



Universidad Europea de Canarias

**Estrategia de reconversión de propano ducto de 8" para transporte de amoniaco verde
desde Puerto Salgar Cundinamarca a Vista Hermosa Cundinamarca**

Máster Universitario en Energías Renovables

Cesar Augusto Díaz Arévalo

Álvaro Iván Peña Fonseca

Dagoberto Retana Madrigal

Fabian Hernando Castañeda Sandoval

TUTOR: Juan Carlos de Haro Sánchez

(Canarias), 2025

Tabla de contenido

<i>Capítulo 1. Introducción</i>	<i>10</i>
1.1 Hipótesis.....	11
1.2 Antecedentes	11
1.3 Demanda histórica de amoniaco en Colombia	12
<i>Capítulo 2. Objetivos.....</i>	<i>16</i>
2.1 Objetivo Principal	16
2.2 Objetivos Específicos	16
<i>Capítulo 3. Antecedentes.....</i>	<i>17</i>
3.1 Análisis DAFO	17
3.2 Demanda de energía Bogotá	17
3.3 Descripción técnica del propano ducto.....	18
<i>Capítulo 4. Marco Teórico y Estado del Arte.....</i>	<i>20</i>
4.1 Producción de amoniaco	20
4.2 Proceso de obtención del amoniaco por Haber–Bosch.....	20
4.3 Descripción del amoniaco de acuerdo con la producción de GEI	21
4.4 Emisiones por producción de amoniaco según la fuente	22
<i>Capítulo 5. Estrategia regulatoria, técnica y ambiental para la reconversión del propano ducto.....</i>	<i>24</i>
5.1 Propuesta de estructura regulatoria para la CREG	24
5.1.1 Principios regulatorios.....	24
5.1.2 Ampliación del alcance regulatorio.....	25

5.1.3 Requisitos técnicos y de seguridad.....	25
5.1.4 Régimen tarifario y acceso	25
5.1.5 Medición y certificación verde	26
5.1.6 Gobernanza e institucionalidad	26
5.1.7 Fases de implementación	27
5.2 Requerimientos técnicos para la reconversión del propano ducto.....	28
5.2.1 Fase A — Preparación y alcance (entregable: Documento de Alcance y Plan de Proyecto)	28
5.2.2 Fase B — Recolección de datos e inspecciones no intrusivas (entregables: dataset ILL, informe de sensores).....	29
5.2.3 Fase C — Inspección de campo y verificación (entregables: registros de excavaciones y ensayos).....	29
5.2.4 Fase D — Análisis técnico de integridad (entregables: informe técnico de aptitud y FFS).....	30
5.2.5 Fase E — Evaluación de riesgos específicos por servicio de amoníaco (entregables: QRA preliminar y mapa de contornos).....	30
5.2.6 Fase F — Plan de reparaciones y adaptación operativa (entregables: Plan de conservación e inversión)	31
5.2.7 Fase G — Informe final y entrega (entregable: Informe ejecutivo y técnico + anexos).....	31
5.2.8 Equipo mínimo recomendado y roles	32
5.2.9 Criterios de aceptación / “stop gates”	32
5.2.10 Riesgos y consideraciones técnicas especiales (resumen).....	32
5.2.11 Entregables finales (lista concreta)	32
5.3 Requerimientos ambientales	33
5.3.1 Análisis de requerimientos ambientales	34
5.3.2 Marco Normativo	34

5.3.3 Requerimientos Ambientales	34
Capítulo 6. Desarrollo técnico	36
6.1 Bases y Criterios de diseño	36
6.1.1 Bases de diseño.....	36
6.1.2 Criterios de diseño	37
6.2 Diagrama de proceso.....	38
6.4 Cálculos y resultados por sistema	39
6.4.1 Energía solar fotovoltaica	39
6.4.2 Producción H ₂	40
6.4.3 Producción NH ₃	42
6.4.4 Planta de tratamiento de agua.....	44
6.4.5 Consumo energético sistema de bombeo NH ₃	45
6.4.6 Cálculo de energía transportada y potencial de sustitución	57
6.5 Requerimientos técnicos para planta solar en Puerto Salgar	59
6.5.1 Balance energético diario	59
6.5.2 Potencia instantánea en HSP.....	59
6.5.3 Características de planta solar generado por PVsyst.....	59
6.5.6 Consideraciones adicionales.....	61
6.5.7 Discusión de resultados	61
Capítulo 7. Análisis de resultados	63
7.1 Energía solar fotovoltaica.....	63
7.2 Producción H ₂	63
7.3 Producción NH ₃	63
7.4 Planta de tratamiento de agua	63
7.5 Consumo energético sistema de bombeo NH ₃	63

<i>Capítulo 8. Conclusiones</i>	<i>65</i>
8.1 Viabilidad técnica y de infraestructura.....	65
8.2. Dimensión energética y estratégica	67
8.3 Dimensión ambiental.....	67
8.4 Marco regulatorio y de sostenibilidad.....	68
8.5 Limitaciones y proyección futura.....	68
<i>Capítulo 9. Bibliografía</i>	<i>73</i>
<i>Capítulo 10. Anexos.....</i>	<i>75</i>

Listado de figuras

Figura 1	Demanda histórica de amoníaco y derivados seleccionados en Colombia por volumen y contenido de NH ₃	13
Figura 2	Demanda proyectada de amoníaco y derivados en Colombia.....	14
Figura 3	Composición de las importaciones y exportaciones de amoníaco y derivados desde y hacia Colombia.....	14
Figura 4	Análisis DAFO del hidrógeno y amoníaco verde en Colombia.	17
Figura 5	Cantidad de energía consumida (GWh/mes) Bogotá 2024.....	18
Figura 6	Proceso de síntesis de amoníaco por Haber-Bosch.....	21
Figura 7	Rangos de emisión de GEI del amoníaco según su fuente de producción.....	23
Figura 8	Esquema de Relación Institucional y Gobernanza.....	27
Figura 9	Fases de Implementación.....	28
Figura 10	Diagnóstico de Integridad Mecánica.	33
Figura 11	Cronograma Tentativo – Estudios de Soporte para la Modificación de la Licencia Ambiental. 26 meses.....	35
Figura 12	Diagrama del proceso descriptivo de obtención, transporte y despacho de hidrogeno verde.	38
Figura 13	Estación Salgar-Albán.....	52
Figura 14	Estación Salgar-Albán.....	52
Figura 15	Estación Mansilla-Vista Hermosa.	52
Figura 16	Huella de Planta Solar	61

Listado de tablas

Tabla 1 Caracterización técnica de los tramos del ducto Puerto Salgar – Mansilla – Vista Hermosa.	19
Tabla 2 Parámetros base para el cálculo de energía en la producción de hidrógeno y amoníaco verde.	39
Tabla 3 Resultados del cálculo energético y potencia requerida para la producción de H ₂ y NH ₃ verde.	40
Tabla 4 Comparativo técnico de electrolizadores de tecnología PEM para producción de hidrógeno verde.	40
Tabla 5 Comparativo técnico de plantas de síntesis de amoníaco con tecnología Haber–Bosch para producción verde (NH ₃).	42
Tabla 6 Estimación del consumo de agua para la operación de la planta de tratamiento, electrólisis PEM y sistema Haber–Bosch en Puerto Salgar.	44
Tabla 7 Propiedades físicas y condiciones de operación del amoníaco líquido (NH ₃). ...	46
Tabla 8 Propiedades mecánicas y físicas del material de la tubería (Acero API 5L X42, X52).	47
Tabla 9 Resumen Cálculos Hidráulicos en el tramo Salgar–Albán	48
Tabla 10 Resumen Cálculos Hidráulicos en el tramo Albán–Mansilla	49
Tabla 11 Resumen Cálculos Hidráulicos en el tramo Mansilla–Vista	49
Tabla 12 Parámetros hidráulicos y de potencia para cada Estación de bombeo	51
Tabla 13 Consumo eléctrico diario de la estación de bombeo	53
Tabla 14 Consumo energético y masa de amoníaco requerida para autosuficiencia de la estación de bombeo Salgar–Albán	55
Tabla 15 Consumo energético y masa de amoníaco requerida para autosuficiencia de las estaciones de bombeo Albán–Mansilla y Mansillo–Vista Hermosa.	56
Tabla 16 Energía total transportada por el ducto de amoníaco anual	58
Tabla 17 Parámetros obtenidos de simulación para Puerto Salgar.	60

Resumen

La propuesta técnica conceptual que se presenta en este trabajo de fin de máster tiene como propósito plantear la posibilidad de utilizar mediante adecuación, el propano ducto existente entre la estación de bombeo de Puerto Salgar Cundinamarca y la estación de recepción y acopio de Vista Hermosa, para el transporte de amoniaco verde. Lo anterior, desde la perspectiva de la generación a partir de FERNC, obteniendo hidrógeno verde a partir de electrólisis, y posteriormente convirtiéndolo en amoniaco, para dar aprovechamiento de este vector energético para cualquiera de los usos o derivados que se deseen obtener según la necesidad y la viabilidad de su aplicación. Cabe destacar que el alcance que se propone se limita al planteamiento técnico del aprovechamiento del propano ducto existente mediante adecuaciones técnicas para lograr el fin propuesto. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de crear hidrógeno verde mediante la generación de energía eléctrica, a partir de un parque solar fotovoltaico, y tomando agua del Río Magdalena, para llevar a cabo el proceso químico de electrólisis mediante la tecnología PEM. Es importante mencionar que no se harán estimaciones económicas de ningún tipo, ni para ninguna de las fases del proyecto, como tampoco se harán menciones detalladas acerca de los permisos ambientales requeridos ya que no hacen parte del alcance del estudio y la propuesta conceptual que se presenta en este documento. Como recomendación se propone que posteriormente a la entrega de este documento, se pueda tomar como punto de partida para continuar con el desarrollo y realizar las estimaciones económicas que puedan avalar si es el caso su posible materialización y ejecución.

PALABRAS CLAVE

Energías renovables, hidrógeno verde, amoniaco verde, PEM, Haber-Bosch, ingeniería conceptual, propano ducto, amoniaco ducto, END, QRA, FFS.

Abstract

The conceptual technical proposal presented in this master's thesis aims to assess the feasibility of adapting the existing propane pipeline between the Puerto Salgar pumping station (Cundinamarca) and the Vista Hermosa reception and storage station for the transport of green ammonia. This analysis is approached from the perspective of generation through FERNC (Renewable Non-Conventional Energy Sources), producing green hydrogen via electrolysis and subsequently converting it into ammonia, in order to enable the use of this energy vector for diverse applications according to specific needs and viability criteria.

The scope of this study is limited to the technical proposal for adapting the existing propane pipeline to achieve the intended purpose. Additionally, the project includes the conceptual design of green hydrogen production through electrical energy generated by a photovoltaic solar park, using water from the Magdalena River for the electrolysis process through PEM (Proton Exchange Membrane) technology.

It is important to note that no economic estimations are included for any project phase, nor are detailed references made to environmental permits, as these are outside the defined scope of this conceptual proposal. As a recommendation, it is suggested that this document be used as a foundational reference for subsequent studies that may include economic evaluations to determine the potential materialization and implementation of the proposed system.

KEYWORDS

Renewable energies, green hydrogen, green ammonia, PEM (Proton Exchange Membrane), Haber-Bosch, conceptual engineering, propane pipeline, ammonia pipeline, NDT (Non-Destructive Testing), QRA (Quantitative Risk Assessment), FFS (Fitness For Service).

Capítulo 1. Introducción

El presente Trabajo Fin de Máster se centra en el análisis de la viabilidad técnica, ambiental y regulatoria de la reconversión del propano ducto de 8 pulgadas que conecta Puerto Salgar con Vista Hermosa (Cundinamarca), con el fin de adecuarlo al transporte de amoniaco verde en fase líquida. Este vector energético, derivado del hidrógeno renovable, se plantea como una alternativa estratégica para diversificar la matriz energética del país y contribuir a los compromisos de descarbonización asumidos por Colombia.

La delimitación del trabajo se establece en los siguientes aspectos:

- **Alcance técnico:** se evaluará el estado actual del ducto, sus materiales, condiciones de operación y estaciones asociadas, identificando las adecuaciones necesarias para su conversión a amoniaco ducto. Asimismo, se analizarán los requerimientos de bombeo, seguridad y compatibilidad de materiales frente a las propiedades del amoniaco anhidro.
- **Dimensión energética:** se integrará el transporte de amoniaco a una cadena de suministro sustentada en hidrógeno producido mediante electrólisis PEM alimentada con energía solar fotovoltaica, considerando la demanda energética de Bogotá y su región de influencia.
- **Perspectiva ambiental y de sostenibilidad:** se examinarán los beneficios derivados de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero frente al uso de combustibles fósiles, así como las implicaciones en el uso de infraestructura existente que minimiza nuevos impactos sobre suelos y ecosistemas.
- **Marco regulatorio:** se propondrá un esquema normativo y tarifario que permita habilitar la operación del ducto bajo estándares de seguridad y eficiencia, alineado con la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia y la política de transición energética.

La justificación del trabajo radica en tres elementos principales. En primer lugar, el aprovechamiento de infraestructura existente representa una alternativa efectiva frente a la construcción de nuevos ductos, reduciendo tiempos de implementación y huella

ambiental. En segundo lugar, el amoniaco verde se consolida como un vector energético de creciente relevancia internacional, con potencial de uso en generación eléctrica, transporte y aplicaciones industriales. Finalmente, la demanda energética creciente de Bogotá y la necesidad de diversificar fuentes de suministro hacen imprescindible explorar soluciones innovadoras que fortalezcan la seguridad energética del país y contribuyan al cumplimiento de metas de sostenibilidad.

En este marco, el objeto de estudio se justifica como una contribución académica y técnica que integra conocimientos de ingeniería, energía renovable y regulación, con aplicación directa a la transición energética de Colombia.

1.1 Hipótesis

La reconversión del propano ducto de 8 pulgadas que conecta Puerto Salgar (Cundinamarca) con Vista Hermosa cerca de Bogotá para el transporte de amoniaco verde constituye una alternativa técnicamente viable, regulatoriamente con posibilidad de habilitarse y ambientalmente favorable para impulsar la transición energética de Colombia. Se plantea que adaptar esta infraestructura permitirá movilizar un vector energético de bajas emisiones hacia el principal centro de consumo del país, contribuyendo a la descarbonización de sectores industriales, agrícolas, de transporte pesado y de generación eléctrica.

1.2 Antecedentes

Desde el año 2014, el gobierno colombiano estableció las bases normativas y legales para el uso, aplicación y desarrollo de las energías renovables. La Ley 1715 de 2014 (Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional), fue la encargada de iniciar la ruta hacia las energías renovables en el país.

Dicha ley tenía por objeto “promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía sistemas de almacenamiento de tales fuentes y uso eficiente de la energía, principalmente aquellas de carácter renovable”, y su finalidad era “establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de

las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional”.

En cuanto a las FNCER menciona en su artículo 17, lo siguiente: Son aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares. Otras fuentes podrán ser consideradas como FNCER según lo determine la UPME.

En el año 2015 surgió el Decreto 1073 y el Decreto 2143, en los cuales se definen los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 222 de la Ley 1715 de 2014.

Para el año 2021 el gobierno nacional lanza la Ley 2099, la cual modifica y moderniza la Ley 1715 de 2014 y adicionalmente reconoce el hidrógeno de bajas emisiones como instrumento de palanca de descarbonización y dinamización energética. Entre otros se crea el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la energía (FENOGE). Durante el mismo año 2021 se lanza el documento “Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia”, para el cual contó con la División de Energía y la División de Cambio Climático y Sostenibilidad del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Aquí se relacionan las fortalezas con que cuenta el país para la generación de hidrógeno, competitividad, y se crea el horizonte 2030 y 2050 junto con las metas y la hoja de ruta.

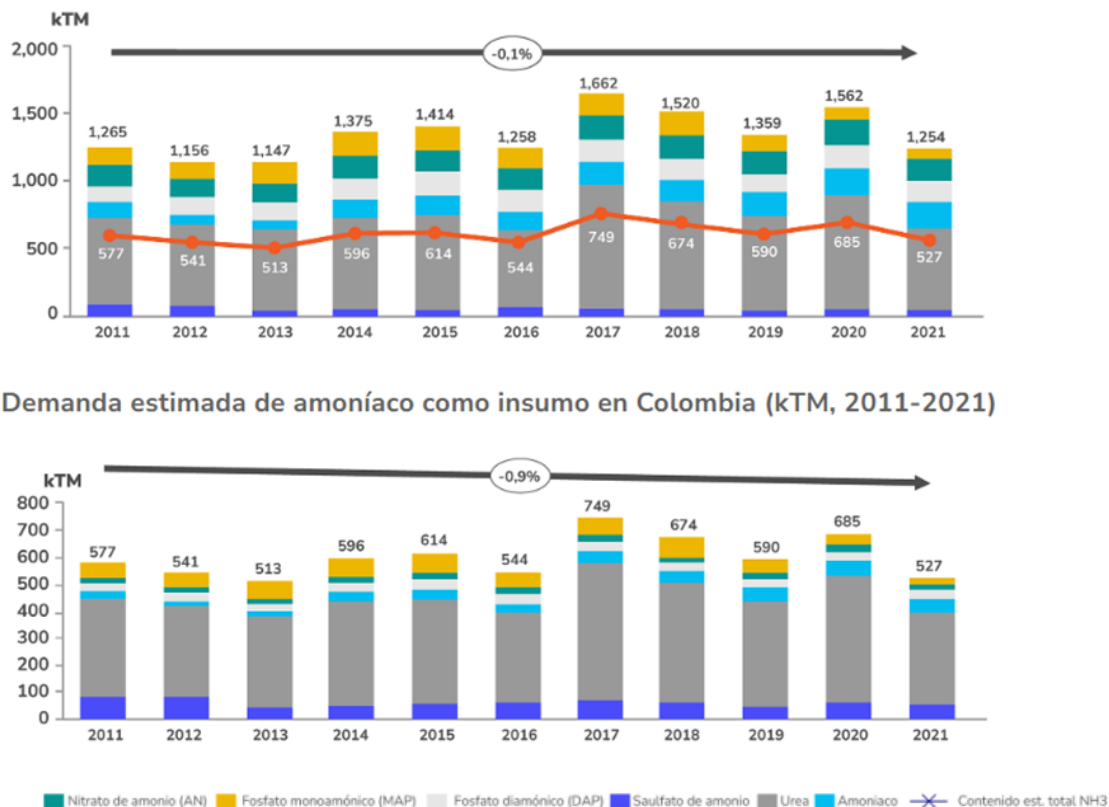
1.3 Demanda histórica de amoníaco en Colombia

Colombia históricamente ha sido un país consumidor de amoníaco, y esto se debe a su alta producción agrícola, teniendo en cuenta que el amoníaco es una de las bases para la producción de fertilizantes.

