

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA

INGENIERÍA INDUSTRIAL



***“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA
PRODUCCIÓN DE DIÉSEL A PARTIR DEL
PROCESO DE PIROLÍISIS DE PLÁSTICOS
RECICLADOS EN SALTA”***

ESTUDIANTES:

- **COLQUE, LEONARDO AUGUSTO**
- **CRIVELLI CORNEJO, FABRIZIO**

AÑO 2025



“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE DIÉSEL A PARTIR DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS RECICLADOS EN SALTA”

ALUMNOS

Colque, Leonardo Augusto

Crivelli Cornejo, Fabrizio

PROFESOR GUÍA

Dra. Ing. Romero Dondiz, Estela María

TRIBUNAL EVALUADOR

Tribunal Evaluador 1

Tribunal Evaluador 2

Tribunal Evaluador 3

FECHA DE EXPOSICIÓN



DEDICATORIAS Y AGRADECIMENTOS

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que nos han acompañado a lo largo de nuestra carrera. En primer lugar, a nuestras familias, cuyo apoyo, comprensión y aliento nos han permitido perseverar en este camino. Su respaldo constante ha sido fundamental para llevar a cabo esta etapa tan significativa de nuestras vidas. A nuestros amigos, por su apoyo incondicional y por siempre estar a nuestro lado, brindándonos su confianza y motivación.

Queremos agradecer a la Facultad de Ingeniería, por brindarnos las herramientas académicas, la formación técnica y el acompañamiento necesario para nuestro crecimiento profesional. También extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Católica de Salta en general, por habernos recibido, apoyado y guiado a lo largo de estos años, dejando una huella imborrable en nuestra formación y en nuestra vida personal.

Finalmente, extendemos nuestro más profundo agradecimiento a nuestra asesora académica, por su valiosa orientación, paciencia y el constante apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO	13
ABSTRACT	14
1 INTRODUCCIÓN	15
1.1 INTRODUCCIÓN	15
1.2 ALCANCE DEL PROYECTO.....	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos:	17
1.4 JUSTIFICACIÓN	18
1.5 PRODUCTO FINAL: COMBUSTIBLE	20
1.6 MATERIA PRIMA: PLÁSTICOS	21
2 MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 PROCESO DE PIRÓLISIS	23
2.1.1 Tipos de Pirólisis	23
2.1.2 Mecanismos de Degradación.....	24
2.1.3 Variables.....	26
2.1.4 Materias Primas	31
2.1.5 Productos Generados	35
2.2 PROCESO DE CONDENSACIÓN.....	36
2.2.1 Productos Generados	36
2.3 PROCESO DE DESTILACIÓN.....	37
2.3.1 Productos Generados	37
2.4 CONCLUSIÓN.....	38
3 ESTUDIO DE MERCADO	40
3.1 BALANZA COMERCIAL DE ARGENTINA	40
3.1.1 Exportaciones	41
3.1.2 Importaciones	43
3.2 OFERTA DE COMBUSTIBLES	46
3.2.1 Empresas Competidoras	46
3.2.2 Producción de Combustibles	48
3.2.3 Precios de Combustibles.....	52
3.3 ANÁLISIS DE DEMANDA DE COMBUSTIBLES.....	54
3.3.1 Análisis de Demanda de Argentina	54



3.3.2	Análisis de Demanda en la provincia de Salta	57
3.3.3	Proyección de Demanda	61
3.4	OFERTA DE MATERIA PRIMA.....	65
3.4.1	Reciclaje de plástico en la provincia de Salta.....	66
3.4.2	Empresas Productoras	67
3.4.3	Capacidad Operativa.....	68
3.5	CONCLUSIÓN.....	69
4	ESTUDIO TÉCNICO	70
4.1	PROCESO PRODUCTIVO.....	70
4.1.1	Etapas	71
4.1.2	Diagrama de Flujo	81
4.1.3	Balance de Materia	84
4.2	CAPACIDAD PRODUCTIVA	86
4.3	SELECCIÓN DE EQUIPOS	87
4.3.1	Silo de Alimentación	87
4.3.2	Tolva de Alimentación	89
4.3.3	Reactor Batch	89
4.3.4	Torre de Destilación	90
4.3.5	Intercambiadores de Calor.....	91
4.3.6	Colector de Gases	91
4.3.7	Almacenamiento de Diésel.....	92
4.4	INSTALACIONES AUXILIARES	93
4.4.1	Nitrógeno	94
4.4.2	Gas Natural Comprimido	95
4.4.3	Agua	96
4.4.4	Aire Comprimido.....	97
4.5	CONCLUSIÓN.....	98
5	ESTUDIO AMBIENTAL	99
5.1	EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (EAI)	99
5.1.1	Emisiones Gaseosas.....	100
5.1.2	Generación de Residuos Sólidos	100
5.1.3	Efluentes Líquidos.....	100
5.1.4	Consumo de Recursos Naturales	101
5.1.5	Riesgos de Incendio y Explosión	101
5.2	NORMAS AMBIENTALES	101
5.2.1	Normas Nacionales.....	101



5.2.2	Normativas Provinciales.....	103
5.3	MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y CONTROL	104
5.3.1	Control de emisiones gaseosas	104
5.3.2	Gestión de residuos sólidos	105
5.3.3	Protección de recursos hídricos	105
5.3.4	Eficiencia en el uso de recursos naturales	106
5.3.5	Prevención de riesgos de incendio y explosión	106
5.4	BONOS DE CARBONO	106
5.4.1	Contexto Internacional y Nacional	107
5.4.2	Mercados de Bonos de Carbono	107
5.4.3	Implicancias para el Proyecto.....	108
5.4.4	Requisitos y Limitaciones	108
5.5	CONCLUSIÓN.....	109
6	ESTUDIO LEGAL.....	111
6.1	REQUISITOS LEGALES	111
6.1.1	Habilitaciones Municipales y Provinciales	111
6.1.2	Legislación sobre Seguridad e Higiene Industrial	111
6.1.3	Normativas sobre Residuos y Gestión Ambiental.....	112
6.1.4	Contratos y Condiciones de Trabajo	112
6.1.5	Seguridad Laboral.....	113
6.1.6	Capacitación y Equipos de Protección Personal (EPP).....	113
6.2	MEDIDAS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA.....	113
6.2.1	Análisis y Gestión de Riesgos	114
6.2.2	Equipos de Protección Personal (EPP).....	116
6.2.3	Equipos de Extinción de Incendios	118
6.2.4	Planes de Emergencia y Contingencia.....	119
6.2.5	Capacitaciones	121
6.3	CONCLUSIÓN.....	122
7	ESTUDIO ECONÓMICO	123
7.1	INVERSIÓN FIJA TOTAL	123
7.1.1	Maquinaria.....	123
7.1.2	Mobiliario	126
7.1.3	Seguridad	127
7.1.4	Recaudación Edilicia	127
7.1.5	Cálculo de Inversión Fija Total	129
7.2	CRÉDITO	131



7.3	SERVICIOS	132
7.3.1	Consumo Eléctrico	132
7.3.2	Consumo de Agua	134
7.3.3	Consumo de Gas	134
7.4	DEPRECIACIONES Y AMORTIZACIONES	135
7.5	COSTOS DE FABRICACIÓN DIRECTOS	137
7.6	COSTOS DE FABRICACIÓN INDIRECTOS	139
7.7	CAPITAL DE TRABAJO	141
7.8	INGRESOS	142
7.9	FLUJO DE CAJA	143
7.10	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	149
7.10.1	Flujo de Fondo del Proyecto.....	150
7.10.2	Flujo de Fondo del Inversionista	152
7.11	CONCLUSIÓN.....	154
8	CONCLUSIÓN FINAL	156
8.1	ANÁLISIS FODA	156
8.1.1	Fortalezas.....	156
8.1.2	Oportunidades.....	157
8.1.3	Debilidades	157
8.1.4	Amenazas.....	158
8.2	CONCLUSIÓN FINAL	158
9	BIBLIOGRAFÍA.....	161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1: Calidad de los RSU en Argentina	19
Ilustración 1.2: Calidad de los RSU en Salta	19
Ilustración 2.1: Etapa de iniciación	24
Ilustración 2.2: Etapa de propagación	25
Ilustración 2.3: Hidrogenación opción 1	25
Ilustración 2.4: Hidrogenación opción 2	25
Ilustración 3.1: Producción de Diésel Grado 2 en Argentina expresados en m3	49
Ilustración 3.2: Producción de Diésel Grado 3 en Argentina expresados en m3	50
Ilustración 3.3: Producción total de diésel en Argentina expresados en m3	51
Ilustración 3.4: Demanda de Diésel Grado 2 en Argentina expresada en m3	55
Ilustración 3.5: Demanda de Diésel Grado 3 en Argentina expresada en m3	56
Ilustración 3.6: Demanda total de diésel en Argentina expresada en m3	57
Ilustración 3.7: Demanda de Diésel Grado 2 en Salta expresada en m3	58
Ilustración 3.8: Demanda de Diésel Grado 3 en Salta expresada en m3	59
Ilustración 3.9: Demanda total de diésel en Salta expresada en m3	60
Ilustración 3.10: Pronóstico de la demanda de diésel en Argetnina expresada en m3	62
Ilustración 3.11: Pronóstico de la demanda de diésel en Salta expresada en m3	64
Ilustración 4.1: Diagrama de bloques	71
Ilustración 4.2: Rendimientos del Proceso de Destilación	75
Ilustración 4.3: Diagrama de flujo del proceso	83
Ilustración 4.4: Balance de materia	84



