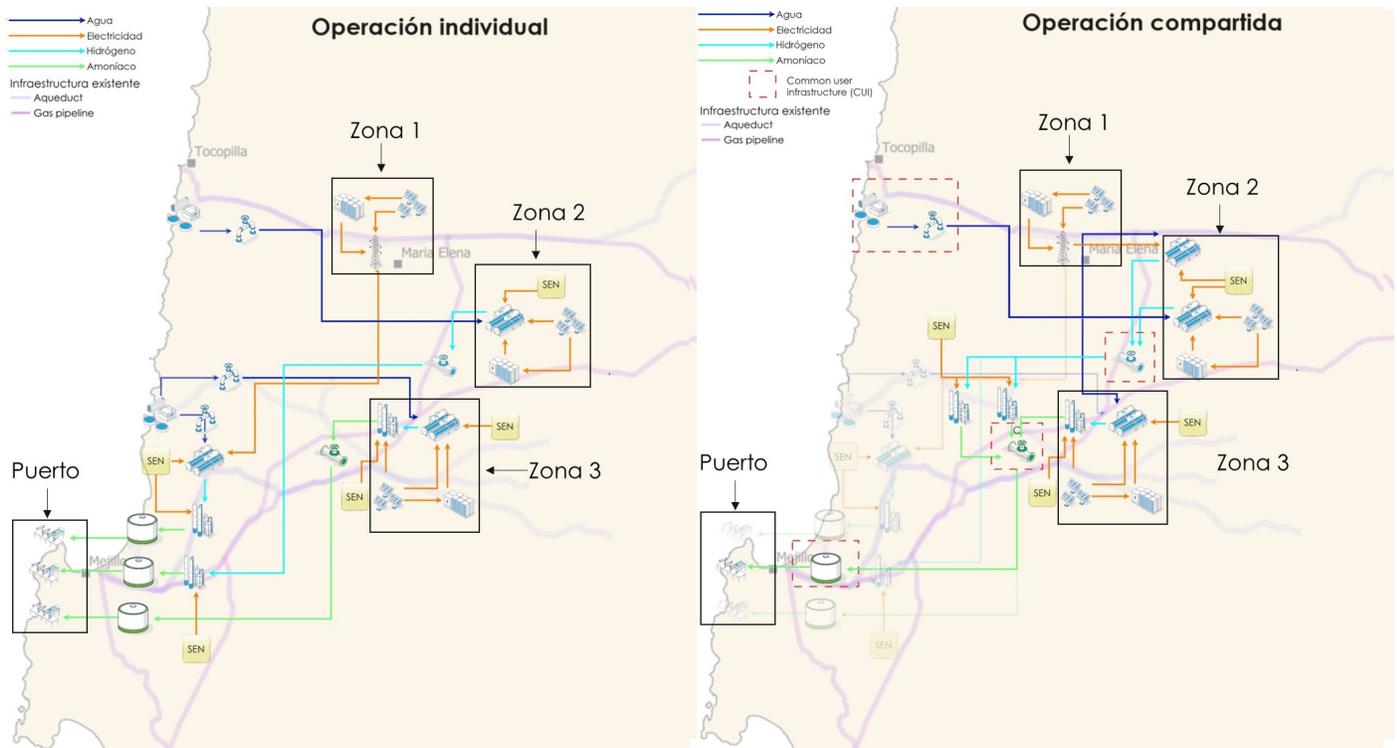
**3.4.1.3. Escenario 3:** El escenario 3 y escenario 4 fueron escogidos para representar escenarios más realistas donde no todos los proyectos ubican las plantas de la misma forma, así se tiene en estos escenarios una distribución combinada (Figuras 3.9 y 3.10)



**Figura 3.9:** Escenario 3: Operación individual v/s Operación compartida

Donde es infraestructura compartida:

- Tuberías de hidrógeno
- Tuberías de agua
- Planta desalinizadora
- Estanque de  $NH_3$



**Figura 3.10:** Escenario 4: Operación individual v/s Operación compartida

#### 3.4.1.4. Escenario 4: Donde es infraestructura compartida:

- Tuberías de hidrógeno
- Tuberías de amoníaco
- Planta desalinizadora
- Tuberías de agua
- Estanque de  $NH_3$

#### 3.4.2. Definición de supuestos

Se utilizaron los supuestos los supuestos tecno-económicos detallados en el Apéndice A para los activos de la cadena de suministro individual.

#### 3.4.3. Dimensionamiento de la cadena de valor individual

Luego de tener los cuatro escenarios definidos junto con los supuestos tecno-económicos se siguió la siguiente metodología de simulación para cada escenario:

1. Dimensionamiento de los casos individuales para cada proyecto mediante optimización con ANDREA.
2. Recopilación de resultados técnicos de los equipos claves a partir de la optimización (Tamaño óptimo PV, EZ, HB)
3. Obtención de métricas: CAPEX y LCOA tanto sistémico como de proyecto.

#### **3.4.4. Evaluación del sistema con infraestructura compartida (CUI)**

Para esta etapa, se aplicó la metodología que se describe a continuación:

1. Utilización de los tamaños óptimos de los equipos claves obtenidos en el paso de dimensionamiento de la cadena de suministro individual de cada proyecto.
2. Simulación del caso compartido con uso de CUI de cada escenario.
3. Recopilación del dimensionamiento de los elementos utilizados como CUI a partir de la simulación.
4. Distribución de costos para cada proyecto de lo utilizado como CUI.
5. Obtención de métricas: CAPEX y LCOA tanto sistémico como de proyecto de los casos de operación compartida

#### **3.4.5. Análisis de resultados**

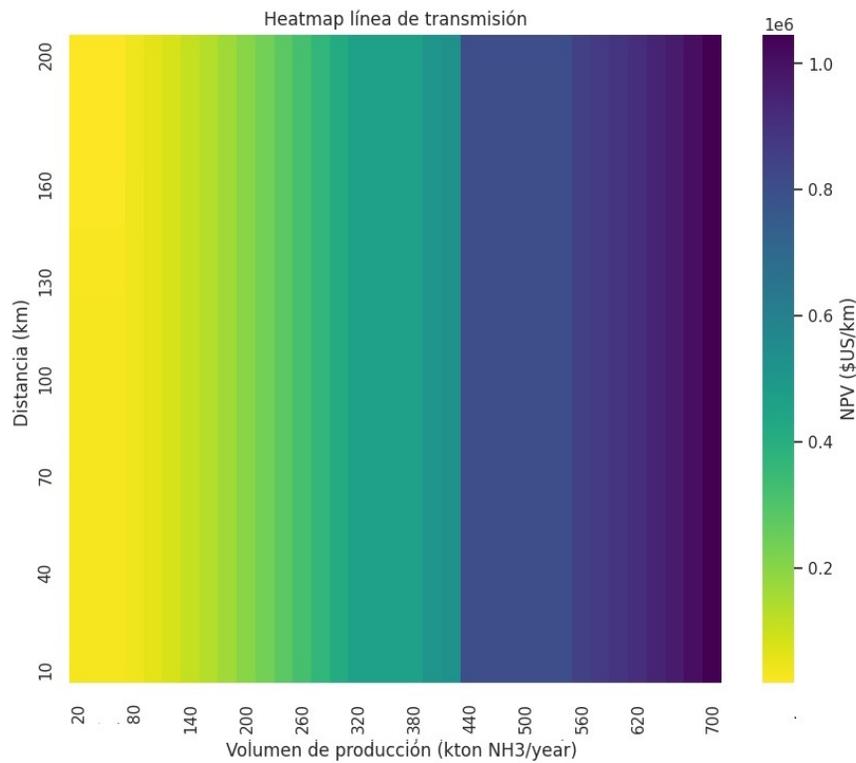
Con los resultados obtenidos en la sección anterior se realizan tablas comparativas, las cuales permiten comparar la inversión global del sistema así como la de cada proyecto en el caso de operación individual y de operación compartida dependiendo del escenario. Este desglose permite ver las influencias de cada equipo que forma parte de CUI en los cambios observados, y se presentan gráficos de cascada para ilustrar los cambios de la influencia de cada equipo en el LCOA sistémico y de proyectos del escenario.

## 4 Resultados y discusión

### 4.1 Resultados análisis de costos

Utilizando la metodología descrita, se desarrollaron macros en hojas de cálculo de Excel que, a partir de rangos proporcionados para el volumen de producción de  $NH_3$  y las distancias requeridas, calculan la inversión y los costos operativos asociados con las tecnologías de líneas de transmisión, tuberías de  $H_2$  y tuberías de  $NH_3$  para lograr ese volumen de producción.

Posteriormente, al seleccionar los rangos de distancia y volumen de producción de interés para los casos prácticos, se generaron mapas de calor que ilustraron el valor presente neto de cada tecnología por kilómetro en relación con estas dos variables (Ver Figuras 4.1, 4.2 y 4.3).