A continuación, en la Figura 1 se presentan datos estadísticos de la demanda histórica de amoníaco en Colombia durante la década del 2011 a 2021.

Figura 1

Demanda histórica de amoníaco y derivados seleccionados en Colombia por volumen y contenido de NH₃.



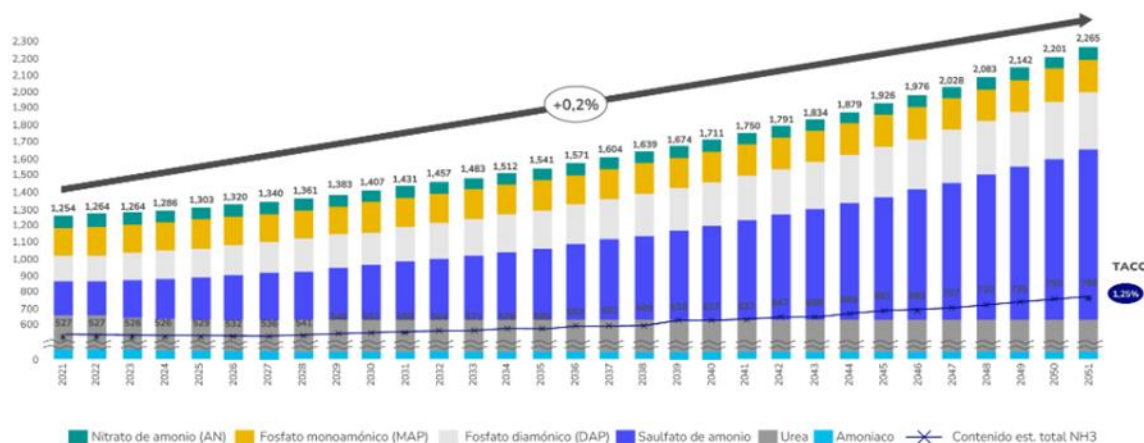
Nota. Adaptado de *Demanda estimada de amoníaco y derivados seleccionados en Colombia por volumen y contenido de NH₃ (kTM, 2011-2021)*, de Ecosistema H2 Colombia, 2023, <https://www.minenergia.gov.co/es/ecosistema-hidrogeno-colombia/h2-en-colombia/cadena-de-valor/conversion-uso-final/>.

En concordancia con la estrategia de descarbonización a 2050, y con la continuidad de la producción agrícola, Colombia se proyecta, (ver Figura 2 y Figura 3), como un gran consumidor de amoníaco, por lo que es de la más alta importancia el hecho de que se

proyecten los planes de producción de amoníaco en búsqueda de la autonomía y la optimización del costo beneficio para el uso del producto y sus derivados.

Figura 2

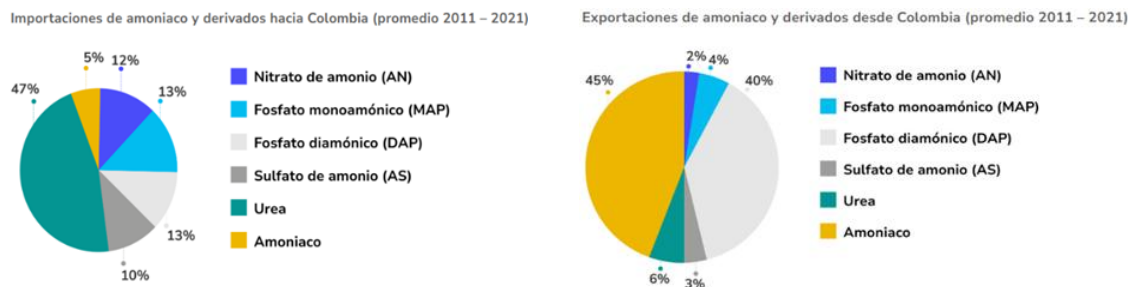
Demanda proyectada de amoníaco y derivados en Colombia.



Nota. Adaptado de *Demanda proyectada de amoníaco y derivados en Colombia (kTM, 2021–2051)*, de Ecosistema H2 Colombia, 2023, <https://www.minenergia.gov.co/es/ecosistema-hidrogeno-colombia/h2-en-colombia/cadena-de-valor/conversion-uso-final/>.

Figura 3

Composición de las importaciones y exportaciones de amoníaco y derivados desde y hacia Colombia.



Nota. Adaptado de *Composición de las importaciones y exportaciones de amoníaco y derivados desde y hacia Colombia (promedio 2011–2021)*, de Ecosistema H2 Colombia,

2023, <https://www.minenergia.gov.co/es/ecosistema-hidrogeno-colombia/h2-en-colombia/cadena-de-valor/conversion-uso-final/>.

Durante el año 2022, la alcaldía de Barranquilla firmó un acuerdo con la compañía colombo-venezolana Monómeros, la cual cuenta con más de 50 años de experiencia en la producción y comercialización de productos para la agroindustria, así como fertilizantes complejos y sales mineralizadas. Actualmente la empresa importa cerca de 50,000 toneladas amoníaco siendo este una de las principales materias primas para la elaboración de fertilizantes. El proyecto se enfoca en eliminar la importación de las 50,000 toneladas y producir 50,000 toneladas de amoníaco adicionales.

Por último, el proyecto más reciente y de gran impacto e importancia que se está desarrollando en el país se denomina Protium. Este proyecto está siendo ejecutado por la Start Up Hevolucion (Opex) la cual cuenta con 11 años en el mercado de implementación de nuevas tecnologías. La primera fase del proyecto tiene como hito la producción de 1,800 toneladas de amoníaco verde al año con destinación principal hacia fertilizantes y nitratos especializados, y se espera lograr con un electrolizador de 2,3 MW. La segunda fase del proyecto incluye un electrolizador de 20 MW para alcanzar una producción estimada de 60, 000 toneladas anuales de fertilizantes nitrogenados, con una ventaja que se destaca ya que cuenta con su propia hidroeléctrica como fuente de energía renovable. (H2lac, 2025).

Capítulo 2. Objetivos

2.1 Objetivo Principal

Evaluar, desde una perspectiva estrictamente técnica y conceptual, la viabilidad de adecuar el propanoducto existente entre Puerto Salgar y la estación Vista Hermosa, así como la obtención de amoniaco verde para transportarlo en fase líquida, integrándolo a una cadena de suministro basada en hidrógeno producido por electrólisis (PEM) alimentada con energía fotovoltaica, y orientada a brindar su disponibilidad como vector energético.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la infraestructura actual del ducto (trazado, diámetro, materiales, condiciones de diseño, equipos e integridad) como insumo para la conversión a servicio con amoniaco.
- Dimensionar a nivel conceptual el parque solar fotovoltaico de acuerdo con los datos de radiación, horas disponibles y la necesidad de energía estimada para el bombeo del fluido.
- Calcular la producción de hidrógeno necesario a partir de la fuente de energía solar fotovoltaica, mediante la aplicación de la técnica de hidrólisis y la tecnología PEM, tomando como base de estimación la capacidad de caudal de la tubería que se estima en 11,52 KBPD.
- Dimensionar y proponer a nivel conceptual los equipos de bombeo de acuerdo con la caracterización del fluido, datos de longitud y diámetro de tubería, densidad de fluido, caudal, TDH a partir del diferencial de altimetría del terreno, pérdidas estimadas por rozamiento.
- Definir las bases de diseño y criterios de aceptación, incluyendo propiedades del NH_3 anhidro, ventana operativa presión-temperatura, compatibilidad de materiales, pruebas requeridas y referencias normativas.

Capítulo 3. Antecedentes

3.1 Análisis DAFO

Con el propósito de hacer una evaluación integral de lo que conlleva el desarrollo de proyectos de hidrógeno y amoníaco verde en Colombia, se realizó un análisis DAFO, (ver Figura 4), esto permite identificar las principales fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas con las que se puede enfrentar este sector emergente. Este análisis nos permite visualizar factores internos que favorecen o pueden significar una limitante para el avance de la industria, así como también los elementos externos que nos señalan los riesgos para su desarrollo o bien su potencialización.

Figura 4

Análisis DAFO del hidrógeno y amoníaco verde en Colombia.

	Aspectos negativos	Aspectos positivos
Análisis interno	Debilidades • Alta necesidad de inversión inicial en infraestructura y tecnología. • Dependencia de financiamiento internacional. • Limitado desarrollo de capacidades técnicas locales en electrólisis y manejo de NH₃. • Escala de proyectos aún pequeña (modulares <100 t/día).	Fortalezas • Gran potencial de recursos renovables (solar, eólico e hidráulico). • Marco normativo con incentivos (Ley 1715, Ley 2099, FENOGÉ). • Experiencia técnica creciente en proyectos piloto. • Posibilidad de exportación desde zonas francas y ZESE.
Análisis externo	Amenazas • Riesgo regulatorio por cambios en incentivos o normatividad. • Competencia internacional con mercados más avanzados (Chile, Australia, UE). • Variabilidad en precios de energías renovables y equipos. • Limitaciones en infraestructura portuaria y logística.	Oportunidades • Creciente demanda global de hidrógeno y amoníaco verde (energía, fertilizantes, transporte marítimo). • Articulación con estrategias climáticas nacionales e internacionales. • Incentivos fiscales y regulatorios en transición energética. • Sinergias con sectores industriales (fertilizantes, movilidad, siderurgia).

Nota. Ministerio de Minas y Energía de Colombia (s.f.); Presentación “Guía para el Desarrollo de Proyectos de Amoníaco Verde en Colombia” (2023).

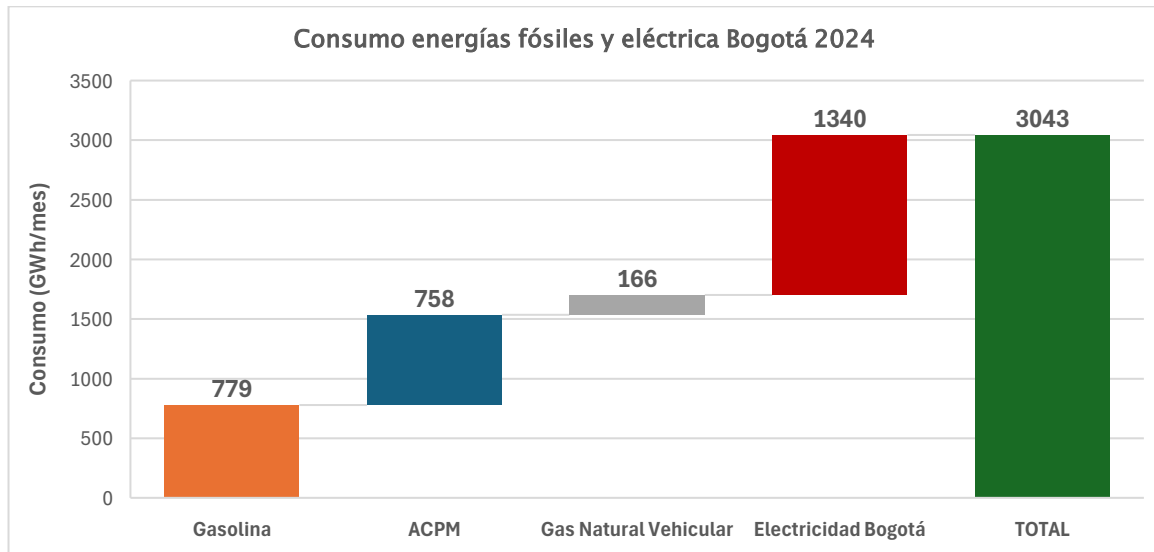
3.2 Demanda de energía Bogotá

De acuerdo con los datos de consumo de Bogotá (ver Figura 5), de las diferentes fuentes que proporcionan las estadísticas para los diferentes sectores tenidos en cuenta, que para

este caso son combustibles fósiles para uso vehicular y energía eléctrica, se presenta el siguiente comparativo que nos permite visualizar dichos consumos para el año 2024.

Figura 5

Cantidad de energía consumida (GWh/mes) Bogotá 2024.



Nota. El gráfico representa el consumo aproximado de energías fósiles para uso vehicular y de energía eléctrica en Bogotá durante el año 2024.

Fuente: Elaboración propia a partir de las siguientes fuentes de información (ENEL, 2025), (PORTAFOLIO, 2025), (SOLDICOM), (DATOS ABIERTOS, 2025)

3.3 Descripción técnica del propano ducto

El propano ducto Puerto Salgar – Mansilla – Vista Hermosa, de 8 pulgadas y construido en 1967, fue diseñado para transportar gas licuado de petróleo (GLP) a lo largo de 136 km. Actualmente se encuentra en estado de hibernación, aunque conserva una infraestructura estratégica con estaciones en Puerto Salgar, Albán, Mansilla y Vista Hermosa. Paralelamente, existe un ducto activo de 10 pulgadas para productos refinados, lo que le otorga flexibilidad operativa y potencial de reconversión.

Puerto Salgar funciona como centro de recepción y bombeo, con capacidad de almacenamiento y facilidades que reducen la dependencia del transporte terrestre.

Albán cumple un rol de rebombeo para mantener presión y caudal, siendo clave en el suministro hacia Bogotá.

Mansilla opera como estación de almacenamiento, regulación y rebombeo, asegurando calidad y continuidad del suministro hacia la Sabana de Bogotá.

Vista Hermosa sirve como estación de recepción, almacenamiento y nodo logístico, con capacidad para despacho terrestre en contingencias.

El sistema presenta tramos con diferentes diámetros (6" y 8"), fabricados en acero API, con espesores variables y presencia de tramos enterrados y aéreos. A pesar de su estado de hibernación, la infraestructura mantiene relevancia estratégica para Bogotá y la región central. La Tabla 1 presenta la información técnica del propano ducto.

Para mayores detalles, ver anexo 1 de este documento.

Tabla 1

Caracterización técnica de los tramos del ducto Puerto Salgar – Mansilla – Vista Hermosa.

Tramo	Longitud (km)	Año de construcción	Diámetro nominal	Estado actual	Observaciones clave
Puerto Salgar – Albán	87,3	1967	8"	Hibernado	Almacenamiento y bombeo en Pto. Salgar
Albán – Mansilla	16,5	1967	6"	Hibernado	Rebombeo en Albán
Mansilla – Vista Hermosa	32,3	1967	6"	Hibernado	Almacenamiento y bombeo en Mansilla y recibo, almacenamiento y distribución en Vista Hermosa

Capítulo 4. Marco Teórico y Estado del Arte

4.1 Producción de amoníaco

El amoníaco es un subproducto que representa un gran valor como vector energético, producido a partir de la fuente primaria que es el hidrógeno. De acuerdo con los usos y aprovechamientos actuales, su principal desarrollo se da en la industria petroquímica, a partir de fuentes de combustibles fósiles como el gas natural.

4.2 Proceso de obtención del amoníaco por Haber-Bosch

El proceso Haber-Bosch es el método industrial más utilizado para la producción de amoníaco (NH_3). Se basa en la reacción directa entre nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2):



Donde:

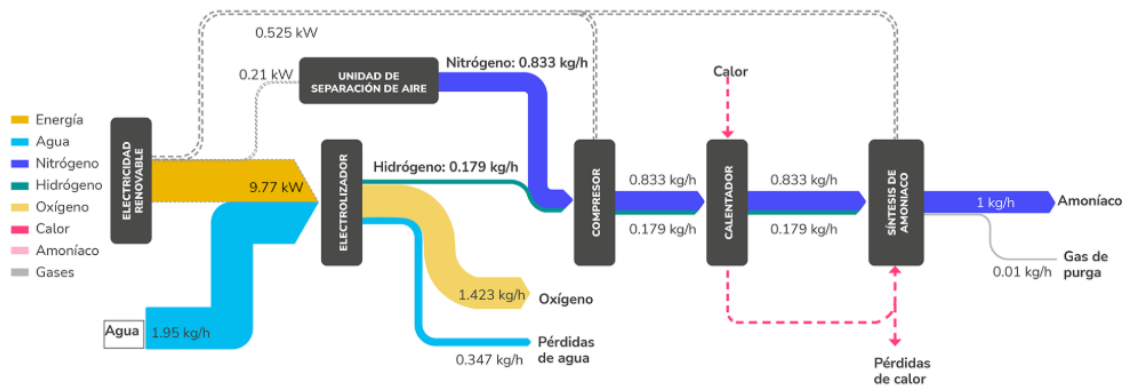
- $\text{N}_2(g)$ = nitrógeno en estado gaseoso, proveniente del aire.
- $\text{H}_2(g)$ = hidrógeno en estado gaseoso, obtenido por reformado de gas natural o electrólisis del agua.
- $\text{NH}_3(g)$ = amoníaco gaseoso producido.
- $\Delta H = -92 \text{ kJ/mol}$ = la reacción es exotérmica, libera calor.