Ilustración 4.5: Balance de materia simplificado	85
Ilustración 4.6: Silos de almacenamiento	89
Ilustración 4.7: Tolva de alimentación (TV-101).....	89
Ilustración 4.8: Reactor de pirólisis (RP-201).....	90
Ilustración 4.9: Torre de destilación (TD-301).....	90
Ilustración 4.10: Intercambiador de calor (IQ-204)	91
Ilustración 4.11: Intercambiador de calor (IQ-306 e IQ-307)	91
Ilustración 4.12: Colector de gases (CG-202)	92
Ilustración 4.13: Almacenamiento de diésel (TP-309 y TP-310).....	93
Ilustración 7.1: Croquis de planta tentativo.....	129
Ilustración 7.2: Sensibilidad variando precio del diésel.....	150
Ilustración 7.3: Sensibilidad variando precio del plástico.....	151
Ilustración 7.4: Sensibilidad variando precio del diésel.....	152
Ilustración 7.5: Sensibilidad variando precio del plástico.....	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Efecto de tasa de calentamiento y tiempo de residencia	28
Tabla 2.2: Características del HDPE	33
Tabla 2.3: Características del LDPE	34
Tabla 3.1: Exportaciones de diésel en Argentina expresados en m3	42
Tabla 3.2: Exportaciones de diésel en Argentina expresados en dólares	42
Tabla 3.3: Importaciones de diésel en Argentina expresados en m3	44
Tabla 3.4: Importaciones de diésel en Argentina expresados en dólares	45
Tabla 3.5: Producción de diésel en Argentina expresados en m3	49
Tabla 3.6: Precios históricos del diésel en Argentina.....	52
Tabla 3.7: Demanda de diésel en Argentina expresada en m3.....	55
Tabla 3.8: Demanda de diésel en Salta expresada en m3.....	58
Tabla 3.9: Pronóstico de la demanda de diésel en Argentina expresada en m3.....	62
Tabla 3.10: Pronóstico de la demanda de diésel en Salta expresada en m3.....	63
Tabla 4.1: Variables del Proceso de Pirólisis	72
Tabla 4.2: Caracterización del Aceite Piroclítico.....	74
Tabla 4.3: Variables del proceso de destilación	75
Tabla 4.4: Caracterización de los Productos Obtenidos.....	78
Tabla 4.5: Capacidad productiva.....	86
Tabla 4.6: Materia prima requerida por año	88
Tabla 4.7: Órdenes de materia prima por mes/año.....	88
Tabla 4.8: Almacenamiento de materia prima	88

Tabla 7.1: Máquinas y Equipos	124
Tabla 7.2: Costos de Importación.....	125
Tabla 7.3: Mobiliario y Equipamiento	126
Tabla 7.4: Elementos de Seguridad	127
Tabla 7.5: Recaudación Edilicia.....	129
Tabla 7.6: Activos Tangibles.....	130
Tabla 7.7: Activos Intangibles.....	130
Tabla 7.8: Inversión Fija Total	130
Tabla 7.9: Origen de Fondos	131
Tabla 7.10: Detalles del Crédito	131
Tabla 7.11: Pago del Préstamo	132
Tabla 7.12: Consumo eléctrico de producción	133
Tabla 7.13: Consumo eléctrico de administración	133
Tabla 7.14: Consumo eléctrico.....	134
Tabla 7.15: Consumo de agua	134
Tabla 7.16: Consumo de gas	135
Tabla 7.17: Depreciación y Amortización.....	136
Tabla 7.18: Costo de materia prima	137
Tabla 7.19: Balance de personal productivo	138
Tabla 7.20: Costos de fabricación directos.....	138
Tabla 7.21: Costos de insumos.....	139
Tabla 7.22: Balance de personal administrativo.....	139



Tabla 7.23: Costos de fabricación indirectos	141
Tabla 7.24: Capital de Trabajo	142
Tabla 7.25: Ingresos	143
Tabla 7.26: Flujo de Fondo del Proyecto	145
Tabla 7.27: Flujo de Fondo del Inversionista	147
Tabla 7.28: VAN y TIR del FF del Proyecto	148
Tabla 7.29: VAN y TIR del FF del Inversionista	149
Tabla 7.30: Sensibilidad variando precio del diésel	150
Tabla 7.31: Sensibilidad variando precio del plástico	151
Tabla 7.32: Sensibilidad variando precio del diésel	152
Tabla 7.33: Sensibilidad variando precio del plástico	153
Tabla 8.1: Análisis FODA	156

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto propone la implementación de un sistema de producción de diésel a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis, utilizando infraestructura industrial existente en la provincia de Salta. Se ha demostrado su viabilidad técnica, económica, ambiental y legal, consolidándose como una solución energética eficiente, rentable y sustentable para el sector industrial local.

Desde el enfoque económico, se identificó una creciente demanda de combustibles, en especial diésel, tanto a nivel nacional como provincial. Esta situación, agravada por la volatilidad internacional de precios, refuerza la necesidad de alternativas locales de autoabastecimiento. El proyecto permite a las industrias reducir su dependencia externa, optimizar costos y asegurar continuidad operativa. La disponibilidad de materia prima local, 174 toneladas mensuales de plásticos HDPE y LDPE a \$700 por tonelada, fortalece su factibilidad económica y logística.

. Desde el punto de vista técnico, se ha desarrollado un sistema de procesamiento por pirólisis en régimen de tres ciclos batch diarios, que permite una producción estimada de 5 m³ de diésel por día, lo que representa un volumen anual aproximado de 1.200 m³. El diseño considera componentes clave como reactores de pirólisis, sistemas de condensación, filtrado de gases, almacenamiento seguro de productos y unidades auxiliares de enfriamiento y control de emisiones. La selección de tecnologías priorizó criterios de eficiencia energética, seguridad operativa y compatibilidad con instalaciones industriales existentes, lo que reduce significativamente los costos de adaptación e instalación.

En materia ambiental y legal, el proyecto se enmarca en los principios de la economía circular, transformando residuos plásticos contaminantes en energía útil, y reduciendo tanto su disposición en vertederos como las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, cumple con la normativa vigente en seguridad industrial, gestión de residuos y operación ambiental. Se contemplan permisos, licencias, planes de mitigación y monitoreo ambiental, lo que garantiza una gestión legalmente válida y responsable con el entorno.

Estrategicamente, su implementación en estructuras industriales ya existentes minimiza la inversión inicial y acelera la ejecución. Además, su alineación con políticas de transición energética y sostenibilidad podría permitir el acceso a incentivos fiscales y bonos de carbono, fortaleciendo el posicionamiento institucional de las empresas participantes.

ABSTRACT

This project proposes the implementation of a diesel production system from plastic waste through the pyrolysis process, utilizing existing industrial infrastructure in the province of Salta. Its technical, economic, environmental, and legal feasibility has been demonstrated, establishing it as an efficient, profitable, and sustainable energy solution for the local industrial sector.

From an economic perspective, an increasing demand for fuels—especially diesel—has been identified at both the national and provincial levels. This situation, worsened by the volatility of international prices, reinforces the need for local self-supply alternatives. The project allows industries to reduce external dependency, optimize costs, and ensure operational continuity. The availability of local raw material—174 tons per month of HDPE and LDPE plastics at \$700 per ton—strengthens its economic and logistical feasibility.

From a technical standpoint, a pyrolysis processing system has been developed operating on a three-batch daily cycle, enabling an estimated production of 5 m³ of diesel per day, which equates to an annual volume of approximately 1,200 m³. The design includes key components such as pyrolytic reactors, gas condensation systems, gas filtration, safe product storage, and auxiliary cooling and emission control units. The selection of technologies prioritized energy efficiency, operational safety, and compatibility with existing industrial facilities, significantly reducing adaptation and installation costs.

In terms of environmental and legal aspects, the project aligns with the principles of the circular economy by transforming polluting plastic waste into useful energy, thereby reducing landfill disposal and greenhouse gas emissions. It also complies with current regulations on industrial safety, waste management, and environmental operation. Permits, licenses, mitigation plans, and environmental monitoring are all considered, ensuring a legally valid and environmentally responsible management.