**Figura 4.1:** Mapa de calor línea de transmisión

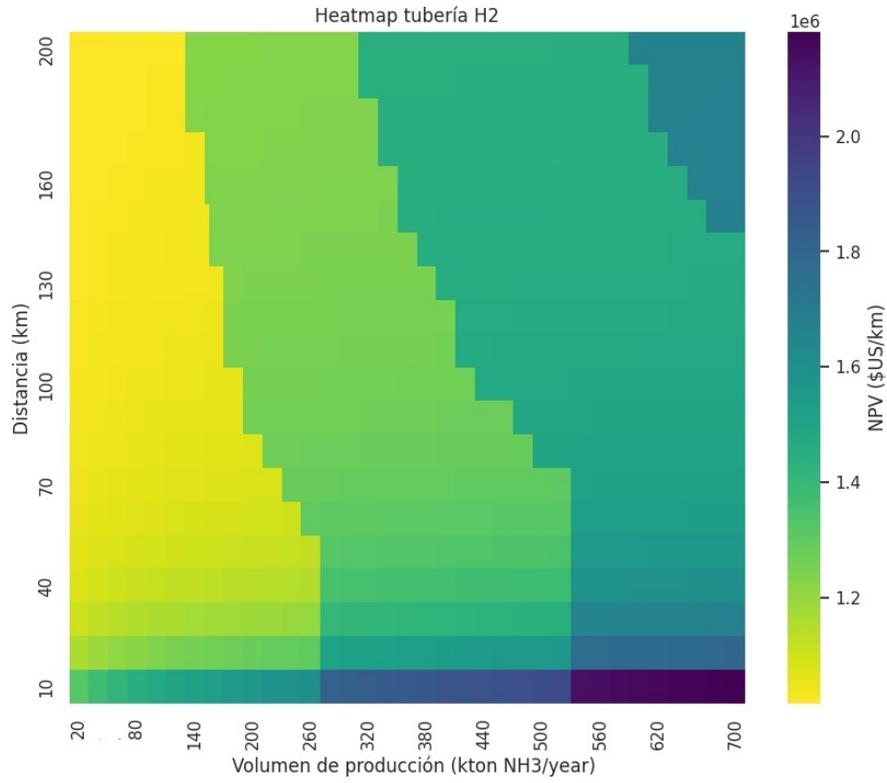


Figura 4.2: Mapa de calor tubería de  $H_2$

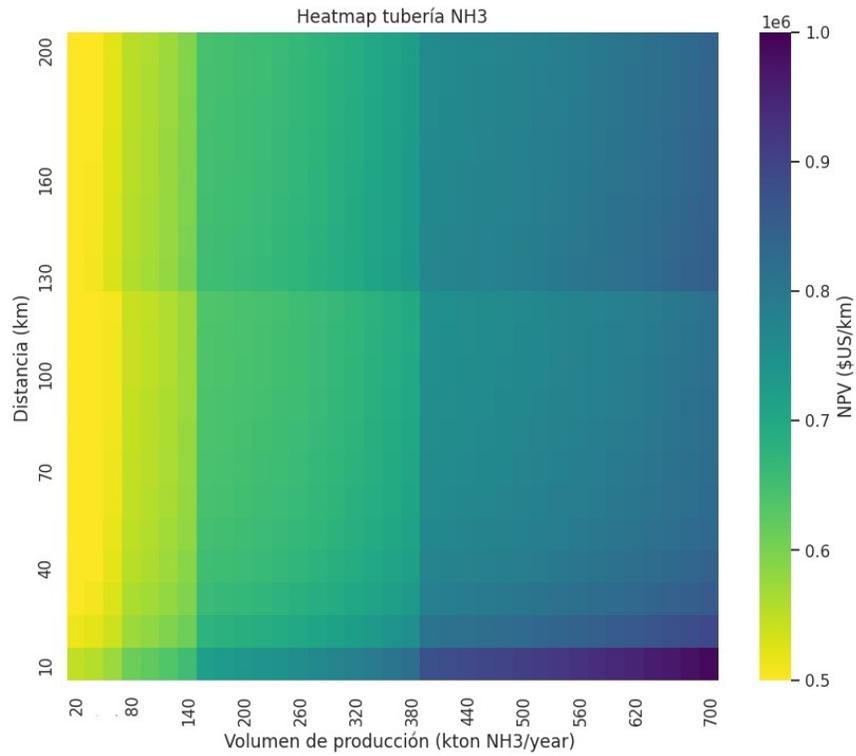


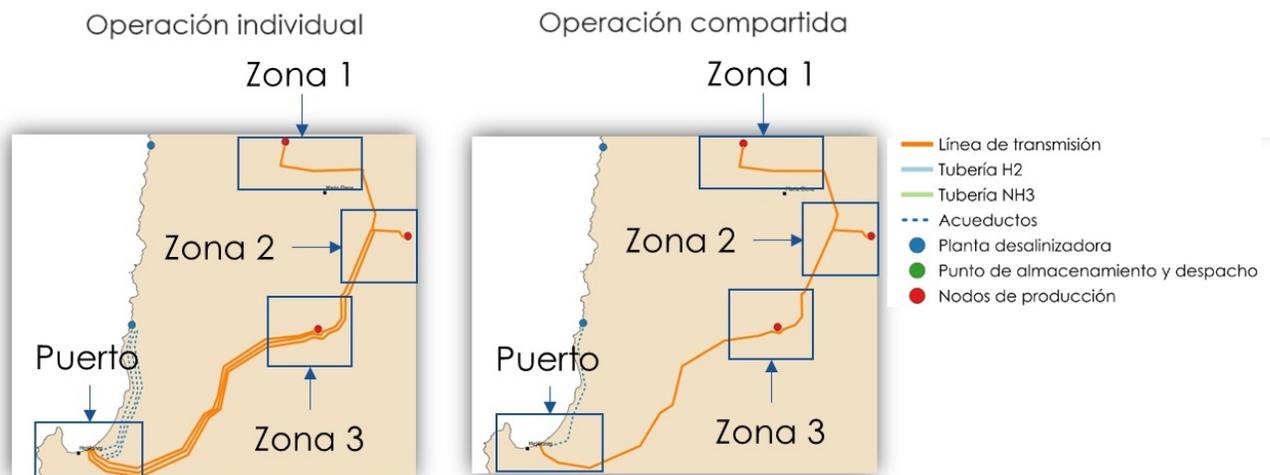
Figura 4.3: Mapa de calor tubería de  $NH_3$

Se observa que el costo específico de la línea de transmisión se ve afectado principalmente por el volumen de producción de  $NH_3$  a producir lo que implica una línea capaz de recibir y transmitir una potencia mayor, la distancia no afecta significativamente en el costo por km. En el caso de tuberías de  $H_2$  se observa que tiene una tendencia diferente, para distancias menores a 20 km y volúmenes de producción mayores a 260 kton  $NH_3$ /year se dan los escenarios donde es más costoso esta tecnología por km, se observa favorable la zona de volúmenes de producción menores a 260 kton  $NH_3$ /year a distancias mayores a 40 km. En el caso de la tuberías de  $NH_3$  se observa que a mayor volumen de producción es mas costosa, disminuyendo este costo si se aumenta la distancia total.

Estos resultados fueron usados como datos económicos de estas tecnologías en los escenarios prácticos.

## 4.2 Resultados y análisis - Escenario 1

En primer lugar, se recuerda el escenario 1 de forma simplificada, donde se puede observar el caso compartido y caso individual (Figura 4.4).



**Figura 4.4:** Escenario 1 simplificado

La simulación del caso individual entregó los siguientes resultados de los equipos principales:

**Tabla 4.1:** Resultados tecno-económicos escenario 1

Caso individual				
	Unidad	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
<b><i>Equipamiento eléctrico</i></b>				
Tamaño planta PV	MW	85	2092	693
Factor de planta PV 1er año	%	27 %	27 %	28 %
<b><i>Equipamiento H<sub>2</sub></i></b>				
Tamaño planta de electrolisis	MW	48	1257	42
Utilización electrolizador	%	43 %	42 %	42 %
<b><i>Equipamiento NH<sub>3</sub></i></b>				
Capacidad Haber-Bosch	tpd	64	1647	551
Utilización Haber-Bosch	%	86 %	83 %	85 %
Producción anual NH <sub>3</sub>	kton por año	20	500	170
<b><i>Datos de inversión</i></b>				
CAPEX	MUSD	159	2934	1042
LCOA	USD/ton NH <sub>3</sub>	<b>958</b>	<b>711</b>	<b>742</b>

Manteniendo los resultados técnicos de los equipos de la Tabla 4.1, se realizó la simulación de la operación compartida, y se obtuvieron los resultados sistémicos resumidos en la Tabla 4.2 y Figura 4.5.

**Tabla 4.2:** Resultados sistémicos escenario 1

Resultados sistémicos			
	Unidad	Operación individual	Operación compartida
CAPEX elementos CUI	MUSD	418	338 (-19%)
Contribución LCOA elementos CUI	USD/ton NH <sub>3</sub>	70	55 (-20%)
CAPEX total	MUSD	4134	4053 (-2%)
LCOA total	USD/ton NH <sub>3</sub>	726	712 (-2%)



**Figura 4.5:** Resultados sistémicos escenario 1

Es posible observar hay reducciones de un 19% en la inversión de los elementos CUI en la operación compartida, esto representa una disminución de un 2% en la inversión global. Una

vez realizada la distribución de costos en la inversión de los elementos CUI, tal como se explicó en la metodología, se asigna una inversión a cada proyecto y se observan los efectos que cada particular recibe como resultado de la operación compartida, esto se resume en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 1

	Unidad	Proyecto 1		Proyecto 2		Proyecto 3	
		Individual	Compartida	Individual	Compartida	Individual	Compartida
<b><i>Inversión total</i></b>							
CAPEX	MUSD	159	126 (-21 %)	2934	2898 (-1 %)	1042	1028 (-1 %)
<b><i>Inversión CUI</i></b>							
Planta desalinizadora	MUSD	15	1 (-91 %)	35	35 (-0.3 %)	20	12 (-40 %)
Tubería $H_2O$	MUSD	16	1 (-92 %)	36	31 (-15 %)	25	10 (-58 %)
Línea de transmisión	MUSD	10	5 (-44 %)	91	76 (-17 %)	10	16 (+55 %)
Subestaciones	MUSD	4	4.4 (+10 %)	108	96 (-12 %)	35	38 (+10 %)
Estanque $NH_3$	MUSD	0.8	0.3 (-63 %)	8	7.7 (-6 %)	3	2.6 (-12 %)
CAPEX CUI	MUSD	46	13 (-72 %)	280	246 (-12 %)	92	79 (-15 %)
Contribución LCOA	USD/ton $NH_3$	282	73 (-74 %)	63	56 (-12 %)	64	52 (-8 %)
<b>LCOA</b>	<b>USD/ton <math>NH_3</math></b>	<b>958</b>	<b>750 (-22 %)</b>	<b>711</b>	<b>704 (-1.1 %)</b>	<b>742</b>	<b>731 (-1.6 %)</b>

En primer lugar se puede observar que todos los proyectos reducen su inversión total, sin embargo el porcentaje de reducción para cada uno es diferente ya que son de distintas escalas de producción. Se observa que el proyecto 1, el de menor escala y más lejano al puerto, es el más beneficiado de compartir infraestructura, con una reducción de inversión CUI de un 74 %, esto se ve reflejado en una reducción de un 22 % del LCOA.

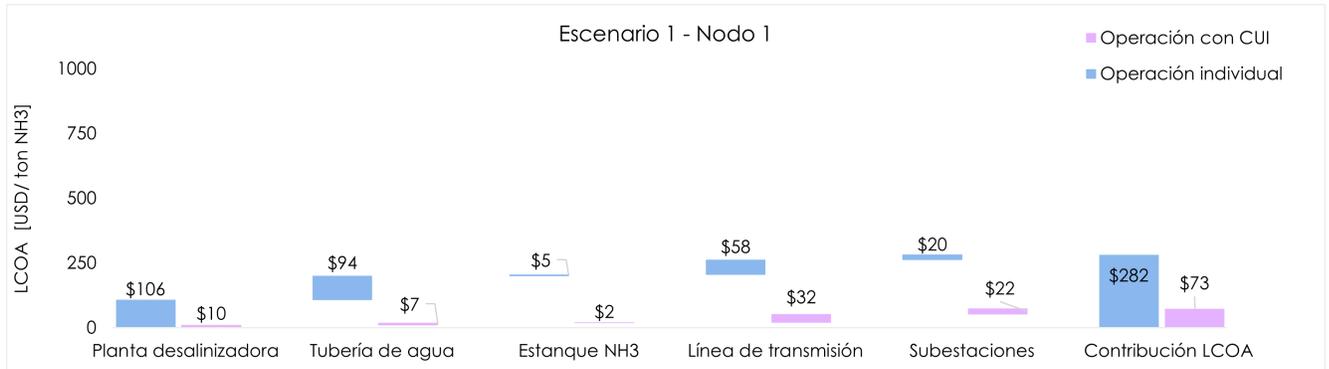
Además, se tiene el desglose de inversiones por equipos en ambos casos, donde se puede observar que el proyecto 1 obtiene reducciones mayores a 90 % al compartir la planta desalinizadora y tuberías de agua.

El proyecto 2, que es el de mayor escala es el menos beneficiado con una reducción de inversión CUI de un 12 %. Que luego se ve reflejada en una reducción de 1.1 % en el LCOA.