El símbolo de equilibrio $\rightleftharpoons$ indica que la reacción es reversible: no todo el nitrógeno e hidrógeno se transforma en una sola pasada, por lo que el gas no reaccionado se recicla para mejorar la eficiencia.

A continuación, se presenta en la Figura 6 la descripción gráfica del proceso para la obtención del amoníaco a partir del proceso Haber-Bosch.

Figura 6

Proceso de síntesis de amoníaco por Haber–Bosch.



Nota. Adaptado de *Proceso de síntesis de amoníaco por Haber–Bosch*, de Ecosistema H2 Colombia, 2023, <https://www.minenergia.gov.co/es/ecosistema-hidrogeno-colombia/h2-en-colombia/cadena-de-valor/conversion-uso-final/>.

Dado que la fuente para la obtención del amoníaco es el hidrógeno, también se tiene una categorización de colores que se enmarcan en la cantidad emisiones de CO₂ que se generan durante el proceso. Actualmente existen las siguientes categorías estandarizadas por International Renewable Energy Agency (IRENA) en el documento publicado por la biblioteca Olade (IRENA & OLADE, Green Hydrogen a Guide to Policy Making: Different Shades of Hydrogen, 2020, pág. 8, 9).

4.3 Descripción del amoníaco de acuerdo con la producción de GEI

El amoníaco suele clasificarse por colores para hacerlo más fácil de entender, cada color indica cómo se produjo y cuántas emisiones genera esa ruta. A continuación, mencionaremos los diferentes tipos de amoníaco. Esta clasificación ayuda a comparar opciones en términos de huella de carbono y a orientar decisiones técnicas y de política pública.

- **Amoníaco verde:** amoníaco que se produce a partir de hidrógeno obtenido mediante el proceso de electrólisis de agua que se alimenta de fuentes de energías renovables (solar, eólica, o cualquiera otra).

- **Amoniac azul:** amoniac que se produce a partir de hidrógeno obtenido mediante el procesamiento de combustibles fósiles como gas natural, aplicando la captura y almacenamiento de CO₂ (CCS), reduciendo el impacto por emisiones asociadas al proceso.
- **Amoniac Gris:** amoniac que se produce a partir de hidrógeno obtenido mediante el procesamiento de combustibles fósiles como gas natural, sin ningún tipo de tratamiento enfocado en la captura y almacenamiento de CO₂, como por ejemplo el reformado de gas metano SMR adicionando el proceso Haber-Bosch, emitiendo todo el CO₂ producido a la atmósfera.

4.4 Emisiones por producción de amoniac según la fuente

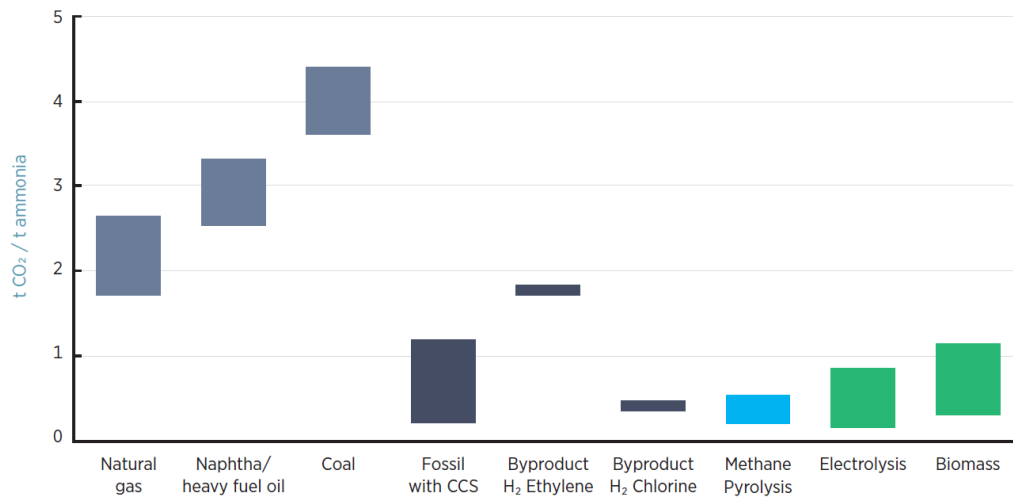
La producción de amoniac trae asociada consigo la emisión de GEI, y como se mencionó antes, la principal fuente de producción actualmente es el Reformado con Vapor de Gas Natural (SMR). Esto quiere decir según los datos estadísticos que se tienen, que por cada tonelada de amoniac que se produce a partir de este proceso, se generan entre 1,7 y un poco más de 2,5 toneladas de CO₂, lo cual lo pone entre los tres procesos de mayor emisión de GEI seguido del Nafta y el Carbón respectivamente.

Por otra parte, podemos encontrar procesos mucho más limpios que una reducción significativa en cuanto a la producción de GEI, como la electrólisis de agua o la biomasa los cuales están en un rango entre 0,2 y 1,2 toneladas de GEI por cada tonelada de amoniac producida. (IRENA & AEA, Innovation Outlook: Renewable Ammonia, 2022)

A continuación, en la Figura 7 se presentan los valores de toneladas de CO₂ por cada tonelada de amoniac producida, de acuerdo con la fuente de generación de hidrógeno y las emisiones asociadas a cada uno de estos procesos.

Figura 7

Rangos de emisión de GEI del amoníaco según su fuente de producción.



Nota. La figura presenta valores con desviación estándar, y fueron tomados de diferentes referencias literarias, basados en diferentes metodologías y asunciones limitadas.

Tomado de Innovation Outlook: Renewable Ammonia, 2022 (p.72), por IRENA & AEA.

Para Colombia es especialmente importante la producción de amoníaco, dado que es considerado un país agrícola y que a la fecha se importan cerca de 50, 000 toneladas de este producto para la elaboración de fertilizantes según datos de la alcaldía de la ciudad de Barranquilla en asociación con la empresa colombo-venezolana Monómeros. (Alcaldía de Barranquilla, 2022).

Capítulo 5. Estrategia regulatoria, técnica y ambiental para la reconversión del propano ducto

Este capítulo desarrolla la estrategia regulatoria, técnica y ambiental necesaria para viabilizar el proyecto, abordando la adecuación del marco normativo de la CREG, los requerimientos de seguridad e integridad mecánica, así como las adaptaciones ambientales que garanticen una operación segura, sostenible y alineada con los compromisos nacionales de descarbonización. Se plantean principios regulatorios, fases de implementación, criterios técnicos de aptitud y planes de manejo ambiental, con el propósito de establecer un modelo integral que permita transformar un activo existente en un elemento clave de la nueva economía del hidrógeno en el país.

5.1 Propuesta de estructura regulatoria para la CREG

La transición energética en Colombia demanda la adecuación de su infraestructura de transporte energético para incorporar vectores limpios y derivados del hidrógeno. Entre estos, el amoníaco verde se perfila como una opción estratégica por su densidad energética, su facilidad de almacenamiento y su creciente proyección como commodity en los mercados internacionales (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022). En este contexto, el propanoducto Salgar-Mansilla-Vista Hermosa, actualmente concebido para el transporte de gas licuado del petróleo (GLP), constituye un activo con potencial para ser reconvertido en un ducto dedicado al transporte de amoníaco verde. Para materializar esta transformación, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) debe establecer un marco regulatorio habilitante que contemple los aspectos técnicos, económicos y de certificación, garantizando coherencia con la Estrategia Nacional de Hidrógeno y los compromisos de descarbonización del país (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

5.1.1 Principios regulatorios

La propuesta regulatoria debe sustentarse en cuatro principios orientadores:

- **Neutralidad tecnológica:** inclusión explícita de los derivados del hidrógeno en el ámbito regulado.

- **Seguridad y confiabilidad:** aplicación de normas técnicas que minimicen riesgos ambientales y para la salud.
- **Eficiencia económica y acceso abierto:** garantizar que la infraestructura pueda ser utilizada de manera competitiva y transparente.
- **Alineación con la transición energética:** asegurar que el ducto contribuya al cumplimiento de metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

5.1.2 Ampliación del alcance regulatorio

El marco regulatorio de la CREG, diseñado principalmente para gas natural y GLP, requiere ser actualizado para incorporar explícitamente el transporte de portadores líquidos de hidrógeno. Ello implica:

- Definir la categoría de ductos dedicados a derivados del hidrógeno, dentro de la cual se incluiría el transporte de amoníaco verde.
- Establecer un procedimiento de conversión de ductos existentes, que contemple estudios de compatibilidad de materiales, pruebas de integridad, actualización de sistemas de seguridad y licenciamiento ambiental.

5.1.3 Requisitos técnicos y de seguridad

El transporte de amoníaco exige estándares diferenciados frente al GLP, debido a su toxicidad y a los riesgos de corrosión. En consecuencia, la regulación debe:

- Adoptar normas internacionales aplicables al transporte de amoníaco (por ejemplo, ISO 31000, DNV-RP-F107 y ASTM A350).
- Exigir sistemas de supervisión y control (SCADA), válvulas de cierre automático, sensores de detección de fugas y planes de contingencia coordinados con las autoridades locales.
- Definir programas de inspección periódica (Ili, pigging, pruebas hidrostáticas y monitoreo de corrosión) que garanticen la integridad de la infraestructura.

5.1.4 Régimen tarifario y acceso

Se recomienda establecer un esquema tarifario que combine recuperación de inversiones con sostenibilidad operativa:

- Cargo fijo por disponibilidad de capacidad, que cubra los costos de operación y mantenimiento.
- Cargo variable por tonelada-kilómetro transportado, vinculado a los volúmenes efectivamente movilizados.

La asignación de capacidad debería realizarse mediante mecanismos competitivos, tales como subastas periódicas, con diferenciación entre contratos firmes de largo plazo y capacidad interrumpible para usuarios spot (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2022).

5.1.5 Medición y certificación verde

El ducto debe integrarse a un esquema de medición, reporte y verificación (MRV) que asegure la trazabilidad del origen renovable del amoníaco transportado. Esto requiere:

- Sistemas de medición fiscal en puntos de entrada y salida.
- Registro electrónico del origen renovable, avalado por certificadores independientes.
- Integración con los mecanismos nacionales de certificación de hidrógeno y derivados (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

5.1.6 Gobernanza e institucionalidad

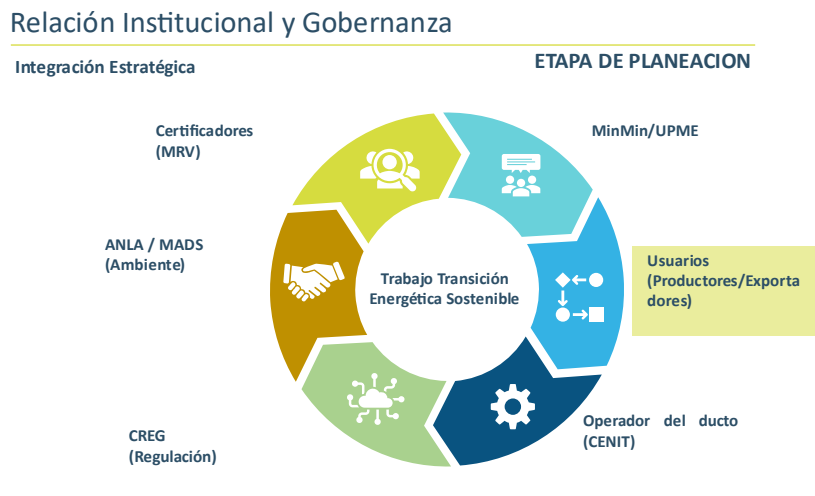
La operación del ducto exige coordinación interinstitucional en varios niveles:

- CREG: regulador técnico y económico.
- Ministerio de Minas y Energía: responsable de la política sectorial y de la alineación con la Estrategia Nacional de Hidrógeno.
- Autoridades ambientales (ANLA y CAR): encargadas del licenciamiento y del control ambiental.
- Operador del ducto: responsable de la operación segura y del reporte de indicadores.
- Certificadores y auditores: garantes del MRV y del carácter renovable del producto.

La Figura 8 ilustración la relación institucional y de gobernanza que se debe lograr para realizar adecuadamente integración del sistema de transporte para que se logre la financiación por intermedio de la CREC.

Figura 8

Esquema de Relación Institucional y Gobernanza.



5.1.7 Fases de implementación

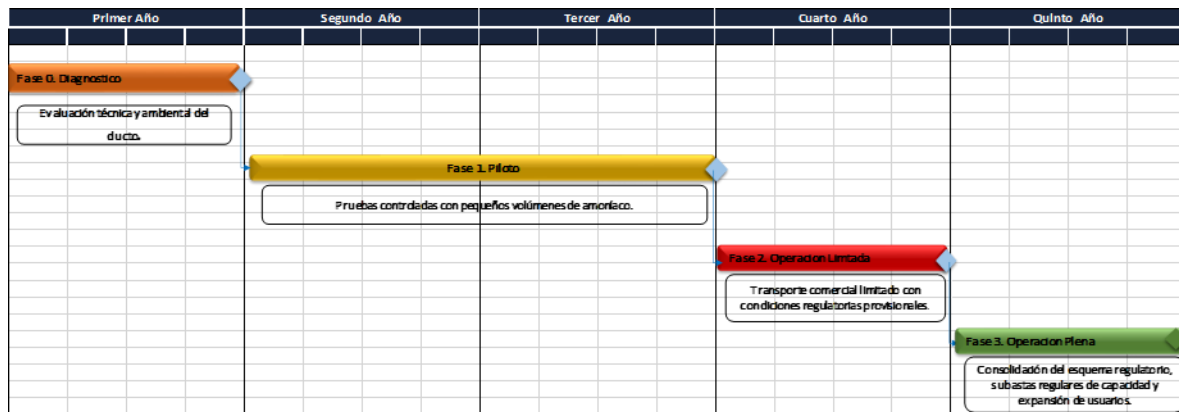
Para mitigar riesgos y garantizar viabilidad, se propone un esquema de implementación gradual:

- Fase 0 – Diagnóstico: evaluación técnica y ambiental del ducto.
- Fase 1 – Piloto: pruebas controladas con pequeños volúmenes de amoníaco.
- Fase 2 – Operación inicial: transporte comercial limitado con condiciones regulatorias provisionales.
- Fase 3 – Operación plena: consolidación del esquema regulatorio, subastas regulares de capacidad y expansión de usuarios.

La Figura 9 ilustra mediante un PMT las fases de implementación que se deben realizar para lograr el objetivo de la estrategia.

Figura 9

Fases de Implementación.



5.2 Requerimientos técnicos para la reconversión del propano ducto

El objetivo es determinar la aptitud para servicio del propano ducto ante uso de amoníaco y entregar un paquete técnico con: evaluación de condición, análisis de riesgos (incluyendo aspectos de toxicidad/dispersiones propias del amoníaco), lista de reparaciones / mitigaciones necesarias y recomendaciones de adaptación operacional y de seguridad.

5.2.1 Fase A — Preparación y alcance (entregable: Documento de Alcance y Plan de Proyecto)

- Revisión documental: planos as-built, especificaciones de tubería (material, espesor, año de fabricación), historial de operación y mantenimiento, registros de ILI previas, resultados de pruebas hidrostáticas y reportes de eventos. (Apoyarse en la guía de integridad para priorización de datos).
- Identificación de requisitos regulatorios y normas aplicables (ASME, API, normas colombianas aplicables a transporte de fluidos y sustancias peligrosas).
- Definición del alcance físico (tramos, estaciones, cruces críticos, pasos elevados, tramos con historial de daños o parches).
- Planificación logística y seguridad para actividades de inspección y muestreo.

Entregable: Plan de Proyecto + Matriz de riesgos inicial y lista de documentación requerida.

5.2.2 Fase B — Recolección de datos e inspecciones no intrusivas (entregables: dataset ILI, informe de sensores)

Actividades principales:

1. **Evaluación ILI disponible:** recopilar y revisar corridas MFL/UT/Caliper previas; validar calidad de datos. Si no existe corrida adecuada, preparar especificación técnica para contratación de corrida ILI (definir tipo de herramienta: MFL para pérdidas de metal, UT/EC para grietas/agrietamiento según historial y diámetro). La selección de ILI debe considerar material, diámetro, condición operativa y tipo de defecto esperado.
2. **Monitoreo en línea y sensores:** revisar/iniciar monitoreo de presión, temperatura, detección de fugas (acústico/fibra), vibración y monitoreo CP (protección catódica).
3. **Inspección aérea y de DDV:** lidar/drone para detectar asentamientos, daños en derecho de vía, actividades de terceros y cambios ambientales (geoamenazas).