Strategically, its implementation within already existing industrial structures minimizes initial investment and accelerates execution. Furthermore, its alignment with energy transition and sustainability policies could allow access to tax incentives and carbon credits, strengthening the institutional positioning of the participating companies.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica, económica, legal y ambiental de la producción de combustible a partir de plástico reciclado mediante el proceso de pirólisis en la provincia de Salta, Argentina. Esta propuesta surge en respuesta a la creciente problemática ambiental derivada de la acumulación de residuos plásticos, un desafío global que impacta significativamente en la región. El proceso de pirólisis, como tecnología clave en este proyecto, permite la descomposición de los plásticos bajo condiciones controladas para generar combustibles líquidos y gaseosos. Este enfoque no solo proporciona una solución innovadora para la gestión de residuos, sino que también contribuye a la economía circular y a la reducción de la contaminación.

La acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente ha generado preocupación global debido a su impacto negativo en los ecosistemas y la salud pública. La gestión inadecuada de estos materiales ha provocado la contaminación de suelos, ríos y océanos, donde persisten durante siglos debido a su naturaleza no biodegradable. En este contexto, la provincia de Salta enfrenta una generación de residuos plásticos que supera su capacidad local de tratamiento y reciclaje. Ante esta situación, es necesario explorar alternativas innovadoras para la valorización de estos residuos, con el fin de reducir su impacto ambiental y contribuir al desarrollo de nuevas fuentes de energía.

La motivación para este proyecto radica en la urgencia de desarrollar alternativas sostenibles que permitan gestionar eficientemente los residuos plásticos en Salta. La viabilidad de implementar un proceso de pirólisis a nivel local representa una solución alineada con las tendencias globales hacia la economía circular y el desarrollo sostenible. Además de los beneficios ambientales, este enfoque podría generar ventajas económicas al reducir la dependencia del mercado convencional de combustibles y optimizar la gestión de recursos dentro de las empresas.

Para evaluar la viabilidad del proyecto, se adoptará un enfoque integral que abarcará diversos estudios interrelacionados. Se realizará un análisis exhaustivo de la disponibilidad y características de los plásticos reciclados en Salta para determinar la cantidad y calidad de la materia prima disponible. Asimismo, se investigarán las tecnologías más adecuadas para llevar a cabo el proceso en condiciones locales, optimizando los parámetros operativos para maximizar la eficiencia y el rendimiento. Estos análisis técnicos se complementarán con un

estudio económico-financiero que permitirá estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como la rentabilidad del proyecto. También se llevará a cabo un análisis legal para revisar la normativa vigente sobre producción y uso de combustibles, y un estudio ambiental para evaluar los impactos y requerimientos asociados a la implementación del proceso.

El criterio de éxito del proyecto se basa en garantizar que la producción de combustible cumpla con los estándares normativos, que el proceso sea económicamente sostenible y que la iniciativa resulte viable desde el punto de vista ambiental. Los resultados de esta investigación proporcionarán una base sólida para determinar si la implementación del proceso de pirólisis de plástico reciclado en Salta es factible y rentable dentro del marco empresarial existente, contribuyendo tanto a la gestión eficiente de residuos como a la generación de energía alternativa.

En síntesis, este proyecto busca ofrecer una solución integral a un problema ambiental crítico mediante una tecnología innovadora. La propuesta no solo aborda un desafío ambiental urgente, sino que también busca generar beneficios económicos y sociales para la región de Salta, posicionándola como un referente en el desarrollo de iniciativas sostenibles y en la promoción de la economía circular.

1.2 ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto se centra en la investigación y evaluación del proceso de pirólisis aplicado a la producción de combustible, específicamente diésel, a partir de plástico reciclado. No tiene como objetivo el diseño ni la construcción de una planta de producción, sino que está orientado a aquellas empresas que requieren combustible para su flota de vehículos u otros fines operativos y que consideran la posibilidad de autoabastecerse sin depender de proveedores externos. A través de este análisis, se busca determinar si la implementación de esta tecnología representa una alternativa viable y sostenible dentro de un entorno industrial ya existente.

El estudio analizará la viabilidad técnica y económica de incorporar el proceso de pirólisis en una empresa, evaluando si la producción propia del combustible representa un beneficio en términos de costos en comparación con su adquisición en el mercado. Para ello, se determinará el potencial de ahorro en función de la cantidad de materia prima disponible y la eficiencia del proceso de conversión, considerando variables como la composición del plástico empleado, el rendimiento energético del sistema y los costos operativos asociados. Asimismo, se estudiarán las condiciones necesarias para la correcta implementación del proceso,

incluyendo los requerimientos de equipos, insumos y control de calidad del producto final, garantizando su compatibilidad con los estándares industriales y normativos vigentes.

Dado que el proyecto no tiene como finalidad la creación de una nueva empresa ni la planificación de una infraestructura desde cero, no se abordarán aspectos relacionados con la selección del emplazamiento de la planta, su diseño estructural o la configuración organizacional de una unidad de negocio. La responsabilidad de definir estos elementos recaerá en las empresas interesadas en adoptar esta tecnología dentro de su estructura operativa existente. En su lugar, el estudio se centrará en la factibilidad técnica del proceso, los requerimientos operativos y normativos, así como en los criterios de rentabilidad que permitirían a empresas consolidadas evaluar la incorporación de esta tecnología dentro de sus operaciones.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica, económica, ambiental y legal de la producción de combustible a partir de plástico reciclado mediante el proceso de pirólisis en la provincia de Salta, Argentina.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- 1) Analizar la disponibilidad, características y tipos de plásticos reciclados en la región para determinar su idoneidad como materia prima en el proceso de pirólisis.
- 2) Investigar y seleccionar las tecnologías y los parámetros operativos más adecuados para el proceso de pirólisis, considerando la eficiencia del proceso y las condiciones locales en Salta.
- 3) Evaluar la normativa legal vigente aplicable a los combustibles, así como los aspectos ambientales a considerar en el proyecto.
- 4) Realizar un análisis económico-financiero que estime los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como la rentabilidad del proyecto.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto surge ante creciente necesidad de mejorar la gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Argentina, con un enfoque particular en la provincia de Salta. Los RSU comprenden desechos generados en hogares, comercios e instituciones, excluyendo aquellos regulados por normativas específicas, como ser los residuos peligrosos.

La economía lineal actual, basada en producir, consumir y desechar, ha llevado a un alarmante incremento en la generación de residuos, exacerbando la contaminación y los riesgos sanitarios. Según lo definido por ONU-Hábitat 2020¹ en el desarrollo de la Nueva Agenda Urbana², la generación de residuos en las ciudades representa un problema urgente para la salud pública, el uso del suelo y el cambio climático. Se prevé que para 2050 la cantidad de RSU se duplique en relación con el crecimiento poblacional, evidenciando la necesidad de soluciones sostenibles para su gestión (Gobierno de Argentina, 2020).

En Argentina, los desafíos en la gestión de los RSU representan un problema crítico en todas las ciudades, donde más del 92 % de la población es urbana. Según datos de 2020, el país produce alrededor de 49.300 toneladas de residuos al día, equivalentes a 18 millones de toneladas anuales, con una generación diaria de 1,15 kg per cápita. Esta realidad ha llevado a la existencia de aproximadamente 5.000 basurales a cielo abierto (Gobierno de Argentina, 2020).

Para el año 2023, los RSU estuvieron compuestos principalmente por desechos alimenticios (34,74 %), plásticos (18,62 %) y papeles y cartones (13,71 %), entre otros, como se detalla en Ilustración 1.1. Aunque la recolección en áreas urbanas cubre el 99,8 % de los RSU, la disposición final sigue siendo deficiente, lo que agrava los problemas ambientales y sanitarios (Cámara Argentina de la Construcción, 2023).

¹ La “ONU-Hábitat” es la agencia de las Naciones Unidas especializada en promover un desarrollo urbano y humano sostenible.

² La “Nueva Agenda Urbana 2020” es un marco global que guía el desarrollo urbano sostenible hasta 2036, promoviendo ciudades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.