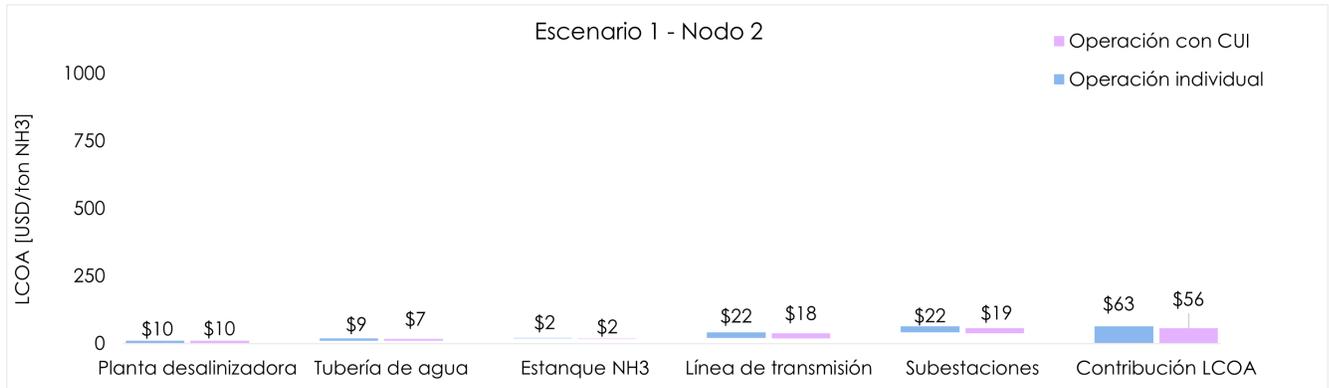
Respecto al proyecto 3, se observa que la línea de transmisión y subestaciones no resultan favorables en operación compartida para este proyecto (Ver Apéndice A), aumentando los costos en estos elementos. Lo anterior se ve justificado porque la operación individual necesita una línea de transmisión de 110 kV, mientras que el funcionamiento compartido necesita una línea de 500 kV en la misma distancia, lo que representa una mayor inversión en este ítem que luego a partir de la distribución de costos escogidas no resulta favorable.

Se observaron detalladamente las reducciones en inversión de cada elemento de la CUI, sin

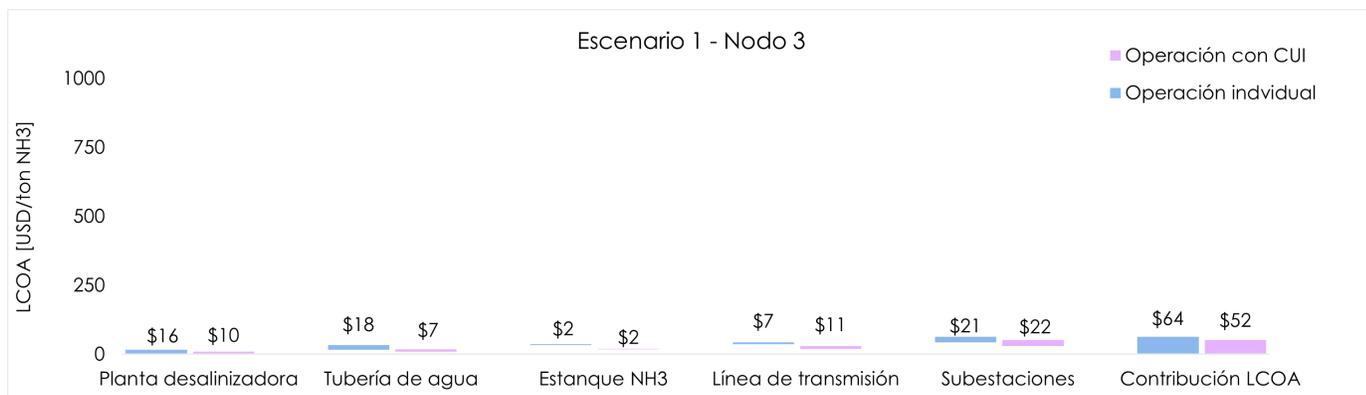
embargo, el impacto que esta reducción pueda tener en el LCOA depende de la influencia inicial del elemento en este. Para ilustrar lo anterior, se generaron gráficos de cascada del LCOA de cada proyecto, excluyendo los elementos que no son CUI (Consultar Apéndice A para detalle de la cadena de valor completa), debido a que se mantienen fijos en ambos casos, con la finalidad de observar la contribución al LCOA de cada elemento CUI, en la operación individual y compartida,



**Figura 4.6:** Escenario 1- Gráfico de cascada proyecto 1



**Figura 4.7:** Escenario 1 - Gráfico de cascada proyecto 2



**Figura 4.8:** Escenario 1 - Gráfico de cascada proyecto 3

Para el proyecto 1 se observa en la Figura 4.6 que lo más influyente es la disminución en inversión en la planta desalinizadora y las tuberías de agua. Para el proyecto 2 se observa en la Figura 4.7 que su reducción en el LCOA es debido al compartir línea de transmisión y subestaciones. Para el proyecto 3 se observa en la Figura 4.8 que sus reducciones en el LCOA son principalmente debido al compartir planta desalinizadora y tuberías de agua. Respecto a las disminuciones asociadas a los proyectos, fueron mayores en el proyecto 1, esto tiene sentido, debido a que es el proyecto de menor producción y el supuesto de que debe invertir en los mismos equipos que los otros proyecto puede no ser lo más conveniente operación individual debido a que no se tienen economías de escala.

### 4.3 Resultados y análisis - Escenario 2

En primer lugar, se recuerda el escenario 2 de forma simplificada, donde se puede observar el caso compartido y caso individual (Figura 4.9).

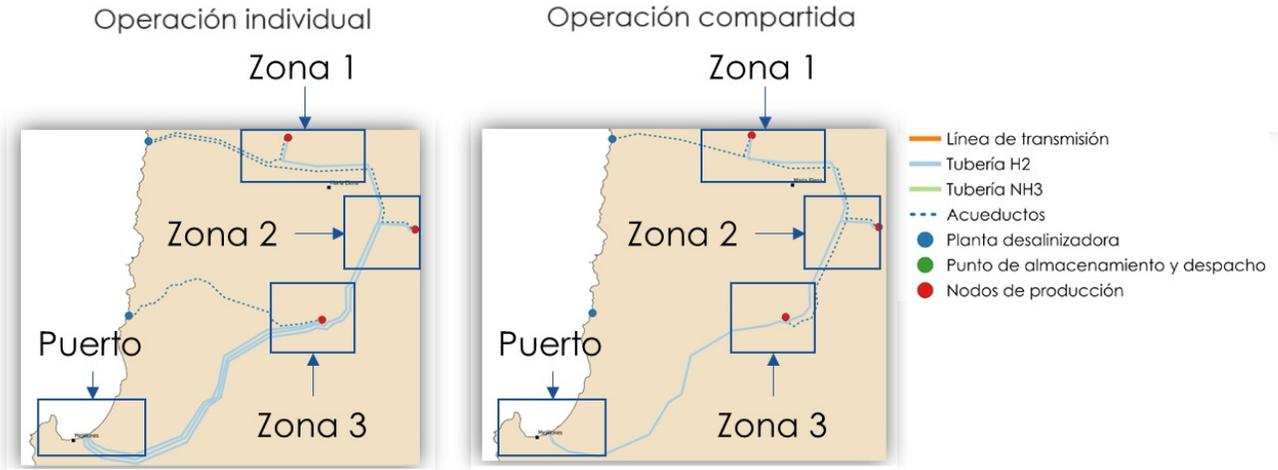


Figura 4.9: Escenario 2 simplificado

La simulación del caso individual entregó los siguientes resultados de los equipos principales:

Tabla 4.4: Resultados tecno-económicos escenario 2

Caso individual				
	Unidad	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
<b>Equipamiento eléctrico</b>				
Tamaño planta PV	MW	67	1667	581
Factor de planta PV 1er año	%	25 %	28 %	28 %
<b>Equipamiento H<sub>2</sub></b>				
Tamaño planta de electrolisis	MW	41	1031	348
Utilización electrolizador	%	51 %	51 %	51 %
<b>Equipamiento NH<sub>3</sub></b>				
Capacidad Haber-Bosch	tpd	57	1573	522
Utilización Haber-Bosch	%	96 %	87 %	89 %
Producción anual NH <sub>3</sub>	kton por año	20	500	170
<b>Datos de inversión</b>				
CAPEX	MUSD	248	2662	1043
LCOA	USD/ton NH <sub>3</sub>	1782	815	906

Al igual que en el escenario anterior, manteniendo los resultados técnicos de los equipos de la Tabla 4.4 se realiza la simulación de la operación compartida, y se obtienen los resultados sistémicos resumidos en la Tabla 4.5 y Figura 4.10.

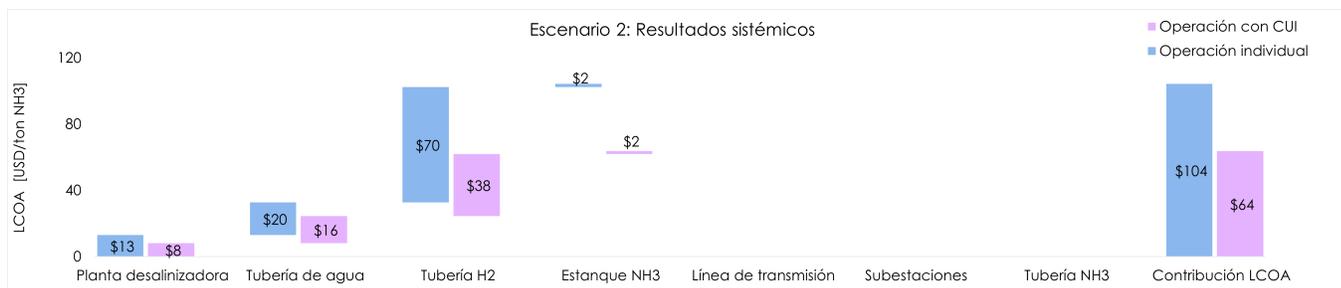


Figura 4.10: Resultados sistémicos escenario 2

Tabla 4.5: Resultados sistémicos escenario 2

Resultados sistémicos			
	Unidad	Operación individual	Operación compartida
CAPEX elementos CUI	MUSD	596	364 (-39%)
Contribución LCOA elementos CUI	USD/ton NH <sub>3</sub>	104	64 (-39%)
CAPEX total	MUSD	3953	3721 (-6%)
LCOA total	USD/ton NH <sub>3</sub>	866	825 (-5%)

Se observa una reducción del 39% en la inversión de los elementos CUI del sistema al tener operación compartida, esto representa una disminución de un 6% en la inversión global. Los efectos que cada particular recibe como resultado de la operación compartida, esto se resume en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 2

	Unidad	Proyecto 1		Proyecto 2		Proyecto 3	
		Individual	Compartida	Individual	Compartida	Individual	Compartida
<b>Inversión total</b>							
CAPEX	MUSD	248	139 (-44%)	2662	2605 (-2%)	1043	977 (-6%)
<b>Inversión CUI</b>							
Planta desalinizadora	MUSD	15	1 (-93%)	31	29 (-4%)	19	10 (-47%)
Tubería H <sub>2</sub> O	MUSD	16	4 (-78%)	66	54 (-18%)	32	37 (+16%)
Tubería H <sub>2</sub>	MUSD	121	39 (-68%)	191	148 (-22%)	93	31 (-67%)
Estanque NH <sub>3</sub>	MUSD	0.8	0.3 (-63%)	8	7.7 (-6%)	3	2.6 (-12%)
CAPEX CUI	MUSD	153	44 (-72%)	296	239 (-19%)	147	80 (-45%)
Contribución LCOA	USD/ton NH <sub>3</sub>	923	262 (-72%)	72	58 (-19%)	105	57 (-45%)
LCOA	USD/ton NH <sub>3</sub>	1782	1122 (37%)	815	801 (-1.7%)	906	859 (-5.2%)

Todos los proyectos reducen su inversión total, se observa que el proyecto 1, el de menor escala y más lejano al puerto, es nuevamente el más beneficiado de compartir infraestructura, con una reducción de inversión CUI de un 72%, esto se ve reflejado en una reducción de un 37% del LCOA.