Entregables: Paquete de datos ILI limpio, informe de monitoreo y mapas geoespaciales con puntos de interés.

5.2.3 Fase C — Inspección de campo y verificación (entregables: registros de excavaciones y ensayos)

- **Excavaciones de verificación** en indicaciones críticas (taps, parches, abolladuras) detectadas por ILI. Registrar condición geométrica, recubrimiento y estado de soldaduras.
- **Ensayos no destructivos (END):** UT (medición espesor), examen visual (VT), partículas magnéticas o líquidos penetrantes en soldaduras, radiografía si aplica.
- **Muestreo y pruebas de material:** química del acero, características mecánicas (tensión, dureza) si se sospecha envejecimiento o que el material no cumple SMYS requerido.
- **Pruebas de CP:** potenciales, interrupciones, medición de corriente y condición de ánodos.

- **Pruebas hidrostáticas o pruebas específicas** (solo si el método y seguridad lo permiten): revisión de viabilidad y especificación de procedimiento seguro para líquido diferente (amoníaco tiene propiedades propias; ver consideración de compatibilidad).

Entregables: Informes de excavación con fotografías, fichas END y resultados de laboratorio.

5.2.4 Fase D — Análisis técnico de integridad (entregables: informe técnico de aptitud y FFS)

- **Evaluación de pérdidas de espesor y degradación:** comparar contra criterios de aceptación (API/ASME y criterios internos).
- **Análisis de agrietamiento:** evaluar susceptibilidad a fatiga, corrosión-fatiga y SCC; aplicar metodologías de valoración de grietas.
- **Aptitud para el servicio (Fitness-for-Service):** aplicar criterios FFS (por ejemplo, BS 7910 / API 579 si procede) para indicaciones mecánicas críticas (parches, abolladuras, laminaciones).
- **Revisión de barreras de mitigación:** recubrimientos, CP, profundidad de recubrimiento (min. recomendado para amoníaco por diseño seguro), protecciones mecánicas en cruces, bloqueo de inventario.

Entregable: Informe FFS por tramo con criterio de acción (aceptable/acceptable con monitoreo/reparación inmediata/repaso).

5.2.5 Fase E — Evaluación de riesgos específicos por servicio de amoníaco (entregables: QRA preliminar y mapa de contornos)

- Realizar **QRA / modelamiento de efectos** por liberación de amoníaco (dispersiones tóxicas, distancias de impacto, escenarios de ruptura vs fugas menores). Usar las mejores prácticas y modelos validados (ej.: SAFETI y parámetros químicos del amoníaco). El estudio ISPT/DNV debe guiar criterios de diseño de mitigación (segmentación, ESD, minimización de inventario, recubrimientos y profundidad de enterramiento).

- Evaluar **riesgo social y regulatorio**: identificar áreas pobladas, estaciones sensibles (hospitales, escuelas) a lo largo del trazado y superponer contornos de riesgo.

Entregables: QRA preliminar con contornos de afectación, lista de medidas de mitigación priorizadas.

5.2.6 Fase F — Plan de reparaciones y adaptación operativa (entregables: Plan de conservación e inversión)

- Definición de **paquetes de reparación** por prioridad (parcheo, reemplazo de tramos, reparación de soldaduras, remoción de parches múltiples). Incluir criterios de activación (ej. hoop stress > 60% para parches según guía).
- Recomendaciones de **modificaciones de diseño** para amoníaco: segmentación con ESD, reducción de inventario por trayecto, estaciones de bombeo/booster y estaciones de válvulas con distancias de separación apropiadas (basado en ISPT).
- Plan de **monitoreo continuo** (ILI periódico, sensores, vigilancia DDV, CP) y actualización del PCA (Plan de Conservación del Activo).

Entregable: Plan de reparaciones, presupuesto de referencia y lista de acciones de gestión.

5.2.7 Fase G — Informe final y entrega (entregable: Informe ejecutivo y técnico + anexos)

- Informe ejecutivo que resuma: estado actual, conclusiones de aptitud para servicio por tramo, riesgos críticos para operación con amoníaco, decisiones recomendadas (permitir conversión, conversión con obras, no apto), plan de intervención y lista de requisitos regulatorios/operacionales.
- Anexos técnicos: datos ILI, END, resultados de laboratorio, modelos de QRA, hojas de cálculo de FFS.
- **Registro de lecciones y recomendaciones de gestión de cambio** (capacitaciones, procedimientos de emergencia, actualización de planes de respuesta).

5.2.8 Equipo mínimo recomendado y roles

- Líder proyecto / integridad (coordinación).
- Ingeniero de Integridad Mecánica (FFS, análisis ILI).
- Especialista ILI y END (especificación y supervisión de corridas y END).
- Ingeniero de Riesgos / QRA (modelado de amoniaco).
- Geotécnico / topógrafo (derecho de vía y geoamenazas).
- Técnicos de campo / excavación (excavaciones de verificación).
- Laboratorio acreditado para ensayos mecánicos y química.

5.2.9 Criterios de aceptación / “stop gates”

- Datos ILI y END con calidad verificable y trazable.
- Para cada indicación crítica, existir criterio FFS documentado con resultado (aceptable / acción).
- QRA que demuestre que, con las medidas propuestas, contornos de riesgo cumplen normativa aplicable y criterios de protección de terceros (si no, se requieren medidas adicionales).

5.2.10 Riesgos y consideraciones técnicas especiales (resumen)

- **Compatibilidad química y operativa:** amoniaco (anhidro) es tóxico y corrosivo para ciertos materiales; revisar compatibilidad de recubrimientos, juntas y sellos.
- **Inventario y presión de diseño:** el dimensionamiento, segmentación y presión de operación influyen fuertemente en distancias de riesgo — la reducción de inventario (segmentación) es una medida de diseño clave.
- **Validación de modelos de dispersión:** alta incertidumbre en grandes liberaciones; validar supuestos con ensayos o modelos reconocidos.

5.2.11 Entregables finales (lista concreta)

1. Documento de Alcance y Plan de Proyecto.
2. Paquete de datos ILI y resultados de monitoreo.
3. Informes de excavaciones y END.
4. Informe FFS (por tramo).

5. QRA / mapa de contornos de riesgo para amoníaco.
6. Plan de reparaciones y PCA actualizado.
7. Informe ejecutivo con decisión técnica (convertible / convertible con obras / no convertible).

La Figura 10 ilustra las fases necesarias para el logro del diagnóstico de la integridad mecánica del sistema de transporte.

Figura 10

Diagnóstico de Integridad Mecánica.

Diagnóstico de Integridad Mecánica

Plan de Trabajo	
• Fase A — Preparación y alcance (entregable: Documento de Alcance y Plan de Proyecto)	🟡
• Fase B — Recolección de datos e inspecciones no intrusivas (entregables: dataset ILI, informe de sensores)	🟡
• Fase C — Inspección de campo y verificación (entregables: registros de excavaciones y ensayos)	🟡
• Fase D — Análisis técnico de integridad (entregables: informe técnico de aptitud y FFS)	🟡
• Fase E — Evaluación de riesgos específicos por servicio de amoníaco (entregables: QRA preliminar y mapa de contornos)	🟡
• Fase F — Plan de reparaciones y adaptación operativa (entregables: Plan de conservación e inversión)	🟡
• Fase G — Informe final y entrega (entregable: Informe ejecutivo y técnico + anexos)	🟡

ETAPA DE DIAGNÓSTICO



5.3 Requerimientos ambientales

Este trabajo analiza los requerimientos ambientales necesarios para reconvertir el Sistema de Transporte Puerto Salgar–Mansilla – Vista Hermosa, originalmente diseñado para propano, en un sistema para el almacenamiento y transporte de amoníaco. Se describen los ajustes al Plan de Manejo Ambiental (PMA), el Plan de Monitoreo y Seguimiento (PMS), el Estudio de Riesgo Tecnológico y el Plan de Contingencia, conforme a la normativa colombiana vigente.

5.3.1 Análisis de requerimientos ambientales

La reconversión de un propano ducto a amoníaco ducto implica transformaciones técnicas y regulatorias significativas. El amoníaco anhidro presenta mayor toxicidad, corrosividad y solubilidad en agua que el propano, lo que aumenta los riesgos para la salud humana y los ecosistemas (Propuesta de Modificación de Licencia Ambiental, 2024)

Este documento identifica los requisitos ambientales y normativos que respaldan la modificación de la Licencia Ambiental del proyecto Puerto Salgar-Bogotá.

5.3.2 Marco Normativo

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) regula el proceso bajo la Resolución 0824 de 2013 y sus actos modificatorios (Resolución 1553/2014, Auto 5705/2014 y Auto 4524/2019)

Adicionalmente, se aplican la Resolución 1770 de 2013 para el Estudio de Riesgo Tecnológico y el Decreto 1076 de 2015, que compila el sector ambiental.

5.3.3 Requerimientos Ambientales

5.3.3.1 Plan de Manejo Ambiental (PMA)

Se requieren ajustes en los componentes abiótico, biótico y socioeconómico.

- **Medio abiótico:** control de derrames, monitoreo continuo de amoníaco en aire, agua y suelo, y refuerzo de obras de protección en cruces hídricos
- **Medio biótico:** protocolos de rescate de fauna y revegetalización con barreras naturales que actúen como biofiltros
- **Socioeconómico:** campañas de sensibilización comunitaria, actualización de planes de reasentamiento y simulacros de emergencia

5.3.3.2 Plan de Monitoreo y Seguimiento (PMS)

Incluye estaciones de detección en tiempo real de NH_3 , medición de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales y subterráneas, y monitoreo de percepción de riesgo en comunidades aledañas

5.3.3.3 Estudio de Riesgo Tecnológico

Debe aplicarse un análisis HAZOP y modelar escenarios de fuga para evaluar dispersión atmosférica, afectación hídrica y del suelo, según la Resolución 1770 de 2013

5.3.3.4 Plan de Contingencia y Gestión del Riesgo

Se incorpora un plan de evacuación y confinamiento, equipos de protección respiratoria para brigadas de respuesta, y coordinación con UNGRD, Bomberos y hospitales

5.3.3.5 Estrategia de Socialización

Se prevén talleres de información, retroalimentación con comunidades locales y coordinación con autoridades municipales, a fin de fortalecer la gestión del riesgo y la comunicación del proyecto

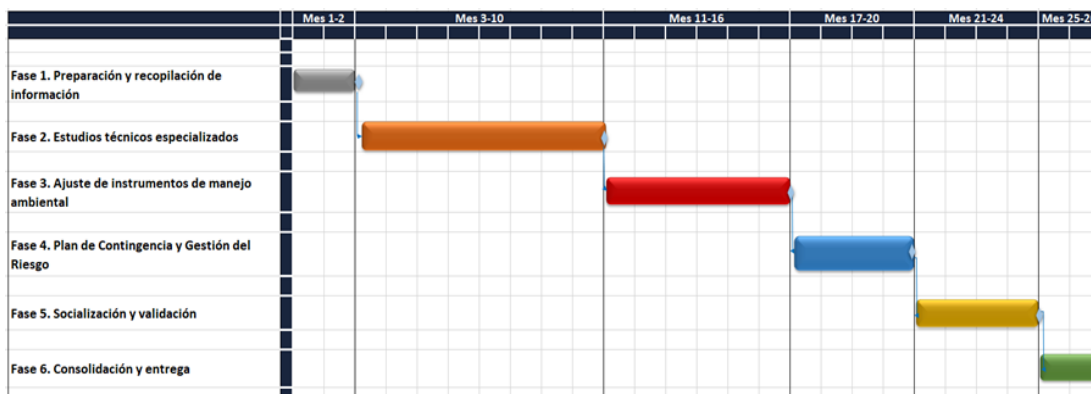
5.3.3.6 Cronograma de Implementación

La ejecución total se estima en 26 meses: dos meses de preparación, ocho de estudios técnicos, seis de ajustes a instrumentos de manejo ambiental, cuatro de plan de contingencia, cuatro de socialización y dos de consolidación y entrega.

La Figura 11 es la representación del PMT necesario para el logro de la modificación la licencia ambiental.

Figura 11

Cronograma Tentativo – Estudios de Soporte para la Modificación de la Licencia Ambiental. 26 meses.



Capítulo 6. Desarrollo técnico

En este capítulo se describe de manera detallada el desarrollo técnico del proyecto, desde la definición de las bases de diseño hasta la estimación del comportamiento energético del sistema. Se explican los procesos que permiten la producción de amoníaco verde a partir de energía solar, agua y aire, incluyendo la obtención de hidrógeno mediante electrólisis PEM y su posterior conversión en amoníaco por el proceso Haber-Bosch. Asimismo, se analizan las condiciones de transporte del fluido a través del ducto principal y las estaciones de bombeo, con sus respectivos cálculos hidráulicos y energéticos. Finalmente, se evalúa el potencial del sistema para autoabastecer parte de su propia demanda de energía y se compara la energía total transportada con el consumo actual de combustibles fósiles en Bogotá. Este apartado busca demostrar la factibilidad técnica y el impacto positivo del proyecto dentro del contexto de la transición energética hacia fuentes limpias y sostenibles.

6.1 Bases y Criterios de diseño

Estas son las bases y criterios de diseño que se establecieron para abordar de manera adecuada la fabricación, transporte al almacenamiento de Amoniaco Verde.

6.1.1 Bases de diseño

1. Materia prima principal

- a. Agua tratada para electrólisis.
- b. Electricidad proveniente de un parque solar.
- c. Aire como fuente de nitrógeno.

2. Tecnología de conversión

- a. **Electrolizador PEM** para producción de hidrógeno.
- b. **Proceso Haber-Bosch** para la síntesis de amoníaco.

3. Capacidad de producción y almacenamiento

- a. Almacenamiento primario de amoníaco líquido: **14,4 KBD (miles de barriles por día)**.
- b. Transporte mediante **ducto de 8 pulgadas** con **3 estaciones de bombeo**.

- c. Almacenamiento final en tanques a presión de la misma capacidad (14,4 KBD).

4. Distribución y logística

- a. Transporte interno por camiones cisterna especializados.
- b. Conexión a infraestructura de ductos para transporte a mayores distancias.

5. Usos finales contemplados

- a. Transporte pesado (camiones).
- b. Combustible para aviación.
- c. Generación eléctrica.
- d. Fertilizantes.
- e. Industria química.

6.1.2 Criterios de diseño

1. Energía y sostenibilidad

- a. Uso exclusivo de electricidad renovable (solar) → producción de hidrógeno verde.
- b. Balance energético suficiente para garantizar operación continua.

2. Seguridad y normatividad

- a. Diseño de tanques y ductos conforme a normas internacionales (API, ASME, NFPA, NACE) para almacenamiento y transporte de NH_3 .
- b. Implementación de sistemas de detección y mitigación de fugas.
- c. Cumplimiento de regulaciones ambientales y de transporte de sustancias peligrosas.

3. Operación del sistema de ductos

- a. Diámetro de 8" calculado para la capacidad de transporte requerida.
- b. Tres estaciones de bombeo para mantener presión y flujo constantes.

4. Almacenamiento

- a. Tanques a presión diseñados para mantener amoníaco en fase líquida.
- b. Capacidad de 14,4 KBD como base para dimensionamiento del sistema.
- c. Consideración de redundancia y seguridad (tanques múltiples).

5. Flexibilidad y demanda

- a. Escalabilidad del sistema para distintos mercados (energía, transporte, fertilizantes, industria química).
- b. Capacidad de transporte multimodal: ducto + camión.

6. Ambientales y sociales

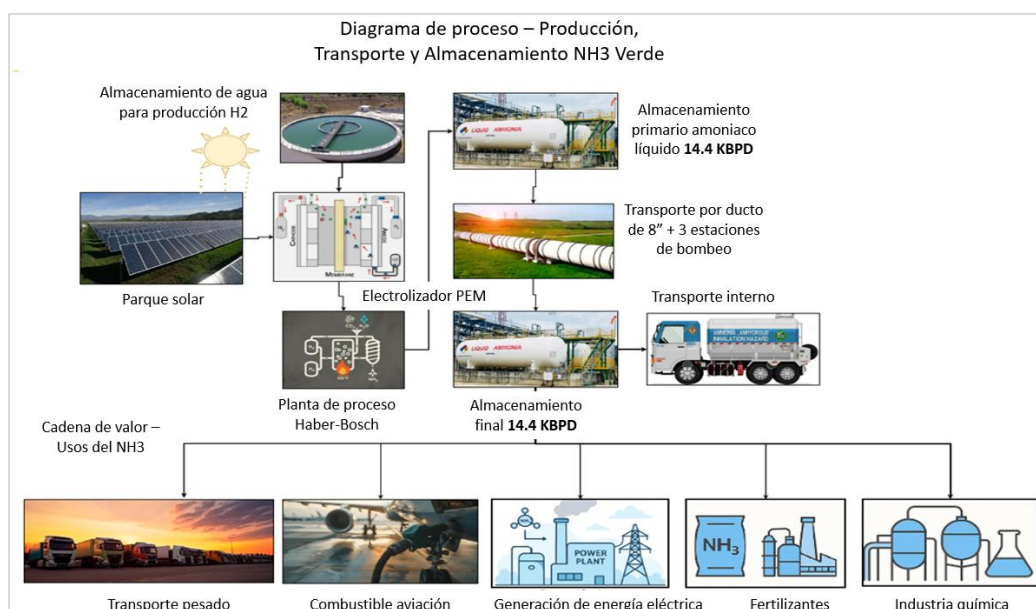
- a. Uso eficiente del agua del sistema de tratamiento.
- b. Disminución de emisiones al reemplazar combustibles fósiles por amoníaco verde.
- c. Aporte a la transición energética nacional e internacional.