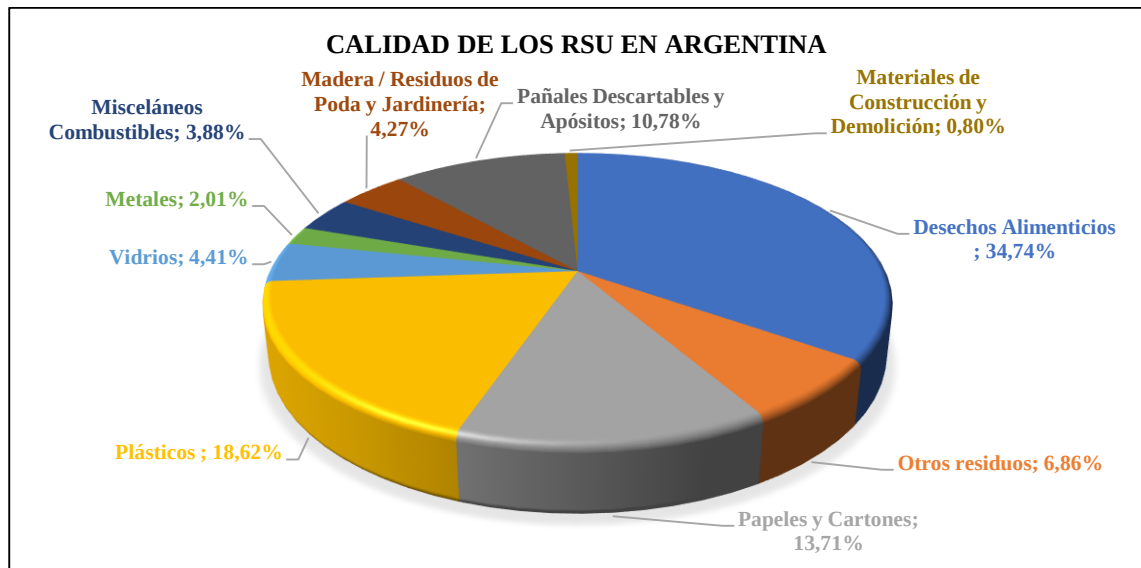


Ilustración 1.1: Calidad de los RSU en Argentina

En la provincia de Salta, la gestión de los RSU también enfrenta importantes inconvenientes. Según estudios de 2015, la generación per cápita aumentó de 0,76 kg/día en 2005 a 0,82 kg/día en 2010. En términos de volumen total, se reportaron 890 toneladas diarias en 2010, cifra que creció a 1.031 toneladas en 2015, con una proyección de 1.557 toneladas diarias para 2030. En cuanto a la composición física de los RSU en Salta, se observa un predominio de desechos alimenticios (50,1 %), seguido de plásticos (9,4 %), y papeles y cartones (9,3 %), entre otros, cómo se observa en Ilustración 1.2 (Gobierno de Argentina, 2009).

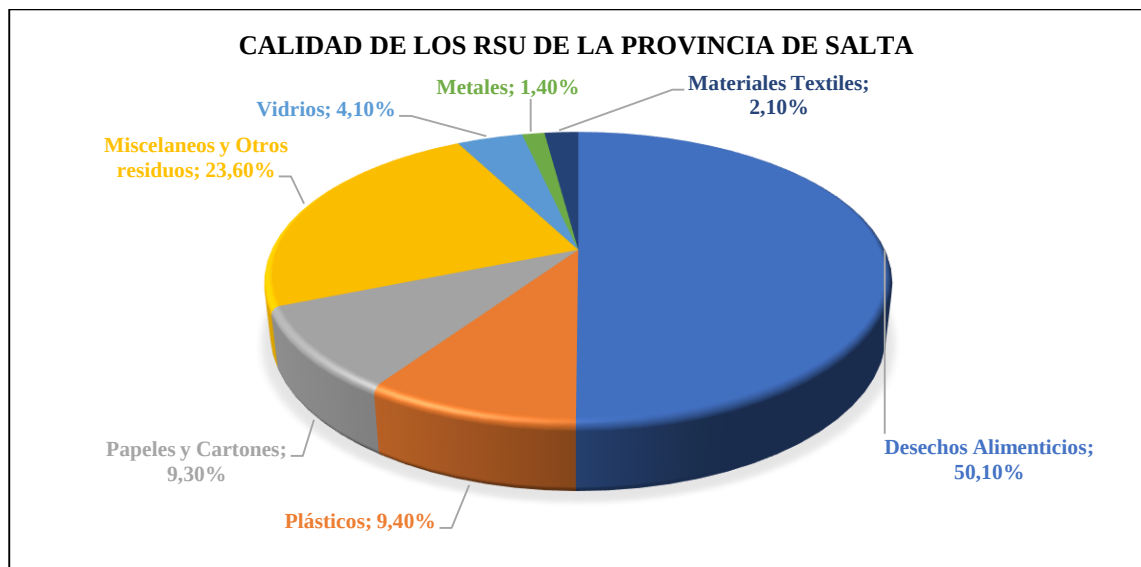


Ilustración 1.2: Calidad de los RSU en Salta

La disposición de entre el 40 % y el 50 % de los residuos en basurales a cielo abierto en Salta provoca serios problemas ambientales y de salud. Entre ellos, se destacan la

contaminación de suelos y aguas, la emisión de gases, y la creación de condiciones insalubres que afectan a las comunidades cercanas y a quienes trabajan en estos sitios.

La separación de plásticos en los RSU es crucial para abordar la creciente problemática de su acumulación. Al separar los plásticos, se abren diversas alternativas para su reutilización y tratamiento. Entre estas alternativas se incluyen el reciclaje mecánico, que transforma los plásticos en nuevos productos mediante procesos de trituración y reprocesamiento; el reciclaje químico, que descompone los plásticos en sus componentes básicos para producir materias primas utilizables; y la conversión en combustible, que convierte los plásticos en energía a través de procesos especializados.

Dada la dificultad en la gestión de los residuos sólidos urbanos en Argentina y, en particular, en la provincia de Salta, nuestro proyecto se enfoca en la reducción efectiva de RSU mediante el aprovechamiento de plásticos reciclados para la producción de combustible. Esta iniciativa busca no solo disminuir la cantidad de residuos plásticos que actualmente contribuyen a la contaminación ambiental y a los riesgos sanitarios, sino también promover una alternativa más sostenible para la disposición final de estos desechos.

1.5 PRODUCTO FINAL: COMBUSTIBLE

Los combustibles son sustancias compuestas principalmente por elementos químicos como carbono (C), hidrógeno (H), y, en menor medida, azufre (S), nitrógeno (N), y oxígeno (O) (Martínez & Gómez, 2019). Al reaccionar con un oxidante, sustancialmente oxígeno (O₂), en un proceso de combustión, estos elementos experimentan una reacción fuertemente exotérmica, que libera energía en forma de calor (Smith, Van Ness, & Abbott, 2021). Esta liberación de energía es la base del uso de los combustibles en la generación de calor, electricidad y movimiento en diversas aplicaciones industriales.

Los combustibles pueden clasificarse en sólidos, líquidos y gaseosos, dependiendo de su estado físico de agregación, y cada tipo presenta características particulares que influyen en su eficiencia y aplicabilidad (Ritchie & Roser, 2020). Entre sus propiedades más relevantes se encuentran el poder calorífico, que mide la cantidad de energía liberada durante la combustión completa; la facilidad de almacenamiento y transporte, que determina su viabilidad económica; y la densidad energética, que influye en la cantidad de energía que se puede obtener por unidad de volumen o masa (Demirbas, 2016).

Por otro lado, los combustibles pueden ser de origen fósil, como el petróleo, gas natural y carbón, o de origen renovable, como los biocombustibles y otros derivados de biomasa. La

elección y uso de un tipo específico de combustible dependen de varios factores, incluyendo su disponibilidad, costo, impacto ambiental y adecuación a las necesidades energéticas del proceso o aplicación en cuestión (IEA, 2019).

En la actualidad, el estudio y desarrollo de combustibles alternativos, como aquellos obtenidos mediante el proceso de pirólisis de plásticos reciclados, adquiere una importancia creciente en el contexto de la transición energética global y la búsqueda de soluciones que minimicen el impacto ambiental.

Para entender cómo el plástico puede convertirse en combustible mediante pirolisis, es útil visualizar el proceso en términos sencillos. El proceso de pirólisis es un proceso térmico que descompone materiales, como el plástico, en ausencia de oxígeno a temperaturas muy altas. Durante este proceso, las largas cadenas de polímeros que conforman el plástico se rompen en moléculas más pequeñas, produciendo gases, líquidos y un sólido residual. Este proceso permite convertir el plástico en combustibles líquidos que pueden ser utilizados como fuente de energía. (Kumar, 2020).

1.6 MATERIA PRIMA: PLÁSTICOS

Los plásticos son materiales orgánicos, polímeros sintéticos o semisintéticos, que se obtienen a partir de la polimerización de monómeros derivados principalmente del petróleo y del gas natural (Brydson, 1999). Su versatilidad, resistencia y bajo costo de producción los han convertido en uno de los materiales más utilizados en la actualidad, con aplicaciones que abarcan desde la industria automotriz hasta la fabricación de productos de consumo masivo (Andrady & Neal, 2009).

Existen diversos tipos de plásticos, los cuales pueden clasificarse según su estructura interna, como termoestables, termoplásticos y elastómeros (Andrady & Neal, 2009).