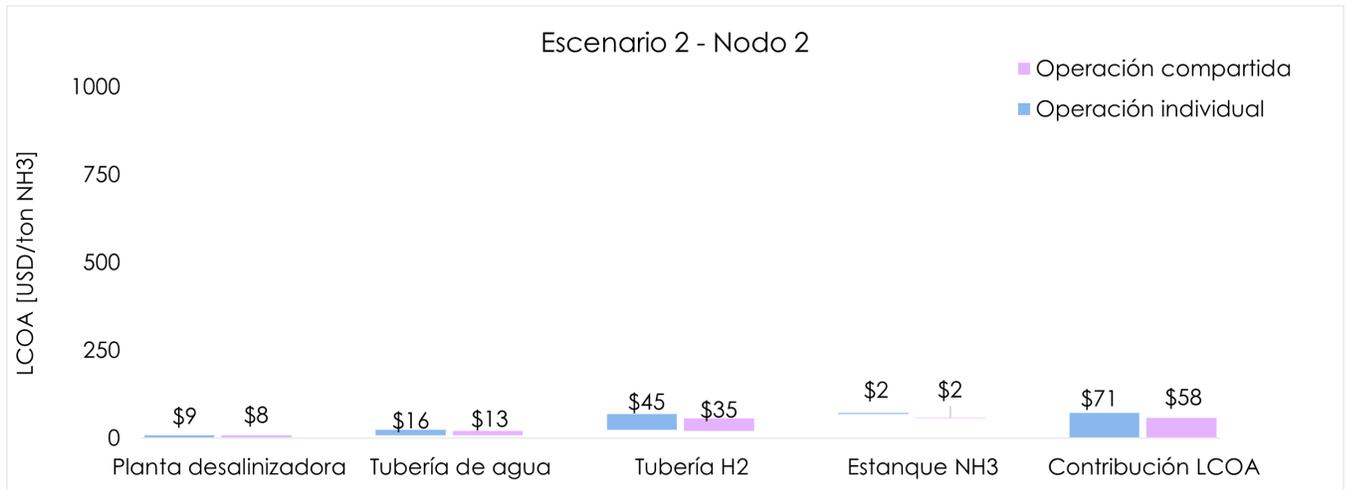
Además, se tiene el desglose de inversiones por equipos en ambos casos, donde se puede observar

que el proyecto 1 se ve beneficiado con reducciones mayores a 60 % en la inversión de todos los elementos compartidos. El proyecto 2, que es el de mayor escala nuevamente es el menos beneficiado con una reducción de inversión CUI de un 19 %, que luego se ve reflejada en una reducción de 1.7 % en el LCOA. Respecto al proyecto 3, obtiene reducciones en la inversión CUI total de un 45 %, que se reflejan en una reducción de un 5.2 % del LCOA, sin embargo, se observa que las tuberías de agua no resultan favorable en operación compartida para este proyecto. Lo anterior se ve justificado porque la operación individual implica acueductos de 70 km de distancia, mientras que la operación compartida sigue otro trazado que consta de un acueducto compartido de 85 km y 45 km de acueducto individual (Ver Apéndice A), sin embargo a pesar de pagar un 16 % más en tuberías de agua, esto se compensa al verse beneficiado al poder compartir la planta desalinizadora con una reducción de 47 % en este elemento.

Al igual que el escenario anterior se generaron gráficos de cascada para cada proyecto, donde se observa la contribución al LCOA de cada elemento CUI, en la operación individual y compartida.



**Figura 4.11:** Escenario 2 - Gráfico de cascada proyecto 1



**Figura 4.12:** Escenario 2 - Gráfico de cascada proyecto 2



**Figura 4.13:** Escenario 2 - Gráfico de cascada proyecto 3

Para el proyecto 1 se observa en la Figura 4.11 que lo más influyente es compartir tubería de  $H_2$ , porque dado su bajo volumen de producción y la distancia de alrededor de 200 km al puerto no se ve justificada la inversión y penaliza mucho al LCOA. Al igual que en el escenario anterior influye la disminución en inversión en la planta desalinizadora y las tuberías de agua. Para el proyecto 2 se observa en la Figura 4.12 que sus reducciones son debido a las tuberías de agua y  $H_2$ . Para el proyecto 3 se observa en la Figura 4.12 que sus reducciones son principalmente debido al compartir planta desalinizadora y tuberías de  $H_2$ .

## 4.4 Resultados y análisis - Escenario 3

En primer lugar, se recuerda el escenario 3 de forma simplificada, donde se puede observar el caso compartido y caso individual (Figura 4.14).

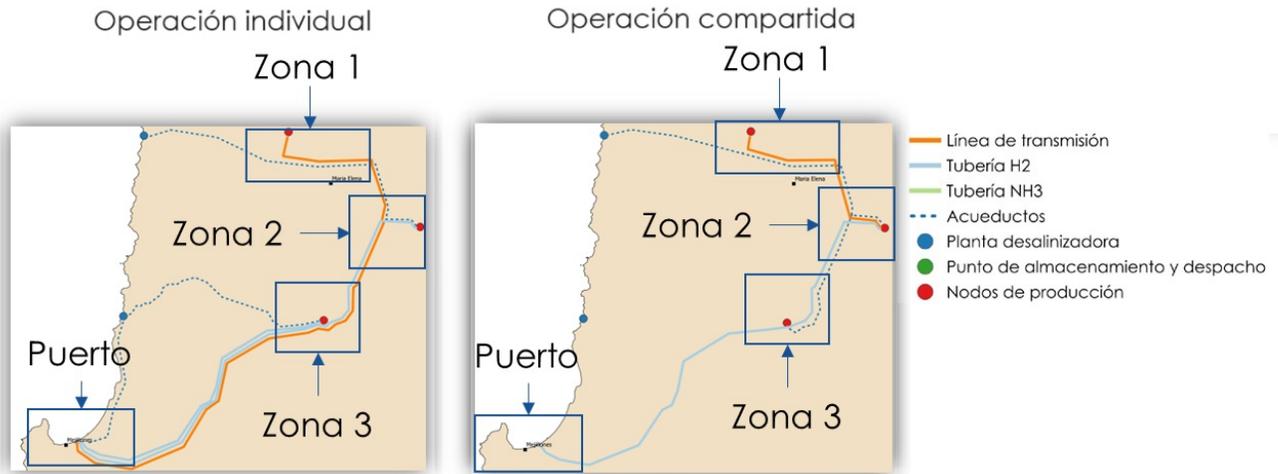


Figura 4.14: Escenario 3 simplificado

La simulación del caso individual entregó los siguientes resultados de los equipos principales:

Tabla 4.7: Resultados tecno-económicos escenario 3

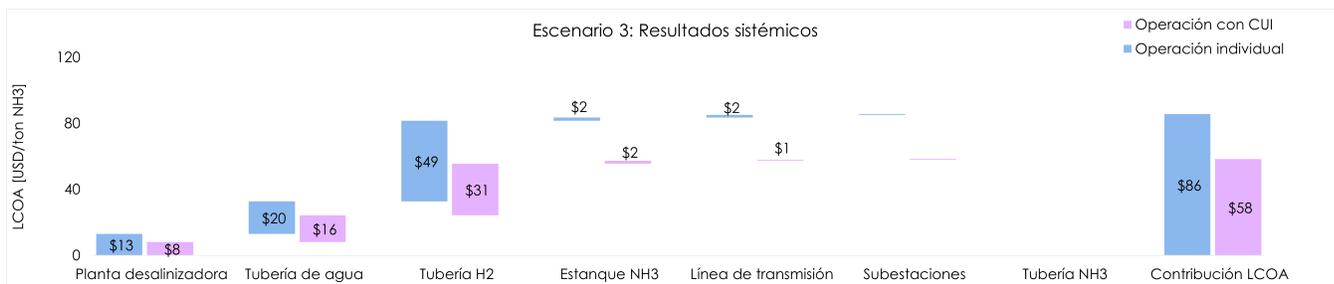
Caso individual				
	Unidad	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
<b>Equipamiento eléctrico</b>				
Tamaño planta PV	MW	85	1667	581
Factor de planta PV 1er año	%	27 %	28 %	28 %
<b>Equipamiento H<sub>2</sub></b>				
Tamaño planta de electrolísis	MW	48	1031	348
Utilización electrolizador	%	43 %	51 %	51 %
<b>Equipamiento NH<sub>3</sub></b>				
Capacidad Haber-Bosch	tpd	64	1573	522
Utilización Haber-Bosch	%	86 %	87 %	89 %
Producción anual NH <sub>3</sub>	kton por año	20	500	170
<b>Datos de inversión</b>				
CAPEX	MUSD	159	2662	1043
LCOA	USD/ton NH <sub>3</sub>	<b>958</b>	<b>815</b>	<b>906</b>

Manteniendo los resultados técnicos de los equipos de la Tabla 4.7 fijos, se realizó la simulación de la operación compartida, y se obtuvieron los resultados sistémicos resumidos en la Tabla 4.8

y Figura 4.15.

**Tabla 4.8:** Resultados sistémicos escenario 3

Resultados sistémicos			
	Unidad	Operación individual	Operación compartida
CAPEX elementos CUI	MUSD	488	330 (-32%)
Contribución LCOA elementos CUI	USD/ton $NH_3$	86	58 (-32%)
CAPEX total	MUSD	3864	3709 (-4%)
LCOA total	USD/ton $NH_3$	842	814 (-3%)



**Figura 4.15:** Resultados sistémicos escenario 3

Se observan reducciones del 32% en la inversión de los elementos CUI al tener operación compartida, eso representa una disminución de un 3% de la inversión global. Los efectos que cada particular recibe a partir de la operación compartida se resumen en la Tabla 4.9.

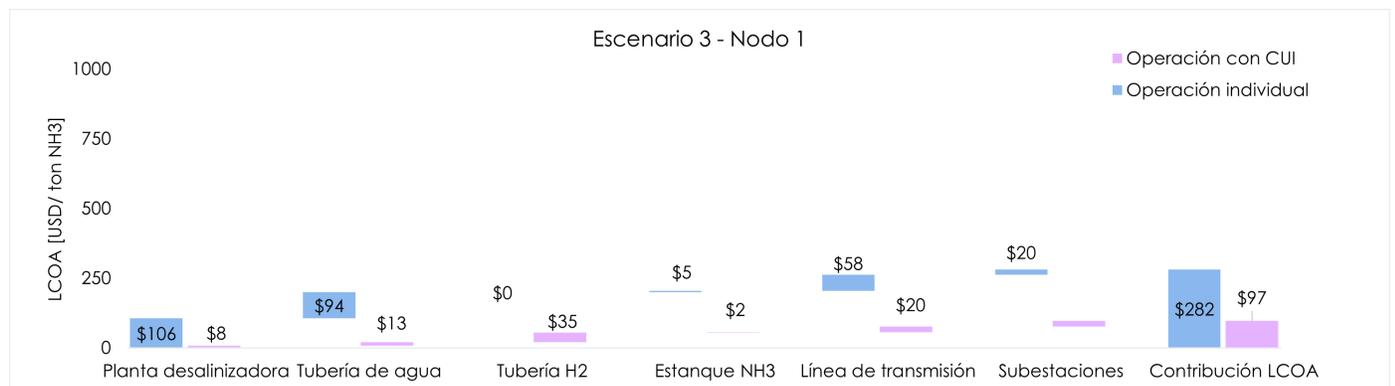
**Tabla 4.9:** Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 3