6.2 Diagrama de proceso

La Figura 12 ilustra el proceso integral de producción, transporte y almacenamiento de amoníaco verde (NH_3). A partir de energía solar y agua, mediante electrólisis PEM se obtiene hidrógeno verde, que posteriormente se combina con nitrógeno en la planta Haber-Bosch para sintetizar amoníaco. Este producto se almacena en tanques primarios, se transporta por ductos con estaciones de bombeo y, finalmente, llega a su destino para almacenamiento y distribución. El amoníaco verde puede emplearse en múltiples sectores estratégicos, incluyendo transporte pesado, combustibles para aviación, generación de energía, fertilizantes e industria química.

Figura 12

Diagrama del proceso descriptivo de obtención, transporte y despacho de hidrogeno verde.



6.4 Cálculos y resultados por sistema

6.4.1 Energía solar fotovoltaica

A continuación, se relaciona los datos iniciales requeridos por medio de la Tabla 2, para realizar el cálculo de energía para la generación de hidrogeno y amoniaco verde.

Tabla 2

Parámetros base para el cálculo de energía en la producción de hidrógeno y amoníaco verde.

Capacidad nominal	14,4	KBbls
Reducción	80%	
Capacidad actual	11,5	KBbls
Conversión Bbls a L		
1	Bbls	158,9 L
Densidad de NH₃	20	°C
0,6	kg/L	
Masa molar		
H₂	2,015	g/mol
NH₃	17,030	g/mol
Producción de energía		
52	kWh/kg	H ₂

Con la información anterior, se procede hacer los respectivos cálculos como se muestra en la Tabla 3, con el fin saber la potencia inicial para la producción de H₂ y hacer la respectiva simulación en PVsyst para obtener el área de terreno, y los equipos requeridos para hacer la planta solar.

Tabla 3

Resultados del cálculo energético y potencia requerida para la producción de H₂ y NH₃ verde.

Transporte en t/día de NH ₃	
1117,2	t/día
Razón másica H ₂ /NH ₃	0,1776
198,37	t/día de H ₂
Producción de energía	
10,32	GWh/día
Potencia eléctrica (24/7)	
429,8	MW

Los respectivos cálculos para obtener los resultados anteriores estarán en el anexo 4 del presente documento.

6.4.2 Producción H₂

De acuerdo con la Tabla 3, se estima tener una potencia eléctrica de 429,8 MW, con base al dato anterior, se hace un estudio en referencias comerciales para selección del electrolizador de tecnología PEM, en la Tabla 4, se muestra un cuadro comparativo entre varios equipos que pueden ser funcionales en base al presente proyecto.

Tabla 4

Comparativo técnico de electrolizadores de tecnología PEM para producción de hidrógeno verde.

Descripción	Siemens Energy Silyzer 300	Cummins HyLYZER- 1000	Nel MC-500 (M-Series)
Tecnología	PEM	PEM	PEM

Descripción	Siemens Energy Silyzer 300	Cummins HyLYZER- 1000	Nel MC-500 (M-Series)
Producción [kg H ₂ /h]	335	89,9	44,2
Potencia [MW]	17,50	4,58	2,35
Agua DI [L/kg H ₂]	10	9	10
Presión de entrega H ₂	Personalizada (se acopla)	30 barg	> 30 barg
Pureza H ₂	99,9999% (DeOxo)	99,99% (Secco)	99,9995% (Secador de alta pureza)
Rangos de operación	Arranque <1 min	5–125 %	10–100 %
Dimensiones [m]	15x7,5x3,5	Electrolizador: 8,4x2,3 Rectificador: 4,5x2,5	Electrolizador: 12,2x2,5x3 Rectificador: 6,1x2,5x2,6
Peso [t]	–	19,9	35,9
Refrigeración	Aire/Agua Eficiencia HHV > 75%	Requiere agua enfriamiento < 2.500 L/min (T < 10 °C)	Unidad térmica/aire
Unidades Necesarias (> 8.269 kg/h)	25	93	187
Potencia instalada aprox [MW]	437,50	425,94	439,45
Huella equipos PEM (Con pasillos) [m ²]	3656	3696	11122

Con el fin de dar el alcance técnico el equipo que cumple con las mejores especificaciones y adaptable al proyecto es el Siemens Energy Silyzer 300 debido a su alta producción,

presión de entrega de H₂ y los equipos necesarios evita la logística y se puede reducir significativamente el mantenimiento de estos.

6.4.3 Producción NH₃

Al igual que el anterior ítem, se hace una revisión de referencias comerciales en tecnología Haber-Bosh con el fin de seleccionar el equipo más adecuado en base los cálculos previos relacionados en la Tabla 2. En la Tabla 5, se relaciona el cuadro comparativo de los equipos que pueden adaptarse al proyecto.

Tabla 5

Comparativo técnico de plantas de síntesis de amoníaco con tecnología Haber-Bosch para producción verde (NH₃).

Descripción	Topsoe – Green Ammonia	Thyssenkrupp Uhde – Green Ammonia / uhde®	KBR – Ammonia 6000® / Purifier™
Tipo/entrega	ModuLite: 300 a 600 MTPD Stick-Built: 600 A 5.000 MTPD	Planta verde integrada agua- aire- electricidad Small: 200 a 500 MTPD Large: 500 a 4.500 MTPD	Tecnología Purifier – Single train hasta 6.000 MTPD
Cumple Capacidad en tren (1.117 t/d)	Si, para Stick-Built	Si para Large	Si con la Tecnología Purifier
Condiciones de operación	350 a 500 °C 150 a 300 bar, con	350 a 500 °C 150 a 300 bar	Optimiza pureza del make-up y

Descripción	Topsoe – Green Ammonia	Thyssenkrupp Uhde – Green Ammonia / uhde®	KBR – Ammonia 6000® / Purifier™
	reciclo Operación dinámica en lazo para renovables		purgas para lazo eficiente.
Consumo energético por lazo	0,32 a 0,64 MWh/t NH ₃ 20,5 MW		
Integración con H ₂ electrolítico	Paquetes end-to-end y lazo dinámico; referencias con integración SOEC/loop	Planta verde “solo agua, aire y electricidad”; integra cualquier tecnología de electrólisis	Provee lazo y know-how; para green se usa H ₂ +N ₂ (ASU) y se omite reformado
Dimensionamiento /huella	ModuLite: Módulos en obra civil reducido Stick-Built: Huella proyecto-específica	Se puede construir hasta 5.000 MTPD	Se define en la ingeniería de detalle
Fortalezas destacadas	ModuLite 300/600 MTPD	EPC + licenciamiento integrado; experiencia masiva y escalas grandes;	Alta eficiencia (brochure) y plot optimizado en grandes instalaciones.

Descripción	Topsoe – Green Ammonia	Thyssenkrupp Uhde – Green Ammonia / uhde®	KBR – Ammonia 6000® / Purifier™
		integración directa con electrólisis.	

En base la información dada anteriormente, el equipo que se puede acoplar funcionalmente en beneficio del proyecto es el Topsoe – Green Ammonia por su sistema integral, condiciones de operación y que su dimensionamiento este sujeto en la ingeniería de detalle con base a las condiciones del lugar.

6.4.4 Planta de tratamiento de agua

En la ubicación inicial de Puerto Salgar, pasa el rio Magdalena y del cual se hará toma del caudal para la planta de tratamiento, el electrolizador PEM, el Haber–Bosh y el sistema de enfriamiento, en la Tabla 6, se muestra los consumos estimados para la planta.

Tabla 6

Estimación del consumo de agua para la operación de la planta de tratamiento, electrólisis PEM y sistema Haber–Bosch en Puerto Salgar.

Uso	Diario (m³/d)	Mensual (m³/mes)	Anual (m³/año)
Agua DI al stack PEM (10 L/kg–H ₂)	1984,71	59541,00	724420,00
Agua cruda a PTAP (para esa DI, 90 %)	2205,24	66157	804911

Uso	Diario (m ³ /d)	Mensual (m ³ /mes)	Anual (m ³ /año)
Rechazo RO/EDI (informativo)	22052	6616	80491
NH ₃ /utilidades (1,3 m ³ /t)	1453,07	43592	530371
Enfriamiento (make-up, torre)	4173,46	125204	1523313
TOTAL agua cruda a planta (PTAP + NH₃ + enfriamiento)	7831,77	234953	2858595

Según el portal hidrometeorológico de DHIME el caudal medio anual en el Rio Magdalena que pasa en Puerto Salgar es de 133.220.838,57 m³/día, esto quiere decir que de todo el caudal que pasa, solo se tomara el 2,15% del rio para el proyecto, lo cual es un consumo mínimo y que no afectara el ecosistema y la integridad del rio y facilitara para expedir la respectiva licencia ambiental.

6.4.5 Consumo energético sistema de bombeo NH₃

Para poder realizar el transporte del amoniaco líquido a través de ductos a presión se requiere cumplir con una serie de requisitos técnicos como por ejemplo que la presión en el sistema sea mayor a la presión de vaporización en este caso del amoniaco en estado líquido, esto se logra con la instalación de estaciones de bombeo que aseguran el caudal y la presión de operación en todo el trazado.

Para dimensionar estas estaciones se requiere realizar una serie de cálculos que nos mostraran parámetros como la potencia hidráulica, el consumo energético, y todas las

pérdidas asociadas al transporte del flujo necesarias para considerarlas al momento de la selección de los equipos que posteriormente necesitamos proyectar el consumo de energía ya que, se propone y pretende que parte del amoniaco transportado pueda auto alimentar estas estaciones logrando que el transporte del fluido sea de una manera verde. A continuación, se muestra el proceso de la memoria de cálculo con lo escrito anteriormente:

- Datos del fluido:

El fluido considerado para el transporte en el ducto es amoniaco (NH_3) en estado líquido, cuyas propiedades físicas y condiciones de operación son determinantes para el cálculo hidráulico y la selección de los equipos de bombeo. La Tabla 7 resume las propiedades utilizadas en los cálculos:

Tabla 7

Propiedades físicas y condiciones de operación del amoniaco líquido (NH_3).

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad	ρ	603	kg/m^3
Viscosidad dinámica	μ	0,000254	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Presión de vapor	Pvap	9,9	bar abs
Temperatura	T	25	$^{\circ}\text{C}$
Poder calorífico inferior	(PCI) del NH_3	18,6	MJ/Kg

Nota. Engineering ToolBox. (n.d.). *Carbon steel – material properties*.

https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-steel-material-properties-d_1405.html.

- Características del ducto y material de la tubería

El ducto considerado para el transporte de amoniaco está construido en acero API 5L X42, seleccionado por su resistencia mecánica, disponibilidad comercial y compatibilidad con aplicaciones de alta presión.

En la Tabla 8 se resumen las propiedades físicas y mecánicas del material, las cuales se utilizarán en la estimación de pérdidas de carga en función de la rugosidad interna.

Tabla 8

Propiedades mecánicas y físicas del material de la tubería (Acero API 5L X42, X52).

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Material	–	API 5L X42, X52	–
Límite de fluencia	σ_y	290	MPa
Resistencia a la tracción	σ_u	415	MPa
Módulo de elasticidad	E	200	MPa
Densidad	ρ	7850	kg/m ³
Coef. dilatación	α	12×10^{-6}	1/K
Rugosidad absoluta	E	$4,5 \times 10^{-5}$	m

Nota. Octal Steel. (n.d.). *API 5L Pipe Specification (Grades B-X70)*.

<https://www.octalsteel.com/resources/api-5l-pipe-specification/>.

- **Formulación general utilizada**

Para el análisis hidráulico del sistema de transporte de amoníaco se emplean las expresiones fundamentales de la mecánica de fluidos, las cuales permiten determinar los parámetros característicos de cada estación de bombeo. Estas fórmulas se aplican de manera general al ducto y luego se particularizan en cada tramo y estación, obteniendo la velocidad de flujo, régimen de operación, pérdidas por fricción y caídas de presión que determinan la carga total a vencer. Para mayores detalles, ver anexo 2 de este documento.

- **Cálculos hidráulicos por estación de bombeo**

Los resultados globales del análisis hidráulico permiten mostrar el comportamiento del amoníaco en el ducto de acuerdo con cada tramo analizado, considerando la velocidad

promedio alcanzada, el régimen de flujo predominante y las pérdidas de presión acumuladas a lo largo del trazado. Asimismo, se contrasta la presión de operación con la presión de vapor del fluido para verificar la seguridad del transporte.

Datos hidráulicos estación de bombeo Salgar–Albán:

En la Tabla 9, se sintetizan estos valores representativos para el tramo Salgar – Albán.

Tabla 9

Resumen Cálculos Hidráulicos en el tramo Salgar–Albán

Resumen de cálculos hidráulicos del ducto		
Promedio de velocidad	0,80	m/s
Reynolds > 4000 turbulento	Turbulento	
Δp (caída de presión)	117,72	bar
h_{tot} (carga hidráulica total)	1990,84	mca
Presión vapor amoníaco	9,90	bar
Presión de operación sistema	132	bar
Transporte seguro	$\Delta p_{total} < P_{op}$; pero $P_{op} > P_{vap}$	
Caudal total transportado	0,026498	m ³ /s
Temperatura	25	°C

Para garantizar el transporte continuo del amoníaco en estado líquido a lo largo del tramo Salgar–Albán, se adoptó una presión de operación del sistema de 132 bar. Este valor integra la carga hidráulica total calculada, asegura que la presión se mantenga siempre por encima de la presión de vapor del fluido y considera un margen adicional de seguridad frente a posibles variaciones de temperatura y condiciones operativas en el ducto.

Datos hidráulicos estación de bombeo Albán–Mansilla:

En la Tabla 10 se sintetizan estos valores representativos para el tramo Albán– Mansilla.

Tabla 10*Resumen Cálculos Hidráulicos en el tramo Albán–Mansilla*

Resumen de cálculos hidráulicos del ducto		
Promedio de velocidad	1,39	m/s
Reynolds > 4000 turbulento	Turbulento	
Δp (caída de presión)	49,69	Bar
h_{tot} (carga hidráulica total)	840,34	Mca
Presión vapor amoníaco	9,90	Bar
Presión de operación sistema	63	Bar
Trasnporte seguro	$\Delta p_{total} < P_{op}$; pero $P_{op} > P_{vap}$	
Caudal total transportado	0,026498	m ³ /s
Temperatura	25	°C

En este tramo, el comportamiento hidráulico del amoníaco se mantiene dentro de régimen turbulento, con una velocidad promedio estable y pérdidas de presión progresivas que contribuyen al incremento de la carga hidráulica total del sistema. La presión de operación adoptada continúa garantizando que el fluido permanezca en estado líquido, incluso considerando las variaciones de presión a lo largo del ducto.

Datos hidráulicos estación de bombeo Mansilla–Vista Hermosa:

En la Tabla 11 se sintetizan estos valores representativos para el tramo Mansilla–Vista Hermosa.

Tabla 11*Resumen Cálculos Hidráulicos en el tramo Mansilla–Vista*

Resumen de cálculos hidráulicos del ducto		
Promedio de velocidad	1,37	m/s
Reynolds > 4000 turbulento	Turbulento	
Δp (caída de presión)	13,91	bar

Resumen de cálculos hidráulicos del ducto		
h_tot (carga hidráulica total)	235,35	mca
Presión vapor amoniaco	9,90	bar
Presión de operación sistema	28	bar
Transporte seguro	$\Delta p_{total} < P_{op}$; pero $P_{op} > P_{vap}$	
Caudal total transportado	0,026498	m ³ /s
Temperatura	25	°C

En el tramo Albán–Mansilla, el análisis hidráulico confirma que el amoniaco circula en régimen turbulento, con una velocidad media estable y pérdidas de presión moderadas respecto al tramo anterior. La carga hidráulica acumulada se mantiene dentro de los márgenes operativos, y la presión de operación adoptada (28 bar) garantiza que el fluido permanezca en estado líquido, siempre por encima de la presión de vapor, asegurando así condiciones de transporte confiables.

- Selección del equipo de bombeo

Una vez efectuados los cálculos hidráulicos y consolidados los resultados obtenidos de cada tramo podemos seleccionar las bombas hidráulicas que nos permitirán conocer los datos de consumo para poder estimar la energía aproximada requerida por el equipo en cada una de las estaciones de bombeo, (Salgar–Albán; Albán–Mansilla; Mansilla–Vista Hermosa).

Para mayores detalles, ver anexo 3 de este documento.

Datos de equipo de bombeo para cada estación

En la Tabla 12 se detallan los parámetros para cada una de las estaciones de bombeo.