- **Termoestables:** Estos plásticos poseen una estructura interna de macromoléculas entrecruzadas que forman una red tridimensional. Debido a esta configuración, solo pueden moldearse una vez, ya que al someterlos a calor se descomponen en lugar de fundirse. Aquí se pueden encontrar la resina de poliéster, resina epoxi y melanina.
- **Termoplásticos:** Los termoplásticos tienen macromoléculas dispuestas sin entrelazarse, unidas por fuerzas débiles, lo que les permite ablandarse con el calor y ser moldeados repetidamente. Los ejemplos comunes de éstos son el polietileno (PE), polipropileno (PP) y el cloruro de polivinilo (PVC).

- **Elastómeros:** Este grupo se caracteriza por una estructura molecular que les permite recuperar su forma original tras la deformación, mostrando una gran elasticidad. Entre los elastómeros más conocidos están el caucho, el neopreno y la silicona.

Entre las características más importantes de los plásticos destacan su ligereza, resistencia a la corrosión, durabilidad, y propiedades aislantes tanto térmicas como eléctricas (Thompson et al., 2009). Estas características, combinadas con su capacidad para ser fabricados en una amplia variedad de formas y colores, hacen que los plásticos sean indispensables en innumerables aplicaciones industriales y domésticas. Sin embargo, su durabilidad también representa un desafío ambiental, ya que la mayoría de los plásticos convencionales no se descomponen fácilmente, contribuyendo así a la acumulación de residuos en el medio ambiente.

En el contexto de la producción de combustible a partir de plásticos reciclados mediante pirolisis, es esencial analizar tanto la disponibilidad de los diferentes tipos de plásticos como su rendimiento en el proceso. En el estudio de mercado, se evaluará la disponibilidad de plásticos reciclados en la región, mientras que en el estudio técnico se determinarán los rendimientos de la pirolisis para cada tipo de plástico. Con base en estos análisis, se determinarán los tipos de plásticos y las proporciones a utilizar, teniendo en cuenta que, aunque el rendimiento productivo es prioritario, la disponibilidad de los materiales es una limitante en la selección final.

2 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, se desarrollarán los conceptos fundamentales necesarios para comprender el proceso de producción de combustible a partir de la pirólisis de plástico reciclado. Este marco abarca los principios teóricos de cada etapa clave del proceso, con el objetivo de establecer una base técnica que permita analizar y diseñar el proceso productivo de manera rigurosa. La intención es proporcionar una comprensión detallada de cada una de estas etapas, lo cual facilitará el estudio de su aplicación en condiciones locales y la adaptación de sus parámetros para optimizar la eficiencia del proyecto.

2.1 PROCESO DE PIRÓLISIS

El proceso de pirólisis de polímeros es una técnica termoquímica crucial en la transformación de residuos plásticos en productos de mayor valor, como combustibles líquidos, gases y otros compuestos útiles. Este proceso se realiza en ausencia de oxígeno, lo que evita la combustión del material, y se lleva a cabo bajo una atmósfera inerte, sustancialmente de nitrógeno o argón, lo que previene reacciones secundarias indeseadas. El proceso de pirólisis involucra el craqueo térmico, un proceso de degradación de los enlaces químicos de los polímeros, que descompone las largas cadenas moleculares en compuestos más simples.

2.1.1 Tipos de Pirólisis

El proceso de pirólisis puede dividirse en dos categorías principales según el uso o no de catalizadores:

- **Pirólisis Térmica o No Catalítica:** El proceso de pirólisis térmica es el método más sencillo y se basa únicamente en la aplicación de calor. En este proceso, los plásticos son calentados a temperaturas elevadas, generalmente en el rango de 400°C a 900°C, en una atmósfera inerte, como nitrógeno, para evitar la oxidación. La descomposición del plástico ocurre debido a la ruptura de los enlaces carbono-carbono en las cadenas poliméricas, generando una mezcla de productos que pueden incluir gases, líquidos y residuos sólidos como carbón. Los productos líquidos obtenidos pueden ser refinados para producir combustibles como diésel, nafta o queroseno, mientras que los gases, incluyen metano, etano, propano y otros hidrocarburos ligeros, pueden ser utilizados como fuente de energía para el propio proceso. El proceso de pirólisis térmica tiene ciertas desventajas, como la necesidad de altas temperaturas y tiempos prolongados de reacción, lo que incrementa el consumo energético. Además, los productos líquidos tienden a tener una mezcla heterogénea y su

calidad puede ser inferior, requiriendo etapas adicionales de refinamiento para mejorar su valor comercial.

- **Pirólisis Catalítica:** El proceso de pirólisis catalítica introduce un catalizador en el proceso, lo que permite llevar a cabo la degradación de los polímeros a temperaturas más bajas y con tiempos de reacción más cortos en comparación con la pirólisis térmica. La principal ventaja de la pirólisis catalítica es que el uso de catalizadores, como zeolitas, óxidos metálicos o catalizadores ácidos, facilita la ruptura de los enlaces moleculares a menor energía y mejora la selectividad del proceso hacia la producción de hidrocarburos líquidos de alta calidad. Las temperaturas típicas en este caso pueden variar entre 300°C y 600°C, lo que reduce los costos energéticos asociados al proceso. Además, los catalizadores no solo aceleran las reacciones de craqueo, sino que también permiten controlar mejor la composición de los productos, favoreciendo la formación de combustibles líquidos en lugar de gases o carbón. Por ejemplo, algunos catalizadores pueden incrementar la producción.

2.1.2 Mecanismos de Degradación

1) Etapa de Iniciación: las cadenas largas del polímero comienzan a romperse debido al calentamiento controlado en ausencia de oxígeno. Esto sucede porque el calor provoca la ruptura de enlaces covalentes carbono-carbono en puntos débiles de la estructura del polímero, como donde hay impurezas, estrés mecánico o reprocesamiento previo.

Con esto, se generan radicales libres³ primarios, que son fragmentos reactivos de la cadena polimérica, como se observa en Ilustración 2.1. Estos radicales pueden ser cadenas largas o cortas dependiendo del lugar exacto donde ocurre la ruptura.

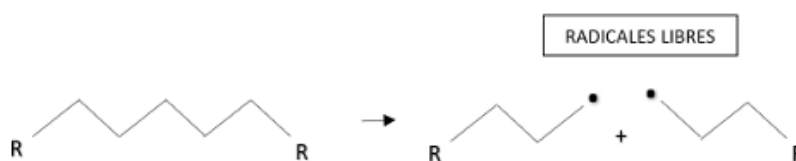


Ilustración 2.1: Etapa de iniciación

³ Radicales libres: átomos, moléculas o fragmentos reactivos con un electrón no apareado en su capa externa, lo que los hace inestables y propensos a unirse a otras moléculas.

2) Etapa de Propagación: Como se aprecia en Ilustración 2.2, los radicales formados en la etapa anterior siguen reaccionando. Aquí se produce la ruptura de los enlaces β^4 , es decir, enlaces cercanos al radical principal.

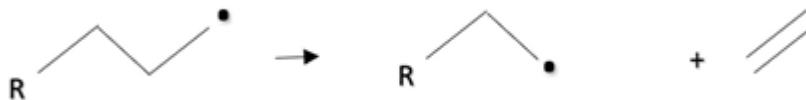


Ilustración 2.2: Etapa de propagación

Esto puede llevar a dos posibles mecanismos de estabilización:

- Hidrogenación⁵ intramolecular o intermolecular: Los radicales toman átomos de hidrógeno de otras cadenas cercanas para estabilizarse, según Ilustración 2.3. Esto puede formar compuestos más estables.

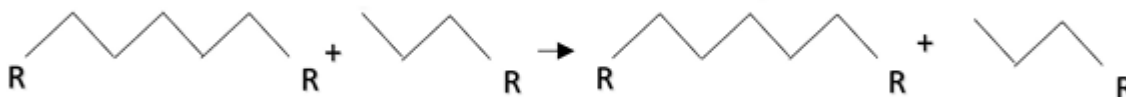


Ilustración 2.3: Hidrogenación opción 1

- Formación de compuestos insaturados⁶ (olefinas) y nuevos radicales:
 - Transposición de hidrógeno: Un átomo de hidrógeno se mueve dentro de la molécula, dejando un nuevo radical en otra posición, como se detalla en Ilustración 2.4.

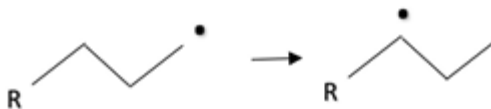


Ilustración 2.4: Hidrogenación opción 2

- Ruptura del enlace β : Genera dos productos: una olefina⁷ (compuesto insaturado) y un nuevo radical. Esto ocurre en dos pasos:

⁴ Enlaces β : Enlaces carbono-carbono adyacentes al carbono con el radical libre, propensos a romperse durante la pirólisis

⁵ Hidrogenación: Adición de hidrógeno a una molécula para estabilizar o saturar enlaces dobles.