	Unidad	Proyecto 1		Proyecto 2		Proyecto 3	
		Individual	Compartida	Individual	Compartida	Individual	Compartida
<b>Inversión total</b>							
CAPEX	MUSD	159	130 (-18%)	2662	2603 (-2%)	1043	977 (-6%)
<b>Inversión CUI</b>							
Planta desalinizadora	MUSD	15	1 (-93%)	31	29 (-4%)	19	10 (-47%)
Tubería $H_2O$	MUSD	16	2 (-87%)	66	54 (-19%)	32	37 (+16%)
Línea de transmisión	MUSD	10	3 (-66%)	0	0	0	0
Subestaciones	MUSD	4	4	0	0	0	0
Tubería $H_2$	MUSD	0	6	191	145 (-24%)	93	31 (-67%)
Estanque $NH_3$	MUSD	0.8	0.3 (-63%)	8	7.7 (-6%)	3	2.6 (-12%)
CAPEX CUI	MUSD	46	13 (-66%)	296	237 (-20%)	147	80 (-45%)
Contribución LCOA	USD/ton $NH_3$	282	97 (-66%)	72	57 (-20%)	105	57 (-45%)
<b>LCOA</b>	<b>USD/ton <math>NH_3</math></b>	<b>958</b>	<b>773 (-19%)</b>	<b>815</b>	<b>801 (-1.7%)</b>	<b>906</b>	<b>859 (-5.2%)</b>

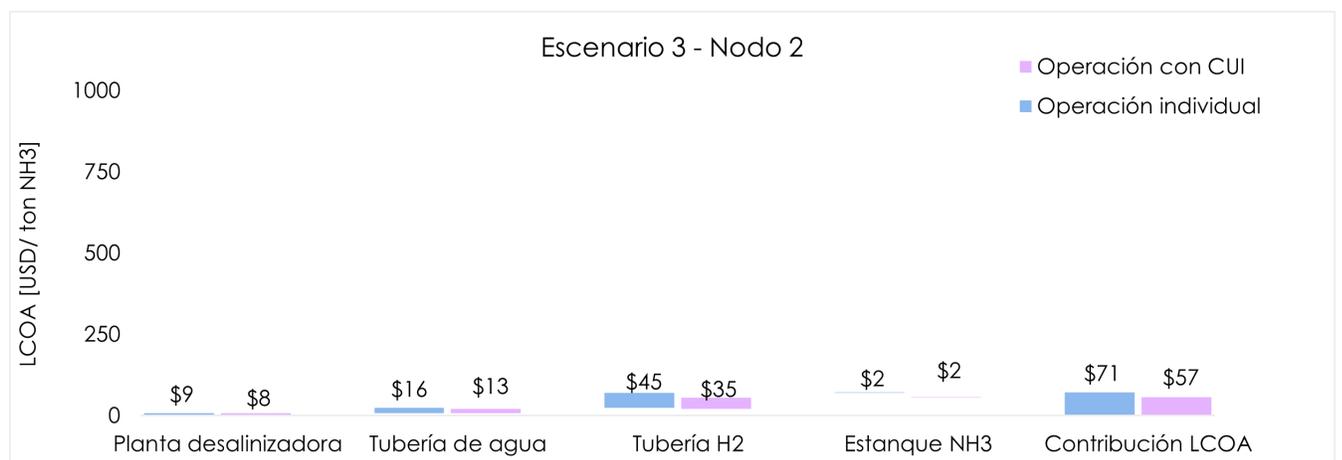
Se observa que el proyecto 1, el de menor escala y más lejano al puerto es nuevamente el más beneficiado de compartir infraestructura, con una reducción de inversión CUI de un 66%. Esta reducción se ve reflejada en el LCOA reduciéndolo un 19%.

Además se tiene el desglose de inversiones por equipos en ambos casos, donde se puede observar que el proyecto 1 se ve beneficiado con reducciones mayores a 60% en todos los elementos compartidos. El proyecto 2, que es el de mayor escala nuevamente es el menos beneficiado con una reducción de inversión CUI de un 20%, que luego se ve reflejada una reducción de 1.7% en el LCOA. Respecto al proyecto 3, se observa que la tubería de agua no resultan favorable en operación compartida para este proyecto, por la misma razón que en el escenario 2 debido a que la operación compartida tiene un trazado distinto a la operación individual, a pesar de lo anterior, reduce en un 45% la inversión en elementos CUI, implicando una reducción de un 5.2% en su LCOA.

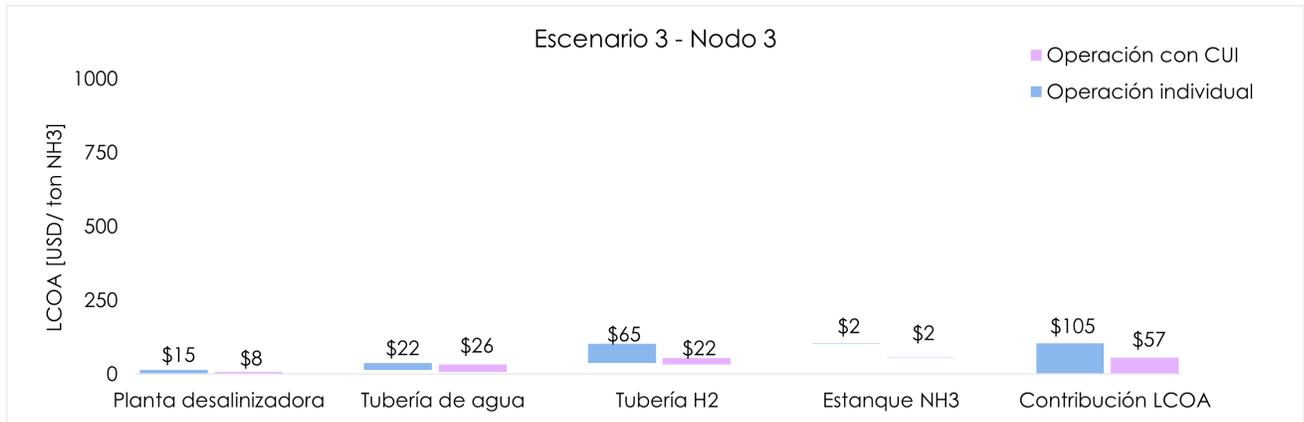
Al igual que los escenarios anteriores se generaron gráficos de cascada para cada proyecto, donde se observa la contribución al LCOA de cada elemento CUI, en la operación individual y compartida



**Figura 4.16:** Escenario 3 - Gráfico de cascada proyecto 1



**Figura 4.17:** Escenario 3 - Gráfico de cascada proyecto 2

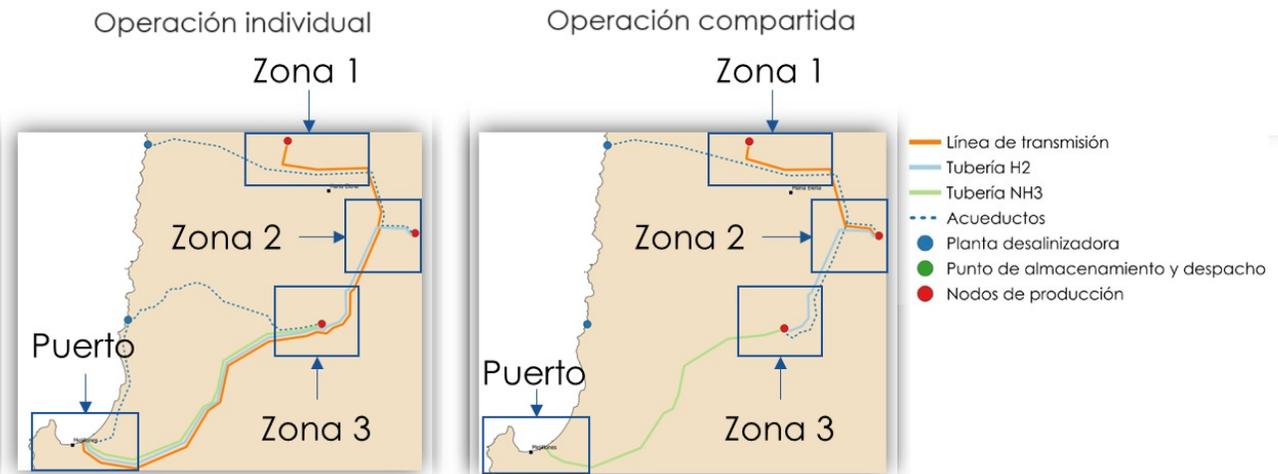


**Figura 4.18:** Escenario 3 - Gráfico de cascada proyecto 2

Para el proyecto 1 se observa en la Figura 4.16 que lo más influyente es la disminución en inversión en la planta desalinizadora y las tuberías de agua. Para el proyecto 2 se observa en la Figura 4.17 que sus reducciones son debido al tuberías de agua y  $H_2$ . Para el proyecto 3 se observa en la Figura 4.18 que sus reducciones son principalmente debido al compartir planta desalinizadora y tuberías de  $H_2$ .

#### 4.5 Resultados y análisis - Escenario 4

En primer lugar, se recuerda el escenario 4 de forma simplificada, donde se puede ver el caso compartido y caso individual (Figura 4.19)



**Figura 4.19:** Escenario 4 simplificado

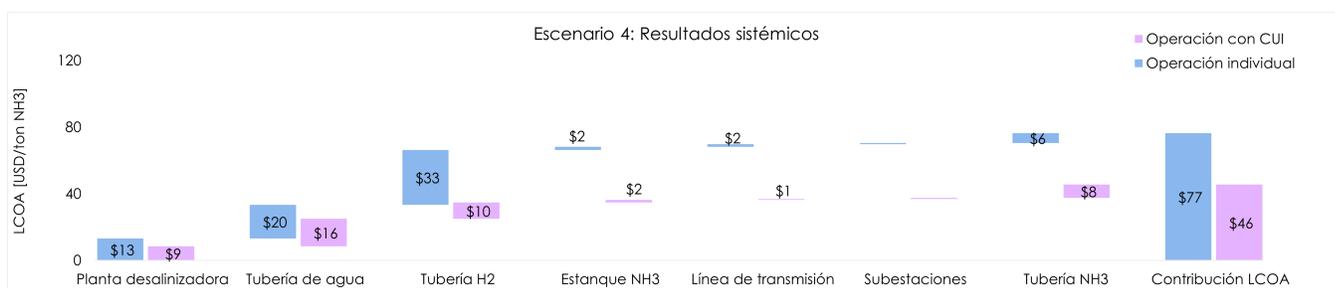
**Tabla 4.10:** Resultados tecno-económicos escenario 4

Caso individual				
	Unidad	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
<i>Equipamiento eléctrico</i>				
Tamaño planta PV	MW	85	1667	686
Factor de planta PV 1er año	%	27 %	28 %	28 %
<i>Equipamiento H<sub>2</sub></i>				
Tamaño planta de electrolisis	MW	48	1061	421
Utilización electrolizador	%	43 %	51 %	42 %
<i>Equipamiento NH<sub>3</sub></i>				
Capacidad Haber-Bosch	tpd	64	1573	546
Utilización Haber-Bosch	%	86 %	87 %	85 %
Producción anual NH <sub>3</sub>	kton por año	20	500	170
<i>Datos de inversión</i>				
CAPEX	MUSD	159	2662	1029
LCOA	USD/ton NH <sub>3</sub>	<b>958</b>	<b>815</b>	<b>744</b>

Manteniendo los resultados técnicos de los equipos de la Tabla 4.10 fijos, se realizó la simulación de la operación compartida, y se obtuvieron los resultados sistémicos resumidos en la Tabla 4.11 y Figura 4.20

**Tabla 4.11:** Resultados sistémicos escenario 4

Resultados sistémicos			
	Unidad	Operación individual	Operación compartida
CAPEX elementos CUI	MUSD	435	259 (-40 %)
Contribución LCOA elementos CUI	USD/ton NH <sub>3</sub>	77	46 (-40 %)
CAPEX total	MUSD	3850	3675 (-4.6 %)
LCOA total	USD/ton NH <sub>3</sub>	802	771 (-4 %)