Tabla 12

Parámetros hidráulicos y de potencia para cada Estación de bombeo

MEMORIA DE CÁLCULO PARA SELECCIÓN DE BOMBAS ESTACIÓN DE BOMBEO				
Parámetros de cálculo hidráulico	SALGAR – ALBÁN	ALBÁN– MANSILLA	MANSILLA–VISTA HERMOSA	Unidades de medida
h_tot=Carga hidráulica total	1990,84	840,35	235,35	mca
Caudal de diseño (Q)	0,02650	0,02650	0,02650	m3/s
Presión de operación	132	63	28	bar abs
Potencia hidráulica (Ph)	311,95	131,68	36,88	KW
Densidad del fluido	603	603	603	kg/m ³
Fuerza gravitacional	9,81	9,81	9,81	m/s ²
Potencia del motor	440,40	185,90	52,06	KW

Con base en los resultados mostrados en la memoria de cálculo hidráulico de cada una de las estaciones, se procedió a evaluar alternativas de equipos que pudieran operar bajo estas condiciones.

Se identificó que las bombas centrífugas multietapa horizontales, partida axial, tipo API 610 BB3 son una solución adecuada, debido a que su rango de operación se ajusta a los parámetros requeridos de caudal y carga.

Según Ruhrpumpen (n.d.), en particular, la bomba SM (BB3) presenta las siguientes características:

- o Capacidad: 50–3000 m³/h
- o Carga total: 200–3000 m (656–9843 ft)
- o Presión máxima: 420 bar (6000 psi)
- o Temperatura máxima: 205 °C
- o Bridas de descarga: 3”–14”

- Aplicaciones: oleoductos, transporte de fluidos a alta presión, plantas de energía, inyección de fluidos.

Claramente este equipo se tendría que solicitar al fabricante que cumpla con las especificaciones técnicas bajo el régimen de trabajo del fluido a transportar que este caso es amoniaco anhidro en estado líquido.

Asimismo, la curva de operación de la bomba muestra que el punto de operación calculado para cada una de las estaciones de bombeo se ubica dentro de la zona de operación segura del fabricante, lo cual valida la selección preliminar del equipo. (Ver Figura 13, Figura 14 y Figura 15).

Figura 13

Estación Salgar-Albán.

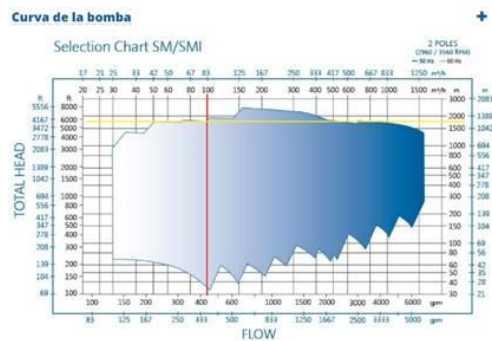


Figura 14

Estación Salgar-Albán.

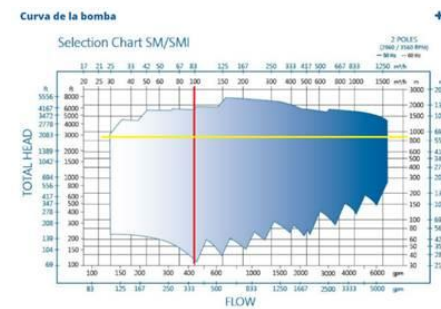
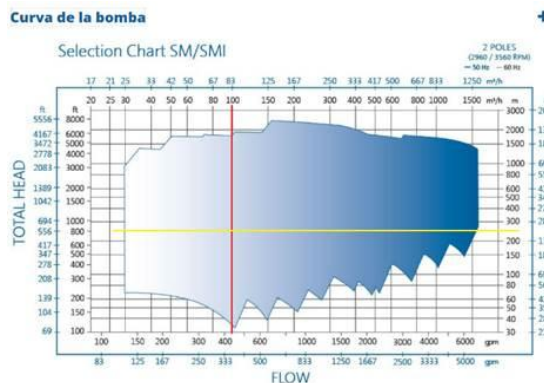


Figura 15

Estación Mansilla-Vista Hermosa.



Nota. Ruhrpumpen. (n.d.). *API Process Pumps - OH2 Type (ZLM Series).*

<https://www.ruhrpumpen.com/en/products/api-pumps>.

Una vez comprobados los datos y que el equipo cumple con los parámetros operativos para cada una de las estaciones de bombeo y con las características técnicas suministradas en la ficha técnica se puede proceder con la estimación del consumo de energía.

- Estimación de consumo de energía por estación de bombeo

En la Tabla 13 se muestran los datos de consumo de energía por día para cada una de las estaciones de bombeo:

Tabla 13

Consumo eléctrico diario de la estación de bombeo

CONSUMO ELÉCTRICO DIARIO				
Parámetros de cálculo hidráulico	SALGAR – ALBÁN	ALBÁN–MANSILLO	MANSILLO– VISTA HERMOSA	Unidades de medida
Potencia del motor	440,40	154,91	43,39	KW
Tiempo operación	24	24	24	h
Energía de consumo diario	10,56	3,71	1,04	MWh/día

- Autosuficiencia energética de estaciones de bombeo

Con el fin de evaluar la viabilidad operativa del sistema, se analizó la posibilidad de que cada estación de bombeo pueda cubrir su propia demanda energética utilizando parte del amoniaco transportado por el ducto. Para ello, se comparó el consumo eléctrico diario requerido por los equipos de bombeo con el poder calorífico inferior (PCI) del NH_3 y se determinó la fracción de masa de combustible necesaria para garantizar la autosuficiencia. Este análisis permite establecer qué porcentaje del amoniaco transportado se destinaría a la operación interna del sistema, sin comprometer de manera significativa el volumen total de producto disponible para fines energéticos externos.

Es importante tener en cuenta las siguientes equivalencias y fórmulas aplicadas en este apartado.

- $1 KWh = 3,6 MJ = 0,0036 GJ$

$$m(t) = V(bbl) * 0,158987 \frac{m^3}{bbl} * \rho \frac{Kg}{m^3} * \frac{1}{1000}$$

Donde:

- m = masa de amoniaco en toneladas (t).
- V = volumen de amoniaco en barriles (bbl).
- 0.158987 = factor de conversión de barriles a metros cúbicos.
- ρ = densidad del amoniaco líquido a la temperatura de operación.
- $1/1000$ = factor de conversión de kilogramos a toneladas.

$$m = \frac{E_{diario}}{PCI * \eta}$$

Donde:

- m = masa de amoniaco requerida para cubrir el consumo energético de la estación (kg/día).
- E_{diario} = energía diaria demandada por la estación de bombeo (MJ/día o kWh/día).
- PCI = poder calorífico inferior del amoniaco (MJ/kg).
- η = eficiencia de conversión de la tecnología utilizada.

Estación de bombeo estación Salgar-Albán

Dada su proximidad al parque solar fotovoltaico, se propone que la estación de bombeo de Puerto Salgar sea parcialmente alimentada mediante energía proveniente de dicho sistema renovable. Esta estrategia permitirá cubrir un período operativo de aproximadamente 5,5 horas diarias con energía solar, reduciendo el consumo proveniente de la red eléctrica. La operación se plantea bajo condiciones controladas, garantizando que el suministro eléctrico mantenga los niveles de seguridad, confiabilidad y continuidad requeridos para el funcionamiento estable de los equipos de bombeo y control.

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos con una proyección de funcionamiento de la estación de bombeo de 24 horas:

Tabla 14

Consumo energético y masa de amoniaco requerida para autosuficiencia de la estación de bombeo Salgar-Albán

ENERGÍA REQUERIDA POR LA ESTACIÓN EN AMONIACO		
Consumo diario (1 bomba operativa)	10569	KWh/día
24 horas consumiendo amoniaco	38050	MJ/día
Consumo diario (1 bomba operativa)	8147	KWh/día
18,5 horas consumiendo amoniaco	29330	MJ/día
Poder calorífico inferior (PCI) del NH ₃	18,6	MJ/Kg
Masa requerida del amoniaco (m)/día	4091	Kg/día
Eficiencia de la tecnología utilizada (η)	0,5	
Masa requerida del amoniaco (m)/18,5 h	3153	Kg/día
Eficiencia de la tecnología utilizada (η)	0,5	
Caudal de amoniaco transportado	1380	Toneladas/día
Factor de conversión de barril a metros cúbicos	0,15	m ³ /bbl
Densidad	603	Kg/m ³
Consumo energético de amoniaco	3,15	Toneladas/día
	0,23%	

La tabla 14 se presenta la estimación de amoniaco necesario para cubrir el consumo energético de la estación de bombeo bajo dos escenarios operativos: 24 horas de funcionamiento continuo y 18,5 horas de operación, considerando en este último caso

que las 5,5 horas restantes pueden suplirse con energía generada a partir del mismo parque solar fotovoltaico. De esta forma, se cuantifica el porcentaje (0,23%) del flujo transportado que debe destinarse al autoservicio energético de la estación Salgar– Albán sin comprometer de manera significativa la disponibilidad total del producto.

Tabla 15

Consumo energético y masa de amoníaco requerida para autosuficiencia de las estaciones de bombeo Albán–Mansilla y Mansillo–Vista Hermosa.

ENERGÍA REQUERIDA POR LA ESTACIÓN EN AMONIACO			
Parámetros de cálculo hidráulico	ALBÁN– MANSILLA	MANSILLA– VISTA HERMOSA	Unidades de medida
Consumo diario (1 bomba operativa)	4461,50	1 249,53	KWh/día
24 horas consumiendo amoníaco	16061,39	4498,29	MJ/día
Poder calorífico inferior (PCI) del NH ₃	18,6	18,6	MJ/Kg
Masa requerida del amoníaco (m)/día	1727,03	483,69	Kg/día
Eficiencia de la tecnología utilizada (η)	0,5	0,5	
Caudal de amoníaco transportado	1,73	0,48	Toneladas/día

ENERGÍA REQUERIDA POR LA ESTACIÓN EN AMONIACO			
Parámetros de cálculo hidráulico	ALBÁN- MANSILLA	MANSILLA- VISTA HERMOSA	Unidades de medida
Factor de conversión de barril a metros cúbicos	0,16	0,16	m3/bbl
Densidad	603	603	Kg/m3
Consumo energético de amoniaco	1,73	0,48	Toneladas/día
	0,13%	0,04%	

En la tabla 15 se presentan los resultados del análisis energético correspondiente a las estaciones de bombeo Albán-Mansilla y Mansilla-Vista Hermosa, considerando un régimen de operación continua de 24 horas. El cálculo contempla la demanda eléctrica diaria, el poder calorífico inferior (PCI) del amoniaco y una eficiencia de conversión del 50 %.

Los resultados muestran que el consumo requerido para el autoservicio de ambas estaciones representa una fracción mínima del caudal total transportado: 0,13 % para la estación Albán-Mansilla y 0,04 % para Mansilla-Vista Hermosa. Esta proporción confirma la viabilidad técnica de emplear una pequeña parte del amoniaco transportado para abastecer energéticamente las propias estaciones, sin afectar de forma significativa el volumen destinado a los usos energéticos externos previstos en el sistema.

6.4.6 Cálculo de energía transportada y potencial de sustitución

- Cálculo de energía transportada

El ducto tiene una capacidad de transporte de 14.400 barriles por día y en este caso sería de amoniaco líquido, lo que equivaldría a unas 1380 toneladas por día. Para realizar la estimación del potencial de energía del sistema como se mencionó anteriormente, se considera el poder calorífico inferior (PCI) del NH₃ de 18,6 MJ/kg.

Para estimar la energía total transportada se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{NH_3}/\text{día} = m \cdot PCI$$

Donde:

- o m = masa total de amoniaco transportado (kg/día).
- o PCI = poder calorífico inferior del amoniaco (MJ/kg).

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos para energía transportada y potencial de sustitución.

Tabla 16

Energía total transportada por el ducto de amoniaco anual

ENERGÍA TRANSPORTADA		
Masa total de amoniaco transportado	1380516	Kg/día
Poder calorífico inferior del amoniaco	18,6	MJ/Kg
Energía total transportada	$2,57 \times 10^7$	MJ/día
	$9,37 \times 10^9$	MJ/año
	26034	GWh/año

- Potencial de sustitución

Según reportes energéticos, la ciudad de Bogotá registra un consumo aproximado de 1,64 TWh/mensual en transporte mediante combustibles fósiles. Comparado con la energía anual contenida en el amoniaco transportado:

$$\text{Potencial de sustitución} = \frac{2,17 \text{ TWh/mes}}{1,70 \text{ TWh/mes}} * 100 = 127 \%$$

El transporte de 26,03 TWh/año de energía vía amoníaco equivaldría a cubrir el 100% del consumo anual de combustibles fósiles en Bogotá para movilidad si se logra reconvertir a hidrógeno y habría un excedente para suplir parte de la energía termoeléctrica.

6.5 Requerimientos técnicos para planta solar en Puerto Salgar

6.5.1 Balance energético diario

Para la simulación asumimos una planta solar que produzca amoniaco verde, el amoniaco verde será almacenado y transportado según los parámetros comerciales que favorezcan su valor de venta o uso. Considerando en la Tabla 2, se estima un consumo de energía de 52 kWh/kg H₂, se obtiene un valor de 10,32 GWh/d. Sin embargo, la electrólisis no es el único proceso consumidor: el bucle de síntesis (Haber-Bosch) y la unidad ASU también requieren energía. Según referencias técnicas y balances de proyectos comparables, estos procesos adicionan aproximadamente un 15% de consumo eléctrico, por ende, unos 1,55 GWh/d, de manera que la demanda total diaria asciende a 11,87 GWh/d. Este balance energético diario es fundamental porque establece la base sobre la cual debe dimensionarse la planta solar.

6.5.2 Potencia instantánea en HSP

Dado que toda la producción se concentra en la ventana solar de 5,26 horas, la energía diaria debe transformarse en potencia instantánea. Al dividir los 10,32 GWh/d de electrólisis entre las 24 h, se obtiene una energía de aproximadamente 429,8 MW. Para los consumos auxiliares (Haber Bosh + ASU), los 1,60 GWh/d equivalen a 64,7 MW. Este resultado es crítico: aunque por energía diaria bastaría con 494,5 MW FV, la potencia instantánea necesaria para el campo fotovoltaico.

6.5.3 Características de planta solar generado por PVSyst

Con base en la

Tabla 17, se evidencia los resultados obtenidos por medio de PVSyst en Puerto salgar; de igual forma, por medio de la *Figura 16*, se observa la posible huella de la planta solar en la cual operara para la alimentación del electrolizador PEM, Haber-Bosh y ASU.

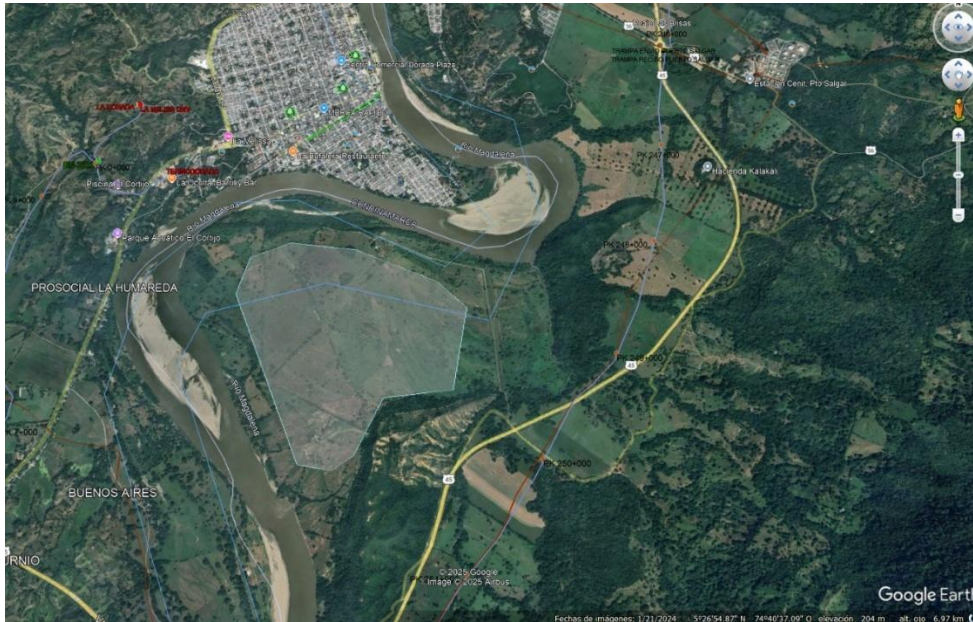
Tabla 17

Parámetros obtenidos de simulación para Puerto Salgar.

Parámetro	Valor	Observación
Localización	Puerto Salgar, Cundinamarca	Datos meteorológicos PVGIS
Irradiación global anual (GHI)	1919,2 kWh/m ² /año	Valor promedio PVGIS
Horas solares pico (HSP)	5,26 h/día	Referencia de cálculos
Potencia instalada	494,5 MW	Potencia Nominal
Relación DC/AC	1,30	Estándar utility-scale
Módulo FV	Trina Solar 725 Wp, bifacial	681382 módulos
Sistema de conexión módulos FV	26207 string x 26 en serie	
Inversor	WSTECH 7,5 MW	51 unidades
Performance Ratio inicial	89, 2%	Sin pérdidas adicionales
Huella Área	2,12 km ²	Con espacios de servidumbre

Figura 16

Huella de Planta Solar



Nota: Adaptado de Google Earth

6.5.6 Consideraciones adicionales

La operación intermitente de un sistema de síntesis de amoníaco plantea desafíos tecnológicos y de confiabilidad. El uso de buffers de hidrógeno (1–3 h de almacenamiento) podría reducir la presión sobre el dimensionamiento AC y facilitar la operación estable del loop Haber–Bosch. Asimismo, será necesario incorporar sistemas de seguridad (detección de fugas, ventilación, protección contra sobrepresión), además de licenciamientos ambientales y permisos de uso de agua.