⁶ Compuestos insaturados: Contienen enlaces dobles o triples carbono-carbono ($C=C$, $C\equiv C$) y tienen capacidad de reaccionar con otros compuestos, como olefinas o alquinos.

⁷ Olefinas: Llamadas también alquenos, son compuestos insaturados que tienen al menos un enlace doble carbono-carbono ($C=C$) en su estructura

i) Primera ruptura: Se produce una olefina y un radical largo⁸.

ii) Segunda ruptura: Forma una nueva olefina y un radical corto⁹.

En esta etapa, a altas temperaturas, predominan rupturas β , generando más productos gaseosos (cadenas cortas). Si el material contiene más hidrógeno en su estructura, se favorece la estabilización¹⁰ mediante hidrogenación, formando compuestos saturados¹¹ (como alcanos¹²) o insaturados (como olefinas).

3) Etapa de Terminación: los radicales formados durante la propagación se estabilizan mediante dos posibles reacciones:

- Recombinación: Dos radicales se unen para formar un compuesto nuevo y estable.
- Desproporcionamiento: Ocurre cuando dos radicales interactúan, resultando en la formación de un alcano (compuesto saturado) y una olefina (compuesto insaturado).

2.1.3 Variables

Las variables de operación del proceso son fundamentales para determinar tanto la cantidad como la calidad de los productos obtenidos mediante pirólisis. Estas variables incluyen: la temperatura máxima de degradación, la tasa de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión, el tamaño del plástico utilizado, el tipo de plástico, el tipo de reactor, entre otras.

- Temperatura

La temperatura en el proceso de pirólisis tiene un rol fundamental en la distribución de productos entre las fases sólida, líquida y gaseosa. En rangos bajos, generalmente entre 300-400°C, se favorece la formación de fracciones líquidas con alta viscosidad y compuestos pesados. Este rango es especialmente adecuado para la producción de bioaceite, que contiene una mayor proporción de hidrocarburos densos y menos volátiles. A medida que la temperatura aumenta a aproximadamente 500°C, se incrementa la fracción gaseosa debido a la descomposición más completa de las moléculas orgánicas, lo cual produce compuestos volátiles de menor peso molecular,

⁸ Radical largo: Fragmento de cadena carbonada que aún contiene muchos átomos de carbono

⁹ Radical corto: Es un fragmento más pequeño de la cadena, con menos átomos de carbono

¹⁰ Estabilización: conversión de radicales libres inestables en moléculas estables mediante reacciones químicas

¹¹ Compuestos saturados: Son moléculas que tienen enlaces simples carbono-carbono (C-C) y están completamente "llenos" de hidrógenos, como los alcanos

¹² Alcano: hidrocarburo saturado que tiene solo enlaces simples carbono-carbono (C-C)

reduciendo la generación de residuos sólidos (Ojha et al., 2021; Fakhrhoseini & Dastanian, 2013).

Cuando se supera este rango y se alcanzan temperaturas de hasta 700°C o más, el proceso prioriza la producción de gases ligeros, como el hidrógeno y el metano, y la fase sólida se convierte en carbón fijo, conocido como biochar, que puede tener usos adicionales en aplicaciones industriales. Este comportamiento depende en parte del tipo de plástico y de su comportamiento térmico, por lo que el control de la temperatura es clave para optimizar la producción de la fase deseada en función del uso final previsto de los productos generados (Miskolczi et al., 2009; Yang et al., 2018).

- Tasa de Calentamiento

La tasa de calentamiento en la pirólisis de plásticos tiene un impacto decisivo en los productos generados y su composición. En general, tasas de calentamiento bajas (aproximadamente 5-10 °C/min) favorecen la formación de productos sólidos (char) debido a que el material permanece más tiempo en el reactor, permitiendo que las macromoléculas se descompongan lentamente y produzcan menos productos volátiles. Esto genera una menor proporción de líquidos y más residuos sólidos.

Por otro lado, a tasas de calentamiento más altas, como 20-50 °C/min, se incrementa la proporción de líquidos obtenidos en el proceso. Este comportamiento se debe a que la aplicación rápida de calor provoca una descomposición más brusca de las cadenas de polímero, favoreciendo la formación de compuestos volátiles antes de que puedan reformarse en estructuras más complejas, como el char. Algunos estudios incluso indican que, con tasas de calentamiento superiores a 50 °C/min, se obtiene una mayor fracción de productos líquidos, que pueden llegar a representar hasta el 60-70% de la masa inicial del plástico procesado, especialmente en plásticos como el polipropileno y el polietileno de alta densidad (Lah et al., 2013; Cheung et al., 2011).

Por último, con tasas de calentamiento muy altas (por encima de 100 °C/min), el proceso tiende a generar mayores cantidades de gases ligeros, ya que la velocidad de calentamiento acelera la descomposición del polímero y la formación de compuestos volátiles. Esta condición es útil en sistemas de pirólisis rápida o flash, donde el objetivo es maximizar la producción de productos gaseosos o de fracción líquida con un contenido bajo de compuestos viscosos (Akkouche et al., 2017).

- Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia es el periodo que transcurre desde la primera reacción pirolítica provocada por la temperatura, y está influenciado por el tiempo de calentamiento. Este tiempo genera una variedad de productos, ya que un mayor tiempo de residencia en el reactor promueve una mayor fracción gaseosa, al tiempo que reduce las fracciones líquida y sólida. Cabe señalar que durante este intervalo se formarán radicales, los cuales pueden dar lugar a reacciones secundarias y terciarias. En Tabla 2.1 se resume el efecto del tiempo de residencia y la tasa de calentamiento según lo expuesto (Lee, Lu, & Chang, 2020), (Vijayakumar & Sebastian, 2018).

Efecto de Tasa de Calentamiento y Tiempo de Residencia				
Pirólisis	Tasa de Calentamiento	Tiempo de Residencia	Temperatura de Proceso	Fracción Generada
Lenta	10 - 100 °C	60 - 240 min	350 - 600 °C	Líquida y gaseosa
Rápida	> 100°C	30 - 60 min	400 - 650 °C	Líquida en su mayoría
Flash	> 100°C	1 - 30 min	450 - 900 °C	Gaseosa en su mayoría

Tabla 2.1: Efecto de tasa de calentamiento y tiempo de residencia

- Presión

La presión en sí misma no impacta directamente el proceso de pirólisis, pero influye en la temperatura requerida para la degradación de los materiales. En reactores que operan bajo presión de vacío, se necesita una menor temperatura de degradación. De acuerdo con lo revisado en la literatura, a presiones elevadas se favorece la generación de productos en fase gaseosa, mientras que se reduce la fracción líquida (Anuar Sharuddin, Abnisa, Wan Daud, & Aroua, 2016).

- Efecto del tamaño del plástico utilizado

El tamaño del plástico con el cual se alimenta a los reactores de pirólisis es de interés debido a que a mayor tamaño la transferencia de calor y de masa disminuye dándose una reacción únicamente superficial generando rendimiento de la reacción global bajos debido a que la conversión disminuye por lo que es aconsejable trabajar con plástico de dimensiones pequeñas para una generación de líquidos importantes.

Un intervalo adecuado está comprendido entre 2 mm y 10 mm, ya que permite una transferencia de calor y masa eficiente, favoreciendo una conversión homogénea del material y optimizando el rendimiento del proceso. Partículas con dimensiones

superiores a 10 mm pueden presentar limitaciones en la reacción, dado que la pirólisis ocurre principalmente en la superficie, dejando fracciones del material sin descomponerse completamente. Por otro lado, tamaños inferiores a 2 mm pueden generar complicaciones operativas, como dificultades en la alimentación del reactor y la necesidad de un mayor pretratamiento.

- Efecto del tipo de plástico utilizado

La selección del tipo de plástico en el proceso de pirólisis influye directamente en el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos, especialmente en la fracción líquida. Los termoplásticos difieren en su estructura molecular, y estas variaciones afectan la proporción de cada fase generada. Aquellos plásticos con estructuras no aromáticas tienden a descomponerse principalmente en fracciones gaseosas debido a su facilidad para romperse en moléculas de menor peso molecular. En cambio, los polímeros con radicales aromáticos favorecen una mayor producción de fracción líquida, ya que su mayor estabilidad térmica permite la formación de compuestos líquidos más complejos.

Este fenómeno muestra la importancia de clasificar los plásticos antes del proceso de pirólisis, con el fin de optimizar la eficiencia y maximizar el valor de los productos resultantes, ajustando así el proceso a las características de la materia prima disponible.