**Figura 4.20:** Resultados sistémicos escenario 4

Se observa una reducción del 40 % en la inversión de los elementos CUI al tener operación compartida, esto representa una disminución de un 4.6 % de la inversión global. Los efectos que

cada particular recibe a partir de la operación compartida, se resumen en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12:** Resultados tecno-económicos caso individual versus compartido, escenario 4

	Unidad	Proyecto 1		Proyecto 2		Proyecto 3	
		Individual	Compartida	Individual	Compartida	Individual	Compartida
<b><i>Inversión total</i></b>							
<b>CAPEX</b>	<b>MUSD</b>	159	128 (-20 %)	2662	2547 (-4 %)	1029	1000 (-3 %)
<b><i>Inversión CUI</i></b>							
Planta desalinizadora	<b>MUSD</b>	15	1 (-93 %)	31	31	20	10 (-47 %)
Tubería $H_2O$	<b>MUSD</b>	15	2 (-86 %)	66	54 (-19 %)	35	39 (+11 %)
Línea de transmisión	<b>MUSD</b>	10	3 (-66 %)	0	0	0	0
Subestaciones	<b>MUSD</b>	4	4	0	0	0	0
Tubería $H_2$	<b>MUSD</b>	0	2	191	55 (-71 %)	0	0
Tubería $NH_3$	<b>MUSD</b>	0	1.3	0	34	35	12 (-67 %)
Estanque $NH_3$	<b>MUSD</b>	0.8	0.3 (-63 %)	8	7.7 (-6 %)	3	2.6 (-12 %)
CAPEX CUI	<b>MUSD</b>	46	15 (-68 %)	296	181 (-39 %)	93	64 (-32 %)
Contribución LCOA	<b>USD/ton <math>NH_3</math></b>	282	84 (-70 %)	71	44 (-38 %)	67	46 (-32 %)
<b>LCOA</b>	<b>USD/ton <math>NH_3</math></b>	<b>958</b>	<b>760 (-21 %)</b>	<b>815</b>	<b>788 (-3.4 %)</b>	<b>744</b>	<b>722 (-2.9 %)</b>

Se observa que el proyecto 1, el de menor escala y más lejano al puerto es nuevamente el más beneficiado de compartir infraestructura, con una reducción de inversión CUI de un 70 %. Esta reducción se ve reflejada en el LCOA reduciéndolo un 21 %. Además se tiene el desglose de inversiones por equipos en ambos casos, donde se puede observar que para el proyecto 1 se ve beneficiado con reducciones mayores a 60 % en todos los elementos compartidos.

El proyecto 2, observa una reducción de inversión CUI de un 38 %. Que luego se ve reflejada en solo una reducción de 3.4 % en el LCOA. Respecto al proyecto 3, en este caso es el menos beneficiado con una reducción en la inversión CUI de un 32 % y reflejada en una reducción de 2.9 % en el LCOA. Se observa que la tubería de agua no resultan favorable en operación compartida para este proyecto, por la misma razón que en el escenario 2 debido a que la operación compartida tiene un trazado distinto a la operación individual.

Al igual que los escenarios anteriores se generaron gráficos de cascada del LCOA para cada proyecto, donde se observa la contribución al LCOA de cada elemento CUI, en la operación individual y compartida:

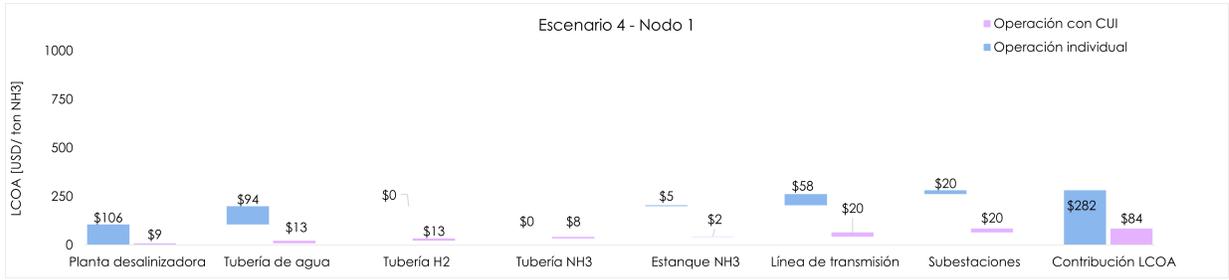


Figura 4.21: Escenario 4 - Gráfico de cascada proyecto 1



Figura 4.22: Escenario 4 - Gráfico de cascada proyecto 2

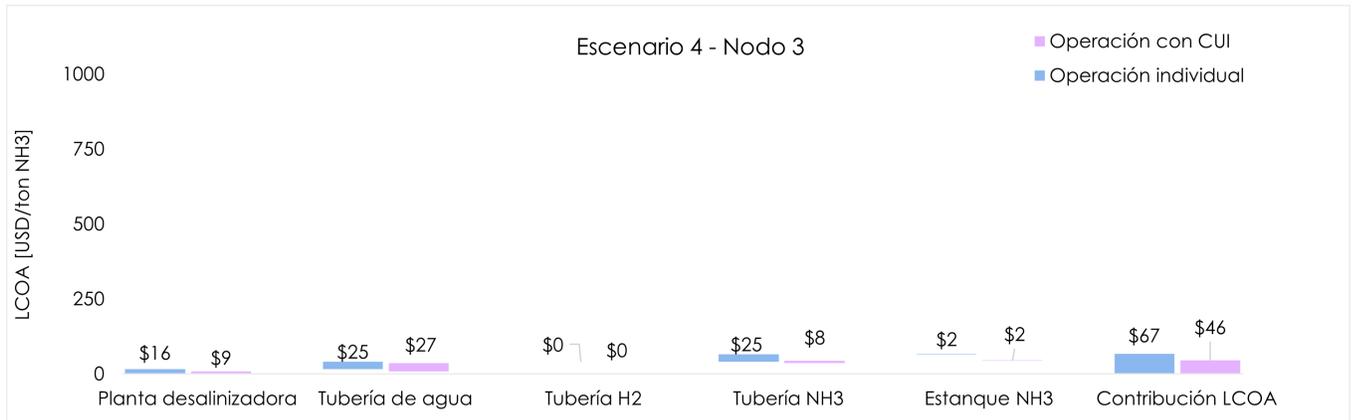


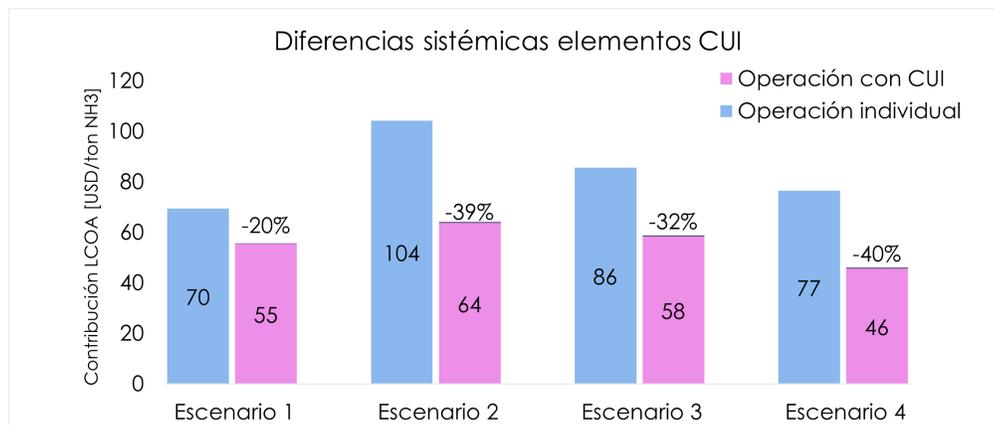
Figura 4.23: Escenario 4 - Gráfico de cascada proyecto 3

Para el proyecto 1 se observa en la Figura 4.21 que lo más influyente es la disminución en inversión en la planta desalinizadora y las tuberías de agua. Para el proyecto 2 se observa en la Figura 4.22 que sus reducciones son debido al tuberías de agua y  $H_2$ . Para el proyecto 3 se observa en la Figura 4.22 que sus reducciones son principalmente debido al compartir planta desalinizadora y tuberías de  $NH_3$ .

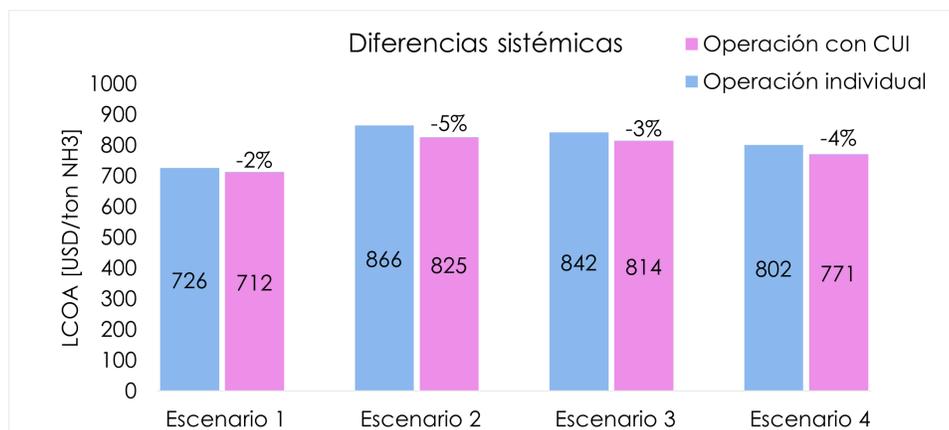
Se incluye como información suplementaria en el Apéndice B los LCOA sistémicos y el aporte de cada proyecto para la cadena de valor completa.

## 4.6 Comparación entre escenarios

Para realizar una comparación entre escenarios, y tener un análisis de lo obtenido a lo largo de los escenarios se agrupan en gráficos la contribución al LCOA sistémico de los escenarios en operación individual y compartida, así como los LCOA sistémicos de cada escenario, ver Figuras 4.24 y 4.25



**Figura 4.24:** Contribución al LCOA sistémico de los elementos CUI de cada escenario



**Figura 4.25:** LCOA sistémico de cada escenario

Se puede destacar que a lo largo de todos los escenarios en la operación compartida se obtuvo una reducción en la contribución al LCOA sistémico de los elementos CUI de un 33 % en promedio.

Considerando la cadena de valor completa se obtuvo una reducción promedio de 3.5 % del LCOA sistémico a lo largo de los escenarios.

Realizando la comparación entre escenarios, se observa que el escenario con la mayor reducción en elementos CUI fue el escenario 4, con un 40 % de disminución. Sin embargo la mayor reducción total se obtuvo en el escenario 2 con una reducción del 4.7% en el LCOA sistémico.

## 5 Conclusiones

El estudio realizado sobre la ventaja tecno-económica de una infraestructura compartida en Antofagasta ofrece una visión inicial de los posibles beneficios que esta estrategia podría brindar en la región. Los resultados obtenidos demuestran una reducción promedio de 33% en la inversión de los elementos CUI, que se ve reflejada en una reducción de 3.5% promedio en el LCOA sistémico en los escenarios evaluados, la mayor reducción se obtuvo en el escenario 2 (Tubería de  $H_2$ ) con una reducción de 4.7% en el LCOA sistémico.