6.5.7 Discusión de resultados

La simulación confirma que el diseño es técnicamente viable, pero señala aspectos a considerar en fases de ingeniería de detalle:

1. Clipping: Aunque se mantiene dentro de márgenes aceptables ($<3\%$), podría optimizarse ajustando la relación DC/AC a 1,25 o implementando algoritmos de gestión de potencia.

2. Temperatura ambiente: El efecto térmico es relevante en Puerto Salgar, con pérdidas anuales superiores al 4 %. La selección de módulos bifaciales y estructuras con ventilación natural puede mitigar este efecto.
3. Sombreamientos: No se incluyeron restricciones de terreno ni sombras proyectadas; deberán analizarse en estudios topográficos detallados.
4. Curvas de potencia de los inversores WSTECH: La simulación se realizó con parámetros genéricos, por lo que será necesario ajustar el modelo a las curvas reales de eficiencia (98,9 %).

Capítulo 7. Análisis de resultados

7.1 Energía solar fotovoltaica

Los resultados de PVsyst refuerzan los cálculos manuales y muestran que la planta propuesta no solo cumple con la demanda diaria de 11,92 GWh, sino que puede superar levemente la producción objetivo. Se recomienda utilizar estos resultados para la optimización final del layout, la definición de bloques de 7,5 MWac y la integración con la red eléctrica de transmisión.

7.2 Producción H₂

Bajo las condiciones base, el tren PEM exige 430 MW y 1 985 m³/d de agua DI. Un aumento del SEC del 10 % elevaría la potencia a 482 MW (44 MW), evidenciando que la variable más sensible del proyecto es el consumo específico del electrolizador.

7.3 Producción NH₃

En el caso base, el lazo demanda 20.5 MW (4–5 % del total de proceso). La sensibilidad 0.32–0.64 MWh/t ubica el rango entre 14 y 30 MW; por tanto, la eficiencia de compresión/reciclo y el control de inertes son relevantes pero secundarios frente al impacto del SEC del PEM.

7.4 Planta de tratamiento de agua

La captación se concentra en el enfriamiento (53 % del total). Elevar CoC de 5 a 6 reduciría el blowdown 20 %, con descenso neto de captación del orden de 2–3 %. La recuperación RO+EDI condiciona el caudal crudo de PTAP: en 85 % la captación sube $\approx$ 130 m³/d.

7.5 Consumo energético sistema de bombeo NH₃

Realizando un análisis del consumo energético del sistema de bombeo para el transporte del amoniaco en estado líquido en todo el recorrido del ducto se aprecia que muy reducido. Los resultados muestran que las pérdidas por el bombeo representan una muy pequeña fracción del total de energía movilizado lo que confirma que esta operación es altamente eficiente frente a otras alternativas de logística.

Los resultados del modelo hidráulico y energético muestran que el requerimiento de las tres estaciones de bombeo es reducido frente a la cantidad de energía total movilizada en

el ducto como lo mencionamos anteriormente, pero aterrizando esos datos la comparación directa entre el consumo eléctrico diario (del orden de decenas de MWh) y la energía química contenida en el amoníaco transportado (del orden de varios GWh) muestra que el bombeo representa aproximadamente entre 0,19 % y 0,35 % de la energía total movilizada o reconvertible, lo que evidencia que es prácticamente despreciable dentro del balance global de todo el sistema.

También, se debe hacer referencia al comportamiento hidráulico del ducto ya que, en condiciones estables y con presiones siempre por arriba de la presión de evaporización del amoníaco se evita el fenómeno de cavitación lo que garantiza la integridad de la estructura, por ende, las únicas pérdidas presentes en todo el tramo se deberían a la autoalimentación de las estaciones de bombeo que representan menos del 0,4 % del caudal total, que realmente desde el punto de vista hidráulico es una pérdida, pero económicamente y ambientalmente es autosustentable y viable garantizando que tanto la producción como el transporte sea de manera verde.

En resumen, el análisis basado en las memorias de cálculo valida que el transporte de amoníaco verde es energética y técnicamente viable. Las pérdidas son reducidas lo cual genera un impacto positivo al ser una alternativa para el manejo y almacenamiento de energía renovable.

Capítulo 8. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Máster permite concluir que la reconversión del propano ducto de 8" entre Puerto Salgar y Vista Hermosa para el transporte de amoníaco verde en fase líquida constituye una propuesta técnica, ambiental y estratégica viable dentro del contexto de la transición energética de Colombia. A partir de los análisis realizados, se destacan las siguientes conclusiones principales:

8.1 Viabilidad técnica y de infraestructura

- De acuerdo con las memorias de cálculo desarrolladas, se logró mostrar que el sistema de transporte de amoníaco verde es técnicamente viable ya que, cumple con los criterios de diseño necesarios para garantizar que la operación sea de manera eficiente, segura y estable. Los resultados obtenidos muestran que las presiones, caudales y consumos energéticos están dentro de los parámetros establecidos sin llegar a comprometer la integridad estructural e hidráulica del ducto.
- Al tratarse de una reconversión de infraestructura existente, el análisis técnico mostró que la propuesta del sistema es factible mediante la sustitución o adaptación de los equipos de bombeo, tomando en consideración las condiciones de presión, densidad y características fisicoquímicas del amoníaco. Se constató la existencia de alternativas comerciales que pueden ajustarse a los requerimientos del proyecto, eso sí, se debe especificar al proveedor que los equipos y sellos deberán ser compatibles con servicio de amoníaco anhidro.
- Es importante señalar que en las simulaciones y cálculos hidráulicos no se incluyeron las pérdidas adicionales por accesorios (válvulas, codos, bridas, filtros, entre otros), por lo que estos deberán considerarse en la fase de ingeniería de detalle, asegurando que todos los componentes sean aptos para conducción de amoníaco y cuenten con materiales y juntas certificadas para este tipo de servicio.
- En conjunto, las verificaciones realizadas respaldan que la infraestructura propuesta puede operar de manera segura y eficiente, siempre que en la etapa

constructiva se incorporen los ajustes indicados en la selección de materiales y equipos especializados para NH_3 .

- La reconversión aprovecha infraestructura ya existente, lo que representa una alternativa más eficiente y sostenible frente a la construcción de nuevos ductos, reduciendo costos, tiempos de implementación e impactos ambientales.
- El transporte de amoníaco en fase líquida, dadas sus propiedades fisicoquímicas, puede realizarse de forma segura bajo condiciones de operación controladas y con el cumplimiento de estándares internacionales de seguridad.
- Bajo los supuestos adoptados, el proyecto es técnica y operativamente viable a 1.1 kt/d de NH_3 . El análisis por bloques muestra que la electrólisis domina el consumo eléctrico; por tanto, la optimización del SEC es la palanca con mayor impacto. En agua, el make-up de enfriamiento concentra la captación y debe gestionarse mediante CoC altos y opciones de enfriamiento híbrido/seco. El lazo KBR Purifier™ aporta robustez operativa y holgura de capacidad en un single-train. Estos resultados son estimaciones; la ingeniería FEED deberá contrastarlos con curvas OEM, datos hidrológicos IDEAM y pruebas de integración antes de cierre de especificaciones.
- La simulación en PVsyst confirma la viabilidad del suministro fotovoltaico para una planta de amoníaco verde y orienta las decisiones para cumplir cargas continuas de electrólisis, compresión y síntesis: gestionar la intermitencia con una combinación escalonada de energía firme (PPAs), posible almacenamiento (BESS/ H_2) y/o hibridación con generación a partir de NH_3 , priorizar la reducción de pérdidas dominantes y un O&M preventivo basado en monitoreo para elevar el PR y bajar el LCOE e integrar la operación flexible del electrolizador y los consumos auxiliares (modulación, despacho y curtailment) con criterios de seguridad de proceso, gestión de agua y trazabilidad de huella de carbono. En conjunto, estas acciones mejoran la continuidad energética del tren PV- H_2 - NH_3 , reducen el costo nivelado del amoníaco (LCOA) y fortalecen la bancabilidad del proyecto.

8.2. Dimensión energética y estratégica

- El amoníaco verde se confirma como un vector energético de alta relevancia, no solo para la producción de fertilizantes sino también como reserva estratégica de energía utilizable en generación eléctrica, transporte e industrias intensivas.
- La posibilidad de almacenar energía renovable en forma de amoníaco brinda seguridad energética y flexibilidad, al permitir disponer de reservas ante déficits en el sistema eléctrico o contingencias derivadas de fenómenos climáticos.
- La existencia del ducto evita la necesidad de construir nuevas líneas de transmisión eléctrica de gran capacidad entre Puerto Salgar y Bogotá, lo cual reduce costos y mitiga conflictos sociales y ambientales asociados a la expansión de infraestructura eléctrica.
- El transporte energético en forma de amoníaco disminuye pérdidas en la transmisión a larga distancia, optimizando la logística y mejorando la competitividad del sistema.

8.3 Dimensión ambiental

- El uso de agua del río Magdalena para el proceso de electrólisis puede realizarse bajo criterios de caudal ambiental, garantizando un aprovechamiento sostenible del recurso hídrico y minimizando riesgos sobre los ecosistemas de la cuenca.
- El ciclo del hidrógeno y el amoníaco genera agua limpia como subproducto, lo cual representa un beneficio ambiental frente a los combustibles fósiles que solo generan emisiones contaminantes.
- La utilización del amoníaco verde en Bogotá implicará retornos de agua en su aplicación final, configurando un aporte positivo a la cuenca alta del río Bogotá y, de manera indirecta, al sistema hídrico del río Magdalena.
- Se logra un balance hídrico compensatorio: la captación de agua en Puerto Salgar se complementa con la generación posterior de agua en el área de consumo, contribuyendo a la resiliencia hídrica en dos de las cuencas más relevantes del país.

- La reconversión del ducto existente evita impactos asociados a la construcción de nueva infraestructura, como la afectación de suelos, biodiversidad y comunidades locales, consolidando un enfoque de transición energética ambientalmente responsable.

8.4 Marco regulatorio y de sostenibilidad

- La viabilidad del proyecto se enmarca en el sistema regulatorio colombiano, siempre que se cumplan las disposiciones en materia de transporte por ductos, licencias ambientales y normativa sobre sustancias peligrosas.
- Será indispensable gestionar la actualización de la licencia ambiental y diseñar planes de gestión del riesgo, monitoreo y contingencia específicos para el transporte de amoníaco.
- El proyecto se alinea con la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia y contribuye a los compromisos internacionales de descarbonización y neutralidad climática a 2050.

8.5 Limitaciones y proyección futura

- El trabajo se limita a un análisis técnico y conceptual, sin incluir estudios económicos, financieros ni de mercado. En fases posteriores, será necesario evaluar la viabilidad económica y la competitividad internacional del amoníaco verde frente a alternativas convencionales.
- Se recomienda avanzar en ingeniería de detalle, modelación de riesgos por liberación de amoníaco, estudios socioambientales y análisis de mercados, con el fin de consolidar un plan integral que permita la materialización del proyecto.
- Finalmente, el proyecto constituye una oportunidad para fortalecer la cooperación entre academia, gobierno y sector privado, potenciando la innovación, el desarrollo tecnológico y la formación de capital humano especializado en energías renovables e hidrógeno verde.

Chapter 8. Conclusions

This Master's Final Project concludes that converting the existing 8-inch propane pipeline between Puerto Salgar and Vista Hermosa for the transportation of green ammonia in liquid phase is a technically, environmentally, and strategically viable proposal within the framework of Colombia's energy transition. Based on the analyses conducted, the following key conclusions are presented:

8.1 Technical and Infrastructure Feasibility

- The engineering calculations demonstrate that the green ammonia transport system is technically feasible, meeting the necessary design criteria to ensure efficient, safe, and stable operation. The results confirm that pressure levels, flow rates, and energy consumption remain within acceptable limits without compromising the structural or hydraulic integrity of the pipeline.
- As this involves repurposing existing infrastructure, the technical analysis indicates that the system is feasible through the replacement or adaptation of pumping equipment, considering the pressure, density, and physicochemical properties of ammonia. Commercial alternatives are available that meet the project's requirements, provided that suppliers are informed that equipment and seals must be compatible with anhydrous ammonia service.
- It is important to note that hydraulic simulations and calculations did not include additional losses from accessories (valves, elbows, flanges, filters, etc.). These must be considered during the detailed engineering phase, ensuring that all components are suitable for ammonia transport and use certified materials and seals for this type of service.
- Overall, the technical validations support that the proposed infrastructure can operate safely and efficiently, as long as the construction phase incorporates the recommended adjustments in material selection and specialized equipment for NH_3 .

- The conversion makes use of existing infrastructure, offering a more efficient and sustainable alternative to building new pipelines, reducing costs, implementation time, and environmental impact.
- Transporting ammonia in liquid phase is safe under controlled operating conditions and in compliance with international safety standards.
- Under the defined assumptions, the project is technically and operationally viable at 1.1 kt/day of NH_3 . Block analysis shows that electrolysis is the main driver of electricity consumption; therefore, optimizing the Specific Energy Consumption (SEC) is the most impactful lever. Regarding water, cooling make-up dominates intake and should be managed with high Cycles of Concentration (CoC) and hybrid/dry cooling options. The KBR Purifier™ loop adds operational robustness and capacity flexibility in a single-train configuration. These results are estimates; FEED engineering must validate them using OEM curves, IDEAM hydrological data, and integration tests before finalizing specifications.
- PVsyst simulation confirms the feasibility of photovoltaic supply for a green ammonia plant and informs decisions to meet continuous loads for electrolysis, compression, and synthesis. Intermittency should be managed through a staggered combination of firm energy (PPAs), potential storage (BESS/ H_2), and/or hybridization with NH_3 -based generation. Priority should be given to reducing dominant losses and implementing preventive O&M based on monitoring to improve Performance Ratio (PR) and reduce Levelized Cost of Energy (LCOE). Flexible operation of the electrolyzer and auxiliary loads (modulation, dispatch, curtailment) should be integrated with process safety, water management, and carbon footprint traceability. Together, these actions enhance energy continuity across the PV- H_2 - NH_3 chain, reduce the Levelized Cost of Ammonia (LCOA), and improve project bankability.

8.2 Energy and Strategic Dimension

- Green ammonia is confirmed as a highly relevant energy vector, not only for fertilizer production but also as a strategic energy reserve for power generation, transportation, and energy-intensive industries.
- Storing renewable energy in the form of ammonia provides energy security and flexibility, allowing reserves to be available during electricity system shortages or climate-related contingencies.
- The existing pipeline eliminates the need to build new high-capacity transmission lines between Puerto Salgar and Bogotá, reducing costs and mitigating social and environmental conflicts associated with expanding electrical infrastructure.
- Transporting energy as ammonia reduces long-distance transmission losses, optimizing logistics and improving system competitiveness.

8.3 Environmental Dimension

- Using water from the Magdalena River for electrolysis can be done under environmental flow criteria, ensuring sustainable use of water resources and minimizing risks to the basin's ecosystems.
- The hydrogen-ammonia cycle produces clean water as a byproduct, offering an environmental advantage over fossil fuels, which only generate polluting emissions.
- The use of green ammonia in Bogotá will result in water returns during its final application, contributing positively to the upper Bogotá River basin and indirectly to the Magdalena River system.
- A compensatory water balance is achieved: water intake in Puerto Salgar is offset by water generation in the consumption area, supporting water resilience in two of Colombia's most important basins.
- Converting the existing pipeline avoids impacts associated with new infrastructure construction, such as soil disruption, biodiversity loss, and effects on local communities, reinforcing an environmentally responsible energy transition approach.

8.4 Regulatory and Sustainability Framework

- The project's feasibility aligns with Colombia's regulatory framework, provided that requirements related to pipeline transport, environmental licensing, and hazardous substances are met.
- It will be essential to update the environmental license and develop specific risk management, monitoring, and contingency plans for ammonia transport.
- The project supports Colombia's Hydrogen Roadmap and contributes to international commitments on decarbonization and climate neutrality by 2050.

8.5 Limitations and Future Outlook

- This study is limited to a technical and conceptual analysis and does not include economic, financial, or market assessments. Future phases should evaluate the economic feasibility and international competitiveness of green ammonia compared to conventional alternatives.
- It is recommended to advance in detailed engineering, ammonia release risk modeling, socio-environmental studies, and market analysis to develop a comprehensive plan for project implementation.
- Ultimately, the project presents an opportunity to strengthen collaboration between academia, government, and the private sector, fostering innovation, technological development, and the training of specialized human capital in renewable energy and green hydrogen.