- Tipo de Reactor

En el proceso de pirólisis de plásticos, la selección del reactor es un factor clave que influye en la eficiencia de la conversión térmica, la calidad de los productos obtenidos y la viabilidad operativa. Existen diversos tipos de reactores que pueden emplearse, cada uno con características específicas en cuanto a diseño, transferencia de calor y control del proceso:

1. Reactor de Lote o Batch: Este tipo de reactor opera por cargas discretas de material, permitiendo un control detallado de las condiciones de reacción. Se carga una cantidad determinada de plástico en la cámara de reacción, donde se somete a calentamiento en ausencia de oxígeno hasta alcanzar las temperaturas de pirólisis. Una vez finalizado el proceso, los productos se extraen antes de proceder a una nueva carga. Su principal ventaja es la simplicidad operativa y la facilidad de control

del proceso, aunque presenta limitaciones en términos de continuidad y productividad.

2. **Reactor de Lecho Fijo:** En este reactor, el plástico es colocado en un lecho estático y es sometido a calentamiento a través de conducción y convección térmica. La pirólisis ocurre en condiciones relativamente homogéneas, lo que permite obtener productos líquidos con composiciones consistentes. Sin embargo, la transferencia de calor puede ser limitada, especialmente cuando se procesan partículas plásticas de gran tamaño, lo que puede generar zonas con temperaturas no uniformes y afectar el rendimiento del proceso.
3. **Reactor de Lecho Fluidizado:** Este diseño emplea un flujo de gas caliente que mantiene en suspensión las partículas plásticas, creando un medio fluidizado que mejora la transferencia de calor y masa. La temperatura se distribuye de manera más uniforme dentro del reactor, optimizando la conversión de los polímeros en productos gaseosos y líquidos. Su eficiencia y capacidad de procesamiento continuo lo hacen atractivo para escalas industriales, aunque su diseño y operación requieren mayor inversión y control técnico.
4. **Reactor de Lecho Ascendente o Descendente:** Este tipo de reactor combina características del lecho fluidizado con una dinámica de flujo que mejora la transferencia de calor y la mezcla de los materiales. Los plásticos son alimentados en una corriente de gas caliente que los impulsa en un movimiento controlado dentro de la cámara de reacción, permitiendo una conversión más homogénea y eficiente.
5. **Reactor de Tornillo o de Transporte:** En este sistema, un tornillo sinfín transporta el plástico a través de un tubo calefaccionado donde se lleva a cabo la pirólisis. Su diseño permite el procesamiento continuo de materiales y un mejor control del tiempo de residencia, lo que facilita la conversión eficiente de los polímeros. Es una opción adecuada para escalas industriales debido a su capacidad para manejar volúmenes mayores de plástico con alta eficiencia térmica.
6. **Reactor Rotatorio:** En este diseño, los plásticos son introducidos en un tambor rotatorio donde se someten a calentamiento indirecto en ausencia de oxígeno. La rotación del tambor facilita la mezcla del material y mejora la uniformidad de la temperatura. Es una opción utilizada en plantas de pirólisis de tamaño mediano a grande, con una operación relativamente simple y continua.

A fines de este proyecto, se decide emplear el reactor Batch por su menor inversión inicial, facilidad operativa y flexibilidad en el procesamiento de distintos tipos de plásticos sin

necesidad de pretratamientos complejos. Su diseño permite un control preciso de variables como temperatura y tiempo de residencia, optimizando el rendimiento y la calidad del diésel obtenido. Además, presenta costos de mantenimiento reducidos y una mayor facilidad para escalabilidad, ya que pueden agregarse unidades adicionales sin modificar la infraestructura existente. Su operación discontinua también permite realizar ajustes y controles intermedios, asegurando una mayor estabilidad en el proceso y facilitando su implementación en fases iniciales con posibilidad de futura expansión.

2.1.4 Materias Primas

A continuación, se describen las materias primas que se adecuarían a este proyecto, con un enfoque en los plásticos reciclados. Estos materiales, debido a su abundancia y capacidad de ser transformados mediante pirólisis, presentan una opción viable para la obtención de productos de valor agregado:

- **Tereftalato de Polietileno (PET):** Es un polímero termoplástico de la familia de los poliésteres, compuesto por ácido tereftálico y etilenglicol. Se utiliza principalmente en envases de bebidas y alimentos debido a su resistencia mecánica y barrera frente a gases. Su punto de fusión ronda los 250°C, lo que facilita su reciclaje mediante procesos de trituración y fusión. El PET reciclado puede reutilizarse en la fabricación de fibras textiles, láminas y nuevas botellas. Es el plástico más reciclado a nivel global debido a su versatilidad y durabilidad.
- **Polietileno de Alta Densidad (HDPE):** Es un polímero de cadena lineal compuesto por etileno, lo que le otorga mayor densidad y rigidez en comparación con otros polietilenos. Se caracteriza por su alta resistencia química y al impacto, y se utiliza en envases industriales, botellas de productos de limpieza y tuberías. Su temperatura de fusión oscila entre 120-130°C, lo que facilita su procesamiento por extrusión e inyección. El HDPE reciclado se emplea en productos como contenedores, bancos y tuberías de riego, destacándose por su durabilidad.
- **Policloruro de Vinilo (PVC):** Es un polímero termoplástico que contiene cloro, lo que le proporciona alta resistencia al fuego y a los productos químicos. Se presenta en versiones rígidas, usadas en tuberías y perfiles de ventanas, y flexibles, empleadas en cables y recubrimientos. Su reciclaje es más complejo debido a los aditivos utilizados en su formulación, como plastificantes y estabilizadores. El PVC reciclado se utiliza en productos como tuberías de menor exigencia y suelos, pero su manejo requiere estrictos controles ambientales por la posible liberación de sustancias tóxicas.

- **Polietileno de Baja Densidad (LDPE):** Es un plástico flexible y de baja densidad, con una estructura molecular ramificada que lo hace menos rígido que otros polietilenos. Se utiliza principalmente en la fabricación de películas plásticas, bolsas y recubrimientos para envases. Su temperatura de fusión baja (105-115°C) facilita su procesamiento, aunque su reciclaje es menos común debido a la dificultad de manejar las películas delgadas. El LDPE reciclado se emplea en productos como bolsas de basura y geomembranas, aunque su valor de reciclado es menor.
- **Polipropileno (PP):** Es un polímero termoplástico de estructura semicristalina, lo que le otorga alta resistencia térmica y química. Se utiliza en envases de alimentos, componentes automotrices y productos médicos gracias a su capacidad de soportar esterilización. Su punto de fusión es de aproximadamente 160°C, lo que facilita su reciclaje mediante técnicas de extrusión. El PP reciclado se emplea en productos como macetas, mobiliario y piezas automotrices, manteniendo buenas propiedades mecánicas tras varios ciclos de reciclado.
- **Poliestireno (PS):** Es un polímero amorfo derivado del estireno, que se utiliza en su forma sólida y expandida (EPS). Es un material ligero, transparente y frágil en estado sólido, utilizado en envases desechables y bandejas de alimentos, mientras que el EPS se emplea como aislante y embalaje. Su reciclaje es complicado debido a su baja densidad, especialmente en el caso del EPS. Sin embargo, el PS reciclado puede utilizarse en productos como molduras, aislantes térmicos y materiales de construcción.

Si bien existen varios tipos de polímeros termoplásticos que podrían adecuarse a un proceso de pirólisis, como se ha descrito previamente, se ha decidido utilizar únicamente polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE) en este proyecto. Esta elección se fundamenta en su alta disponibilidad, su estabilidad durante el proceso de pirólisis, y las características específicas que estos materiales presentan en cuanto a rendimiento y eficiencia de producción.

A continuación, en Tabla 2.2 y 2.3, se realizará una caracterización detallada de los polímeros HDPE y LDPE para fundamentar esta elección, tomando en cuenta sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, eléctricas, térmicas, ópticas y tecnológicas. Esta caracterización es esencial para comprender su comportamiento en el proceso de pirólisis, optimizar las condiciones de operación y maximizar el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos.