Se destaca el beneficio derivado de compartir elementos específicos de la infraestructura común. En el caso de las tuberías de hidrógeno, planta desalinizadora y las tuberías de suministro de agua, fueron los equipos con mayor influencia en la reducción sistémica de inversión CUI (inversión de los equipos definidos como infraestructura común), con una influencia promedio de un 72%, 19% y 19% respectivamente. Además de esta reducción económica, es importante considerar las ventajas logísticas asociadas al uso de CUI, estas ventajas resultan en que sea beneficioso el compartir equipos, incluso cuando no resulten en reducciones económicas significativas, gracias a que pueden ser favorables de compartir debido a disminuciones en tiempos de construcción, facilidad en temas de permisos y un uso más eficiente del territorio, lo que puede converger en una aceleración de las etapas de desarrollo de los proyectos. Por ejemplo, para este trabajo el estanque de amoníaco representó un 1% en las reducciones de inversión CUI, pero por las ventajas logísticas mencionadas su uso compartido puede seguir representando un beneficio.

La distribución de costos de los elementos CUI escogida implicó que los beneficios del modelo de infraestructura compartida varían según el proyecto y su escala. El proyecto 1, de menor escala y mayor distancia al puerto, experimentó la mayor reducción del LCOA, con un promedio del 26%, mientras que el proyecto 2, asociado al mayor volumen de producción, observó la menor reducción promedio del LCOA, 2%. Es importante mencionar que los efectos observados a nivel de cada proyecto están influenciados significativamente por los supuestos de la cadena de valor y la distribución de costos escogida, en este contexto, las reducciones son mayores para el proyecto de menor escala, el proyecto 1, dado que se asumió que todos los proyectos, independientemente de su producción de amoníaco, construyen los mismos equipos, sin embargo, esta premisa puede

no ser ventajosa a baja escala, por ejemplo, en el caso de la planta desalinizadora, el proyecto 1 podría optar por una operación diferente, como comprar y recibir el agua necesaria de un suministro externo en lugar de construir la planta.

A pesar de lo sensible que pueden ser los resultados de cada proyecto a los supuestos de costos, los resultados a nivel sistémico claramente demuestran una mejora en el caso de negocio mediante el uso de CUI. Estos hallazgos proporcionan un punto de partida para considerar la implementación de una infraestructura compartida en la región de Antofagasta, sugieren que esta estrategia podría ser una forma viable de reducir los costos en proyectos de producción de amoníaco en la región, además de generar sinergias y reducir la incertidumbre de inversión.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones inherentes al estudio, como la selección de ubicaciones y configuraciones que podrían no reflejar completamente la complejidad de los proyectos en la realidad. Por ende, se recomienda realizar investigaciones adicionales, tales como explorar diferentes estrategias de distribución de costos y considerar la inclusión de otros elementos relacionados como parte de CUI. Estas investigaciones adicionales pueden optimizar la implementación del CUI y maximizar sus potenciales beneficios.

## Referencias

- [1] Armijo, J., & Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541-1558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.028>
- [2] Ministerio de energía de Chile. (2020). Estrategia nacional de hidrógeno verde.
- [3] Ministerio de energía de Chile (2022). Antofagasta y el futuro del hidrógeno verde en Chile. <https://energia.gob.cl/noticias/antofagasta/antofagasta-y-el-futuro-del-hidrogeno-verde-en-chile>
- [4] VIS Consultants (2023). Study on requirements and implementation of ENTSOG'S Cost Benefit Analysis for hydrogen infrastructure for ACER
- [5] Khan, T. O., Young, M. A., 38; Layzell, C. B. (2021). The Techno-Economics of Hydrogen Pipelines. *Transition Accelerator Technical Briefs (Vol 1)*.
- [6] Switzerland Global Enterprise (2021). Green hydrogen projects Chile. <https://www.sge.com/system/files/event/downloads/20220525%20Green%20Hydrogen%20projects%20Chile.pdf>
- [7] Queensland treasury (2023). Common user infrastructure assesment principles. <https://www.treasury.qld.gov.au/programs-and-policies/common-user-infrastructure-assessment-principles/>
- [8] International Renewable Energy Agency (2022), Innovation outlook: renewable ammonia
- [9] Ministerio de Energía de Chile. Explorador solar. <https://solar.minenergia.cl/fotovoltaico>
- [10] Ministerio de Energía de Chile. Explorador eólico. <https://eolico.minenergia.cl/potencia>
- [11] Neumann, F., Zeyen, E., Victoria, M., & Brown, T. (2023). The potential role of a hydrogen network in Europe. *Joule*, 7(8), 1793-1817. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.06.016>
- [12] European Hydrogen Backbone (2020). How a dedicated hydrogen infrastructure can be created.
- [13] Brown, D., Reddi, K., Elgowainiy, A. (2022). The development of natural gas and hydrogen pipeline capital cost estimating equations. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.270>

- [14] Galimova, T., Fasihi, M., Bogdanov, Dmitrii., Breyer, C. (2023). Feasibility of green ammonia trading via pipelines and shipping: Cases of Europe, North Africa, and South America.
- [15] Nayak-Luke, R., Bañares-Alcántara, R., Salmon, N. (2021). Optimization of green ammonia distribution systems for intercontinental energy transport.

## A Apéndice A: Supuestos tecno-económicos

En esta sección se resumen los supuestos tecno-económicos utilizados de forma general para la cadena de valor completa y también los usados en la simulación para cada escenario, se entregan los datos para la simulación individual en la columna de cada nodo, mientras la columna CUI 1-2 representa equipos compartidos por el nodo 1 y nodo 2, mientras CUI 1-2-3 es compartido por los tres nodos

**Tabla A.2:** Escenario - 1: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados

<i>Escenario 1</i>							
	Input	Unidad	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	CUI 1- 2	CUI 1-2-3
	Operación		Individual	Individual	Individual	Compartida	Compartida
Planta desalinizadora	CAPEX	kUSD/m3/h	\$ 364	\$ 33	\$ 54	-	\$ 33
	OPEX	kUSD/m3/h-año	\$ 18	\$ 2	\$ 3	-	\$ 2
	Capacidad	m3/h	42	1,089	365	-	1,496
Tubería $H_2O$	CAPEX	kUSD/km	\$ 315	\$ 724	\$ 503	-	\$ 851
	OPEX	kUSD/km-año	\$ 9	\$ 22	\$ 15	-	\$ 26
	Diametro	in	6	22	14	-	26
	Capacidad	m3/h	42	1,089	365	-	1,496
	Distancia	km	50	50	50	-	50
Línea de transmisión	CAPEX	kUSD/km	50	600	100	600	630
	OPEX	kUSD/km-año	1.5	18	3	18	18.9
	Potencia transmitida	MW	57	1,500	500	1,500	1,750
	Voltaje	kV	66	500	154	500	500
Subestaciones	Distancia	km	194	152	100	40	100
	CAPEX	USD	\$ 3,990,000	\$ 108,700,000	\$ 34,500,000	\$ -	\$ 136,481,000
Estanque $NH_3$	OPEX	USD/y	\$ 39,900	\$ 1,140,000	\$ 495,000	\$ -	\$ 1,364,810
	Capacity	MW	57	1,500	500	\$ -	1,750
	CAPEX	USD	\$ 846,213	\$ 8,160,273	\$ 2,977,743	\$ -	\$ 10,613,066
Estanque $NH_3$	OPEX	USD/y	\$ 16,924	\$ 163,205	\$ 59,555	\$ -	\$ 212,261
	Capacity	ton NH3	1,450	37,700	12,570	-	51,720

**Tabla A.3:** Escenario - 2: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados

<i>Escenario 1</i>							
	Input	Unidad	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	CUI 1- 2	CUI 1-2-3
	Operación		Individual	Individual	Individual	Compartida	Compartida
Planta desalinizadora	CAPEX	kUSD/m3/h	\$ 431	\$ 34	\$ 62	-	\$ 32
	OPEX	kUSD/m3/h-año	\$ 22	\$ 2	\$ 3	-	\$ 2
	Capacidad	m3/h	35	912	308	-	1,255
Tubería $H_2O$	CAPEX	kUSD/km	\$ 315	\$ 665	\$ 453	-	\$ 786
	OPEX	kUSD/km-año	\$ 9	\$ 20	\$ 14	-	\$ 24
	Diametro	in	6	20	12	-	24
	Capacidad	m3/h	35	912	308	-	1255
	Distancia	km	50	100	70	-	85
Tubería $H_2$	CAPEX	kUSD/km	\$ 624	\$ 1,255	\$ 930	\$ 1,090	\$ 1,255
	OPEX	kUSD/km-año	\$ 19	\$ 38	\$ 28	\$ 33	\$ 38
	Distancia	km	194	152	100	40	100
	Diametro	in	4	12	8	10	12
	Capacidad de almacenamiento	kg H2/km	28	344	142	232	344
Estanque $NH_3$	CAPEX	USD	\$ 846,213	\$ 8,160,273	\$ 2,977,743		\$ 10,613,066
	OPEX	USD/y	\$ 16,924	\$ 163,205	\$ 59,555		\$ 212,261
	Capacity	ton NH3	1,450	37,700	12,570	-	51,720

**Tabla A.1:** Datos tecno-económicos cadena de valor de producción de amoníaco

Equipo	Input	Unidad	Valor
Panel fotovoltaico (PV)	CAPEX	kUSD/MW	600
	OPEX	kUSD/MW-año	15
Turbina eólica (Wind)	CAPEX	kUSD/km	1.500
	OPEX	kUSD/km-año	30
PPA (Take or pay)	OPEX	kUSD/MW-año	744,600
Electrolizador (EZ)	CAPEX	USD/kg H2/h	28,800
	OPEX	USD/kg H2/h-año	576
Compresor 30 a 200 bar	CAPEX	USD/kg H2/h	2,000
	OPEX	USD/kg H2/h-año	125
Compresor 30 a 100 bar	CAPEX	USD/kg H2/h	1,360
	OPEX	USD/kg H2/h-año	85
Compresor 100 a 200 bar	CAPEX	USD/kg H2/h	900
	OPEX	USD/kg H2/h-año	56
Planta Haber - Bosch	<i>Escala 500,000 ton NH3/año</i>		
	CAPEX	USD/kg NH3/h	5,540
	OPEX	USD/kg NH3/h-año	139
	<i>Escala 20,000 y 170,000 ton NH3/año</i>		
	CAPEX	USD/kg NH3/h	8,130
	OPEX	USD/kg NH3/h-año	203
Unidad de separación de aire	<i>Escala 500,000 ton NH3/año</i>		
	CAPEX	USD/kg N2/h	682
	OPEX	USD/kg N2/h-año	17
	<i>Escala 20,000 y 170,000 ton NH3/año</i>		
	CAPEX	USD/kg N2/h	1000
	OPEX	USD/kg N2/h-año	25
Torre de enfriamiento	CAPEX	USD/MWt	35,000
	OPEX	USD/MWt-año	1,050
Estanque de H2	CAPEX	USD/kg H2	605
Batería (BESS)	CAPEX	USD/kWh	250
	CAPEX carga	USD/kW	60
	OPEX	USD/kWh-año	3