Capítulo 9. Bibliografía

- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2013). *Resolución 0824 de 2013, por la cual se establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental y otros instrumentos de manejo ambiental, y sus actos modificatorios: Resolución 1553 de 2014, Auto 5705 de 2014 y Auto 4524 de 2019*. Bogotá, Colombia.
- Presidencia de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá, Colombia.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Resolución 1770 de 2013, por la cual se establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Riesgo Tecnológico*. Diario Oficial No. 48.899.
- Alcaldía de Barranquilla. (1 de mayo de 2022). *Distrito firma alianza con Monómeros para la producción de amoníaco verde*. https://barranquilla.gov.co/mi-barranquilla/distrito-firma-alianza-monomeros-produccion-amoníaco-verde?utm_source
- American Petroleum Institute. (2019). *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines* (API RP 1160, 3rd ed.). Washington, DC: API.
- American Petroleum Institute. (2021). *Welding of Pipelines and Related Facilities* (API Standard 1104, 22nd ed.). Washington, DC: API.
- American Society of Mechanical Engineers. (2019). *Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries* (ASME B31.4). New York: ASME.
- Association for Materials Protection and Performance (AMPP, antes NACE International). (2010). *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems* (NACE SP0169–2010). Houston, TX: AMPP.
- Association for Materials Protection and Performance (AMPP). (2010). *Pipeline Integrity Management Using In-Line Inspection* (NACE SP0102–2010). Houston, TX: AMPP.

Association for Materials Protection and Performance (AMPP). (2010). *Pipeline External Corrosion Direct Assessment (ECDA) Methodology* (NACE SP0502-2010). Houston, TX: AMPP.

ASTM International. (2019). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products* (ASTM A370-19). West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2018). *Standard Specification for General Requirements for Specialized Carbon and Alloy Steel Pipe* (ASTM A530/A530M-18). West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2020). *Standard Practice for In-Line Inspection of Pipelines* (ASTM F3183-20). West Conshohocken, PA: ASTM International.

Cenit Transporte y Logística de Hidrocarburos. (2025). *Poliductos de GLP y productos refinados*. Recuperado de <https://cenit-transporte.com>

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2022). *Resoluciones y lineamientos regulatorios para el transporte de GLP y gas natural*. Bogotá: CREG.

International Renewable Energy Agency. (2022). *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Green ammonia*. Abu Dhabi: IRENA.

Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*. Bogotá: Gobierno de Colombia.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. *Amoníaco en Colombia*. <https://www.minenergia.gov.co/es/ecosistema-hidrogeno-colombia/h2-en-colombia/cadena-de-valor/conversion-uso-final/>.

Capítulo 10. Anexos

Anexo 1. Descripción técnica del propano ducto Puerto salgar – Mansilla – Vista

1.1 Introducción al sistema de propano ductos en Colombia

El sistema de transporte de gas licuado de petróleo (GLP) en Colombia es operado principalmente por Cenit Transporte y Logística de Hidrocarburos S.A.S., filial del Grupo Ecopetrol. Esta infraestructura conecta las refinerías con los principales centros de consumo, garantizando el abastecimiento de combustibles líquidos y gaseosos en el territorio nacional.

Dentro de esta red, el corredor **Puerto Salgar – Mansilla – Vista Hermosa** se destaca como un activo estratégico. Originalmente diseñado para el transporte de GLP, parte del sistema se encuentra actualmente en estado de hibernación, aunque conserva su importancia por la ubicación, la infraestructura disponible y su potencial de reconversión hacia el transporte de vectores energéticos como el amoníaco verde. Este vector, considerado derivado del hidrógeno, se proyecta como pieza clave en la transición energética de Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2021; International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022).

1.2 Información general del sistema Salgar – Mansilla – Vista Hermosa

El poliducto Salgar – Mansilla–Vista Hermosa de 8 pulgadas (8”) fue diseñado para el transporte de GLP, con una longitud aproximada de 136,12 km. Actualmente se encuentra hibernado, pero mantiene infraestructura asociada en estaciones intermedias y terminales de recepción. En paralelo, existe un ducto activo de 10 pulgadas (10”) y 94,4 km de longitud, utilizado para productos refinados como Jet A1, gasolina motora corriente y gasolina motor extra (Cenit, 2025).

La coexistencia de ambos ductos —el hibernado de 8” y el activo de 10”— dota al corredor de flexibilidad, al permitir su utilización tanto como respaldo para contingencias energéticas como para un eventual proceso de conversión a nuevos vectores energéticos.

1.3 Descripción por tramos y estaciones de bombeo y recibo

1.3.1 Estación Puerto Salgar

Puerto Salgar funciona como centro de recepción (“estación de recibo/bombeo”), (Ver Figura 16), de los productos que provienen principalmente por ductos desde otras estaciones como Sebastopol y Galán.

Figura 17

Estación de bombeo de Puerto Salgar.



Nota. Google Earth

Las facilidades que ofrece la Estación de Puerto Salgar para el transporte de propano son:

- Transporte directo por ducto, lo que reduce la necesidad de transporte terrestre (camiones cisterna), lo que a su vez disminuye costos, emisiones y riesgos asociados al transporte por carretera.
- Alta capacidad de flujo, gracias al diámetro de los ductos (8") y al diseño para manejar volúmenes diarios considerables de GLP; esto permite satisfacer demandas grandes o fluctuantes.
- Almacenamiento suficiente para operatividad continua, amortiguar variaciones en el suministro o la demanda sin necesidad de cortes inmediatos.
- Punto de transferencia operativa: como estación de bombeo/recibo, Puerto Salgar puede jugar un rol clave para regular presiones, caudales, y redistribuir

GLP hacia Bogotá u otros destinos según la red de propanoductos y poliductos conectados.

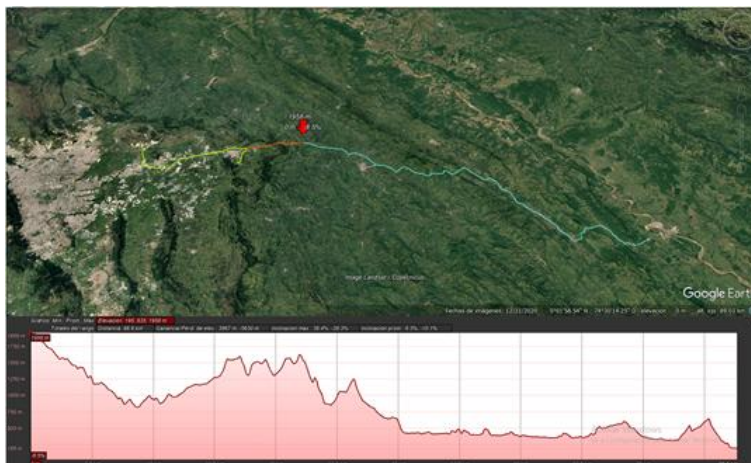
- Infraestructura disponible, incluso de tramos hibernados, lo que brinda potencial de reactivación para ampliar la capacidad o rutas de servicio.

1.3.2 Tramo Puerto Salgar – Albán, (Ver Figura 17).

- **Longitud:** 87,3 km.
- **Año de construcción:** 1967.
- **Diámetro nominal:** 8".
- **Materiales:** acero API 5LX42 y API 5LX52.
- **Espesores:** entre 0,219" y 0,535".
- **Ambientes:** tramos enterrados y aéreos, con pasos subfluviales menores.
- **Infraestructura asociada:** estación de bombeo y tanques de almacenamiento en Puerto Salgar.

Figura 18

Perfil hidráulico segmento Pto Salgar–Alban en 8".



Nota. Google Earth

1.3.3 Estación Alban

Albán funciona como estación de rebombeo, lo cual permite mantener presión, caudal y continuidad del flujo de GLP en el ducto Salgar–Mansilla. Es clave para superar pérdidas de presión en la conducción en distancias largas. Ver Figura 18.

Figura 19

Estación de rebombeo de Alban.



Nota. Google Earth

Albán está relativamente cerca del destino (Mansilla/Mosquera/Bogotá), lo que la hace estratégica para asegurar que el producto llegue con la presión y calidad requeridas, minimizando los costos y riesgos de transporte terrestre adicional.

1.3.4 Tramo Albán – Mansilla. (Ver Figura 19).

- **Longitud:** 16,52 km.
- **Año de construcción:** 1967.
- **Diámetro nominal:** 6".
- **Materiales:** acero API 5LX52.
- **Espesores:** entre 0,219" y 0,33".
- **Estado actual:** hibernado en el caso del ducto de GLP; operativo en el de refinados.
- **Ambientes:** combinación de tramos enterrados y aéreos, con cruces viales y fluviales.
- **Infraestructura asociada:** estación intermedia de almacenamiento y rebombeo en Mansilla (Facatativá).

Figura 20

Perfil hidráulico segmento Alban–Mansilla en 6".



Nota. Google Earth

1.3.5 Estación Mansilla

La estación Mansilla, (ver Figura 20), es un punto intermedio de almacenamiento, bombeo y regulación de presión ubicado en el municipio de Facatativá (Cundinamarca), en el tramo del propanoducto de 8 pulgadas que conecta Puerto Salgar con Bogotá. Su objetivo principal es recibir, acondicionar y reenviar el flujo de gas licuado de petróleo (GLP, fracción propano–butano) hacia los centros de consumo y plantas de distribución de la Sabana de Bogotá.

Componentes principales de la estación Mansilla

1. Tanques criogénicos o de GLP a presión
2. Bombas y compresores
3. Sistema de vaporización y regulación de presión
4. Filtración y acondicionamiento
5. Instrumentación y control
6. Protecciones y seguridad industrial

Figura 21

Estación de rebombeo y almacenamiento de Mansilla.



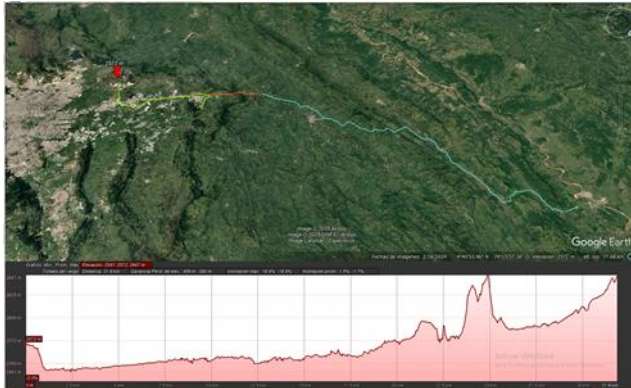
Nota. Google Earth

1.3.6 Tramo Mansilla – Vista Hermosa. (Ver Figura 21).

- **Longitud:** 32,3 km.
- **Año de construcción:** 1967.
- **Diámetro nominal:** 6".
- **Materiales:** acero API 5LX42.
- **Espesores:** entre 0,203" y 0,349".
- **Estado actual:** hibernado en el caso del ducto de GLP; operativo en el de refinados.
- **Ambientes:** combinación de tramos enterrados y aéreos, con cruces viales y fluviales.
- **Infraestructura asociada:** estación intermedia de almacenamiento y bombeo en Mansilla (Facatativá) con destino Final Vista Hermosa.

Figura 22

Perfil hidráulico segmento Mansilla–Vista Hermosa en 6".



Nota. Google Earth

1.3.7 Estación de recibo y almacenamiento Vista Hermosa

La estación Vista Hermosa, (ver Figura 22), opera como punto de recepción, almacenamiento temporal y rebombeo de gas licuado de petróleo (GLP, fracción propano-butano) en el sistema de 8" que conecta los centros de acopio del Magdalena Medio con la Sabana de Bogotá.

Sus objetivos principales son:

- Mantener la presión de línea para garantizar caudales constantes.
- Servir como nodo logístico para despacho a cisternas terrestres en contingencias.
- Almacenar inventarios estratégicos que aseguren continuidad de suministro ante paradas programadas o de emergencia.

Figura 23

Estación de recibo y almacenamiento de Vista Hermosa.



Nota. Google Earth

Anexo 2. Formulación general utilizada

A continuación, se presentan las ecuaciones que constituyen la base de los cálculos desarrollados en cada estación:

Fórmula 1. Diámetro interno de la tubería: El diámetro interno de la tubería se obtiene restando dos veces el espesor de pared al diámetro externo nominal. Este valor es crítico para determinar el área hidráulica disponible para el paso del fluido y afecta directamente la velocidad, el número de Reynolds y las pérdidas de carga.

$$ID = OD_{nominal} - 2 \cdot t$$

Donde:

- o ID = diámetro interno de la tubería (m)
- o $OD_{nominal}$ = diámetro externo nominal (m)
- o t = espesor de pared de la tubería (m)

Fórmula 2. Área de la tubería: Se requiere conocer el área interna de la tubería para poder determinar el caudal y velocidad del fluido.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Donde:

- o A = área de la sección (m²)
- o D = diámetro interno de la tubería (m)

Fórmula 3. Velocidad del fluido: Relaciona el caudal volumétrico con el área de la tubería, determinando la velocidad media del fluido en el conducto.

$$V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

- o V = velocidad del fluido (m/s)
- o Q = caudal volumétrico (m³/s)
- o A = área interna de la tubería (m²)

Fórmula 4. Número de Reynolds: Permite identificar el régimen de flujo (laminar, transitorio o turbulento), comparando fuerzas inerciales con fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

Donde:

- o Re = número de Reynolds
- o ρ = densidad del fluido (kg/m³)
- o V = velocidad del fluido (m/s)
- o D = diámetro interno (m)
- o μ = viscosidad dinámica (Pa · s)

Fórmula 5. Factor de fricción (Swamee-Jain para régimen turbulento): Aproximación explícita que permite calcular el factor de fricción en régimen turbulento, evitando iteraciones como en la ecuación de Colebrook.

$$f = \frac{0,25}{[\text{Log}10(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}})]^2}$$

Donde:

- o f = factor de fricción de Darcy-Weisbach
- o ϵ = rugosidad absoluta de la tubería (m)
- o D = diámetro interno de la tubería (m)
- o Re = número de Reynolds

Fórmula 6. Pérdida por fricción: Corresponde a la pérdida de carga debida al rozamiento del fluido con las paredes internas de la tubería.

$$hf = f * \frac{L}{D} + \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

- o hf = pérdida de carga por fricción (m)
- o f = factor de fricción
- o L = longitud del tramo de tubería (m)
- o D = diámetro interno (m)
- o V = velocidad del fluido (m/s)
- o g = aceleración de la gravedad (m/s²)

Fórmula 7. Caída de presión: Permite expresar la pérdida de carga en términos de caída de presión del fluido a lo largo del tramo de tubería.

$$\Delta p = \rho * g * hf$$

Donde:

- o Δp = caída de presión (Pa)

- o ρ = densidad del fluido (kg/m³)
- o g = aceleración de la gravedad (m/s²)
- o h_f = pérdida de carga por fricción (m)

Anexo 3. Formulación para selección de equipo de bombeo

- Selección del equipo de bombeo
 - o Potencia Hidráulica

$$Ph = \rho * g * Q * H$$

Donde:

- o Ph = Potencia hidráulica (W)
- o ρ = Densidad del fluido (kg/m³)
- o g = Aceleración de la gravedad (m/s²)
- o Q = Caudal volumétrico (m³/s)
- o H = Carga hidráulica total (m)

Anexo 4. Cálculo de ingeniería inversa para determinar la potencia de electrolizador PEM

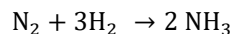
A continuación, con los datos iniciales se procede hacer un cálculo de ingeniería inversa, puesto que se sabe inicialmente el ducto tiene una capacidad nominal de 14,4 kbbls, sin embargo, se asume que la adecuación para el transporte de NH₃ hay una reducción significativa y se asume del 80%, para dar una capacidad nominal actual de 11,52 kbbls. Para obtener el cálculo inicial del transporte diario de NH₃, se sabe inicialmente la temperatura en funcionamiento es de 20 °C y su densidad de NH₃ es de 0,61 kg/l, por ende, se hace la conversión para quedar en términos de litro.

$$1 \text{ bbls} \rightarrow 158,987 \text{ l}$$

Con base en lo anterior, se obtiene el transporte diario de la siguiente manera:

$$\text{Transp}_{\text{Diario}} = 11520 \text{ bbls} \times 158,987 \frac{\text{L}}{\text{bbls}} \times 0,61 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 1117233,45 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cong 1117,23 \frac{\text{t}}{\text{día}}$$

Posteriormente, para sintetizar ese NH₃ se debe hacer un proceso de estequiometria para balancear las masas de H₂ y NH₃:



En relación con el balance se debe hacer la relación másica que se demuestra a continuación:

$$\frac{m_{\text{H}_2}}{m_{\text{NH}_3}} = \frac{3 m_{\text{H}_2}}{2 m_{\text{NH}_3}} = \frac{3 \times 2,0159}{2 \times 17,0305} = 0,17755$$

Con la relación, se puede obtener la necesidad de producción de H_2 para producir 1,117 t/día de NH_3 que se demuestra a continuación:

$$1117,23 \frac{\text{t}}{\text{día}} \text{NH}_3 \times 0,17755 = 198,37 \frac{\text{t}}{\text{día}} \text{H}_2$$

Según el DOE (Department Of Energy), establece unos objetivos técnicos para electrolizadoras PEM, en la cual menciona la eficiencia del sistema está en 55 kWh/kg de H_2 y se tiene como objetivo final llegar 46 kWh/kg de H_2 ; por tanto, Para efecto del presente trabajo, se estima el valor de eficiencia del sistema de 52 kWh/kg de H_2 . Dado lo anterior, se procede hacer el cálculo para obtener el valor de energía requerida para la producción de H_2 :

$$198364,8 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{H}_2 \times 52 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 10314969,52 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \text{H}_2 \cong 10,32 \frac{\text{GWh}}{\text{día}} \text{H}_2$$

Teniendo en cuenta que la producción del H_2 es continua en las 24 horas del día se estima una potencia instalada en la planta PEM de 429,8 MW.