**Tabla A.4:** Escenario - 3: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados

<i>Escenario 3</i>							
	Input	Unidad	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	CUI 1- 2	CUI 1-2-3
	Operación		Individual	Individual	Individual	Compartida	Compartida
Planta desalinizadora	CAPEX	kUSD/m3/h	\$364	\$34	\$62	-	\$32
	OPEX	kUSD/m3/h-año	\$18	\$2	\$3	-	\$2
	Capacidad	m3/h	42	912	308	-	1,262
Tubería $H_2O$	CAPEX	kUSD/km	\$315	\$665	\$453	-	\$786
	OPEX	kUSD/km-año	\$9	\$20	\$14	-	\$24
	Diametro	in	6	20	12	-	24
	Capacidad	m3/h	42	912	308	-	1,262
	Distancia	km	50	100	70	-	85
Tubería $H_2$	CAPEX	kUSD/km		\$1,255	\$930	\$1,090	\$1,255
	OPEX	kUSD/km-año		\$38	\$28	\$33	\$38
	Distancia	km		152	100	52	100
	Diametro	in		12	8	10	12
	Capacidad de almacenamiento	kg $H_2$ /km		344	142	232	344
Estanque $NH_3$	CAPEX	USD	\$846,213	\$8,160,273	\$2,977,743	-	\$10,613,066
	OPEX	USD/y	\$16,924	\$163,205	\$59,555	-	\$212,261
	Capacity	ton $NH_3$	1,450	37,700	12,570	-	51,720
Línea de transmisión	CAPEX	kUSD/km	\$50	-	-	-	-
	OPEX	kUSD/km-año	\$1.5	-	-	-	-
	Potencia transmitida	MW	57	-	-	-	-
	Voltaje	kV	66	-	-	-	-
	Distancia	km	194	-	-	-	-
Subestaciones	CAPEX	USD	\$3,990,000	-	-	-	-
	OPEX	USD/y	\$39,900	-	-	-	-
	Capacity	MW	57	-	-	-	-

**Tabla A.5:** Escenario - 4: Datos tecno-económicos elementos CUI utilizados

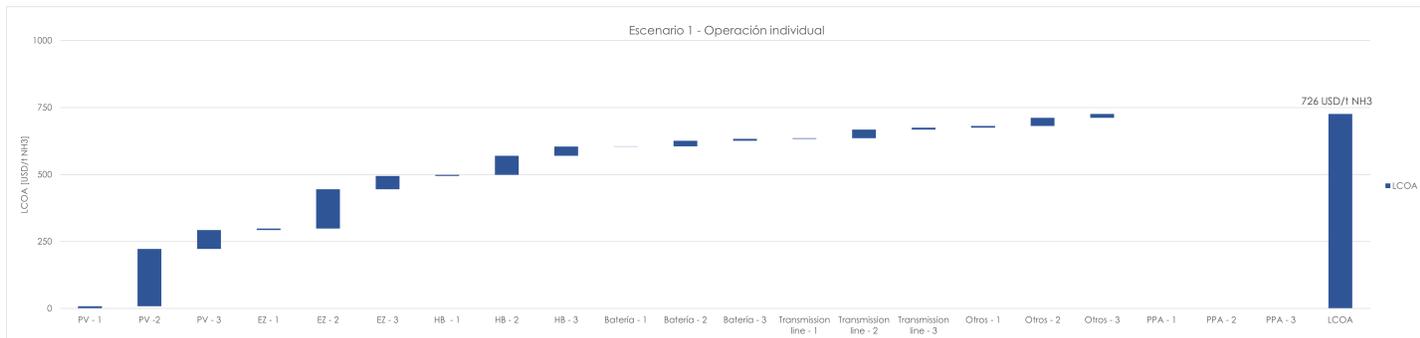
<i>Escenario 4</i>							
	Input	Unidad	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	CUI 1- 2	CUI 1-2-3
	Operación		Individual	Individual	Individual	Compartida	Compartida
Planta desalinizadora	CAPEX	kUSD/m3/h	\$364	\$34	\$54	-	\$32
	OPEX	kUSD/m3/h-año	\$18	\$2	\$3	-	\$2
	Capacidad	m3/h	42	912	366	-	1315
Tubería $H_2O$	CAPEX	kUSD/km	\$315	\$665	\$503	-	\$786
	OPEX	kUSD/km-año	\$9	\$20	\$15	-	\$24
	Diametro	in	6	20	14	-	18
	Capacidad	m3/h	42	912	366	-	1315
	Distancia	km	50	100	70	-	85
Tubería $H_2$	CAPEX	kUSD/km	-	\$1,255	-	\$1,090	-
	OPEX	kUSD/km-año	-	\$38	-	\$33	-
	Distancia	km	-	152	-	52	-
	Diametro	in	-	12	-	10	-
	Capacidad de almacenamiento	kg $H_2$ /km	-	344	-	232	-
Tubería $NH_3$	CAPEX	kUSD/km	-	-	\$351	-	\$469
	OPEX	kUSD/km-año	-	-	\$11	-	\$14
	Distancia	km	-	-	100	-	100
	Diametro	in	-	-	6	-	10
	Capacidad	m3/h	-	-	366	-	1315
Estanque $NH_3$	CAPEX	USD	\$846,213	\$8,160,273	\$2,977,743	-	\$10,613,066
	OPEX	USD/y	\$16,924	\$163,205	\$59,555	-	\$212,261
	Capacity	ton $NH_3$	1,450	37,700	12,570	-	51,720
Línea de transmisión	CAPEX	kUSD/km	\$50	-	-	-	-
	OPEX	kUSD/km-año	\$1.5	-	-	-	-
	Potencia transmitida	MW	57	-	-	-	-
	Voltaje	kV	66	-	-	-	-
	Distancia	km	194	-	-	-	-
Subestaciones	CAPEX	USD	\$3,990,000	-	-	-	-
	OPEX	USD/y	\$39,900	-	-	-	-
	Capacity	MW	57	-	-	-	-

Respecto a los parámetros de evaluación económica usados en la optimización se tiene:

- Vida útil del proyecto = 30 años
- Tasa de descuento = 8 %
- Primer año de inversión = 2028
- Primer año de operación = 2030

## B Apéndice B: Gráficos de cascada cadena de valor completa

Se incluyen los gráficos de los escenarios en operación individual de la cadena de valor completa, para observar el aporte los equipos que no fueron seleccionados como CUI y se mantuvieron fijos en la simulación compartida.



**Figura B.1:** Escenario 1 - LCOA cadena de valor completa



**Figura B.2:** Escenario 2 - LCOA cadena de valor completa

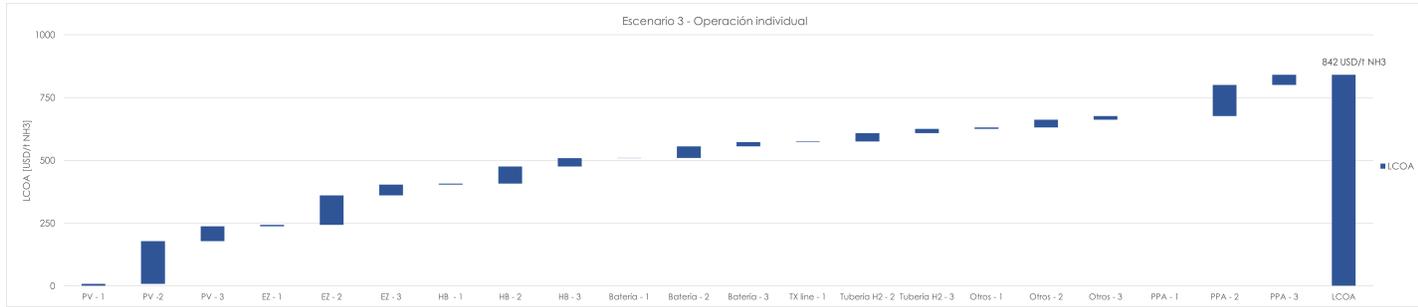


Figura B.3: Escenario 3 - LCOA cadena de valor completa

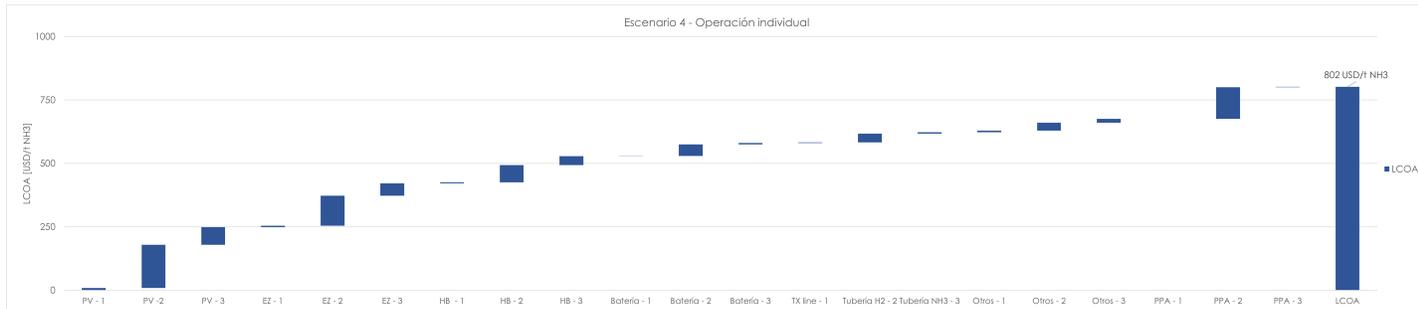


Figura B.4: Escenario 4 - LCOA cadena de valor completa

## C Apendice C: Nomenclatura equipos

Se adjunta la nomenclatura de los equipos usada en los diagramas de configuración de los escenarios

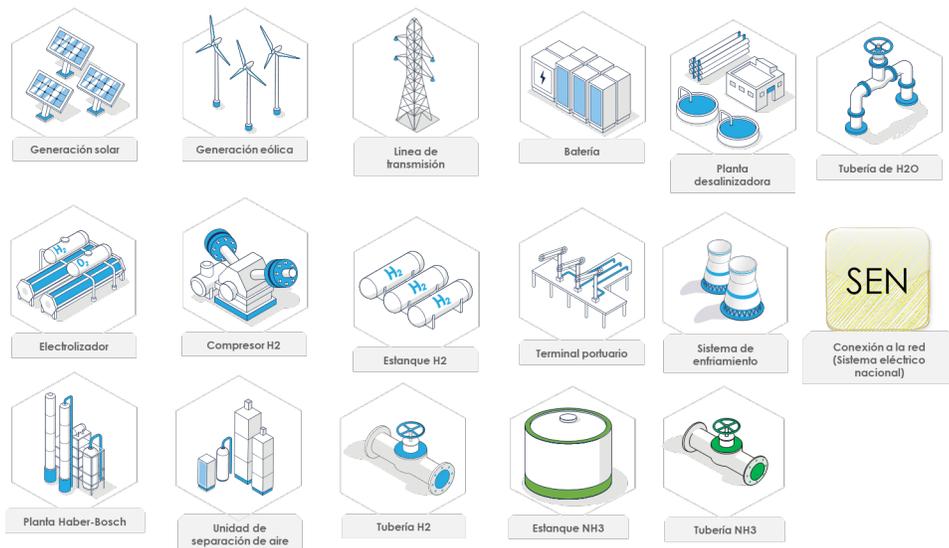
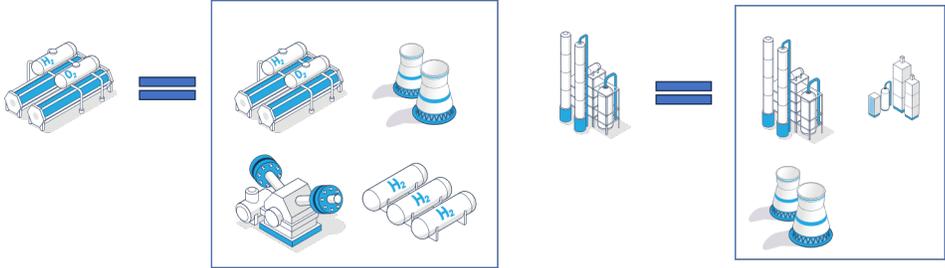


Figura C.1: Nomenclatura equipos

Sin embargo, por simplicidad en los diagramas, los equipos auxiliares del electrolizador, y la planta Haber-Bosch se omitieron y se asumen que están presentes donde se encuentra el EZ o la planta HB respectiva, teniendo la equivalencia de la siguiente imagen.



**Figura C.2:** Simplificación de símbolos de los equipos