Caracterización del Polietileno de Alta Densidad	
Propiedades generales	
Densidad	0,952 - 0,965 g/cm ³
Cristalinidad	70 - 80 %
Propiedades mecánicas	
Módulo elástico	1,07 - 1,09 Gpa
Coeficiente de Poisson	0,41 - 0,427
Resistencia mecánica de la compresión	18,6 - 24,8 Mpa
Resistencia mecánica da la flexión	30,9 - 43,4 Mpa
Resistencia mecánica da la tracción	22,1 - 31 Mpa
Tenacidad a fractura (K Ic)	1,52 - 1,82 Mpa m ^{1/2}
Comportamiento a tracción (a 25°C)	10 - 120 % de alargamiento
Dureza (a 25°C)	7,9 - 9,9 HV
Propiedades eléctricas	
Resistividad específica (a 25°C)	1x10 ¹³ - 1x10 ¹⁷ ohm m
Constante dieléctrica (a 25°C)	2,2 - 2,4
Propiedades térmicas	
Temperatura de fusión	130 - 137 °C
Coeficiente de expansión lineal (a 25°C)	60x10 ⁻⁶ - 110x10 ⁻⁶ 1/°C
Conductividad térmica (a 25°C)	0,461 - 0,502 W/mK
Capacidad calorífica específica (a 25°C)	1,75x10 ³ - 1,81x10 ³ J/kg K
Propiedades ópticas	
índice de refracción	1,53 - 1,55
Observaciones	Se trata de un metal translúcido. Menor transparencia que el LPDE
Propiedades tecnológicas	
Temperatura mínima de utilización	(-82) - (-72) °C
Temperatura máxima de utilización	113 - 129 °C
Reciclabilidad	Es reciclable
Propiedades químicas	
Resistencia a los ácidos	Muy resistente a los ácidos débiles, pero menos resistente a los fuertes.
Resistencia a los alcalinos	Tiene elevada resistencia tanto a álcalis fuertes como débiles
Resistencia a los disolventes orgánicos	Tiene una resistencia media a los disolventes orgánicos
Absorción de agua	Resistencia muy pobre frente a la oxidación a 500 °C
Resistencia al ozono	Es bastante resistente a la radiación ultravioleta
Observaciones	No se altera en presencia de agua dulce o salada. La absorción de agua y la permeabilidad al vapor de agua son muy bajas, pero en cambio la permeabilidad es grande respecto al N ₂ , O ₂ , y CO ₂ . Tiene una considerable sensibilidad a la tenso fisuración, especialmente en presencia de tensioactivos, alcoholes, ácidos orgánicos, aceites de silicona, aceites esenciales y álcalis acuosos. Se trata de un material inflamable (norma UL94)

Tabla 2.2: Características del HDPE

Caracterización del Polietileno de Baja Densidad

Propiedades generales	
Densidad	0,89 - 0,91 g/cm ³
Cristalinidad	50 - 60 % (Se trata de un polímero con un grado de cristalinidad elevado)
Observaciones	Es el tercer termoplástico más vendido y uno de las más baratos ya que se puede sintetizar a partir de materiales petroquímicos de bajo coste
Propiedades mecánicas	
Módulo elástico	0,896 - 1,55 Gpa
Coeficiente de Poisson	0,405 - 0,427
Resistencia mecánica de la compresión	25,1 - 55,2
Resistencia mecánica da la tracción	3- 4,5 Mpa
Tenacidad a fractura (K Ic)	3 - 4,5 Mpa m ^{1/2}
Comportamiento a tracción (a 25°C)	100 - 600 % de alargamiento
Dureza (a 25°C)	6,2 - 11,2 HV
Observaciones	Las fibras de vidrio proporcionan un fuerte reforzamiento. La presencia de elastómero en la cadena incrementa la resistencia al impacto, pero disminuye el módulo. Tiene buena resistencia a la fractura
Propiedades eléctricas	
Resistividad específica (a 25°C)	>1x10 ¹⁵ ohm m
Constante dieléctrica (a 25°C)	2,1 - 2,3
Observaciones	Es un buen aislante eléctrico
Propiedades térmicas	
Temperatura de transición vitrea	(-25,2) - (-15,2) °C
Temperatura de fusión	150 - 175 °C
Coeficiente de expansión lineal (a 25°C)	80x10 ⁻⁶ - 100x10 ⁻⁶ 1/°C
Conductividad térmica (a 25°C)	0,113 - 0,5167 W/mK
Capacidad calorífica específica (a 25°C)	1,87x10 ³ - 1,96x10 ³ J/kg K
Propiedades ópticas	
Índice de refracción	1,48 - 1,5
Propiedades tecnológicas	
Temperatura mínima de utilización	(-123) - (-73,2) °C
Temperatura máxima de utilización	100 - 115 °C
Reciclabilidad	Es reciclable
Propiedades químicas	
Resistencia a los ácidos	Tiene muy buena resistencia a los ácidos fuertes y débiles
Resistencia a los álcalinos	Tiene muy buena resistencia a los álcalinos fuertes y débiles
Resistencia a los disolventes orgánicos	Tiene una muy resistencia a los disolventes orgánicos
Absorción de agua	Absorbe débilmente el agua.
Resistencia al ozono	Tiene baja resistencia al ozono y a la luz.
Observaciones	Tiene muy buena resistencia al agua, tanto dulce como salada. Se trata de un material inflamable. Su resistencia a la radiación UV es baja. Normalmente es un polímero sensible a metales oxidantes como el cobre, el manganeso o el cobalto.

Tabla 2.3: Características del LDPE

El HDPE y el LDPE se distinguen por su estructura molecular y punto de fusión relativamente bajo, lo que facilita su procesamiento térmico sin la necesidad de temperaturas extremadamente elevadas. Además, ambos polímeros presentan una composición sin componentes tóxicos, a diferencia de otros materiales como el PVC, lo que simplifica el manejo de sus subproductos y minimiza los riesgos ambientales y operativos. La flexibilidad y densidad de cada tipo de polietileno permiten además la obtención de productos líquidos y gaseosos con alto potencial para ser utilizados en aplicaciones de valor agregado, como la producción de combustible.

2.1.5 Productos Generados

El proceso de pirólisis de plásticos produce una variedad de productos que se pueden dividir en dos fracciones principales: fracción gaseosa, la cual posee una parte condensable y otra no condensable, y fracción sólida. La proporción de cada fracción depende de las variables descritas anteriormente. A continuación, se detallan las características de cada una de estas fracciones:

- Fracción gaseosa

En el reactor de pirólisis, la degradación térmica de los polímeros rompe las largas cadenas moleculares, generando principalmente hidrocarburos ligeros en estado gaseoso. Estos incluyen compuestos como metano, etano, eteno, propano, propeno y butano (hidrocarburos C1-C4) que resultan del craqueo de productos intermedios formados durante la descomposición primaria de los plásticos.

A medida que aumenta la temperatura, se favorecen las reacciones secundarias¹³ y terciarias¹⁴ que intensifican el craqueo y promueven procesos de aromatización¹⁵ y deshidrogenación¹⁶. Estas reacciones generan cantidades mayores de gases ligeros como hidrógeno (H₂) y metano (CH₄). Estos gases no solo tienen valor comercial, sino que pueden ser aprovechados para alimentar el proceso de pirólisis, optimizando la eficiencia energética.

¹³ Reacciones Secundarias: Ocurren después de la descomposición primaria, transformando los productos iniciales en otros más simples o complejos, como gases o aromáticos

¹⁴ Reacciones Terciarias: Son reacciones que ocurren en etapas avanzadas del proceso de pirólisis, donde los productos secundarios se siguen degradando, formando residuos sólidos y productos aromáticos.

¹⁵ Reacciones de Aromatización: Transforman hidrocarburos alifáticos en aromáticos, como el benceno, generando compuestos más estables en condiciones de alta temperatura.

¹⁶ Deshidrogenación: Eliminan átomos de hidrógeno de una molécula, formando compuestos insaturados y liberando hidrógeno.

- Fracción sólida

La fracción sólida, a menudo llamada residuo carbonoso, es un subproducto del proceso de pirólisis y se genera principalmente a través de reacciones terciarias que ocurren en la fase gaseosa. Estas reacciones secundarias y terciarias conducen a la formación de compuestos carbonosos sólidos cuando algunos de los productos gaseosos no se descomponen completamente o cuando ocurren.

2.2 PROCESO DE CONDENSACIÓN

La condensación es el proceso físico mediante el cual una sustancia en estado gaseoso cambia a estado líquido como resultado de una disminución de temperatura o un aumento de presión. Este fenómeno ocurre cuando las moléculas de vapor pierden suficiente energía térmica, reduciendo su movilidad y permitiendo la formación de enlaces intermoleculares que conducen a la fase líquida. Es un proceso exotérmico, ya que durante la transición de fase se libera calor latente al entorno.

2.2.1 Productos Generados

La mezcla gaseosa resultante del reactor incluye tanto gases condensables como gases no condensables. Esta mezcla es redirigida a un sistema de condensación, donde los hidrocarburos de mayor peso molecular (gases condensables) se enfrían y se separan, formando la fracción líquida o aceite de pirólisis. En cambio, los gases no condensables permanecen en fase gaseosa y conforman la fracción gaseosa final.

La diferencia entre gases condensables y no condensables se debe a las propiedades físicas y al peso molecular. Los hidrocarburos alifáticos¹⁷ y los hidrocarburos aromáticos¹⁸ de alto peso molecular tienden a tener puntos de ebullición más altos, lo que permite su condensación en el sistema. Por otro lado, los gases ligeros, con pesos moleculares más bajos, no pueden ser fácilmente condensados y permanecen en estado gaseoso.

La fracción líquida o aceite de pirólisis obtenido a partir de la condensación es una mezcla compleja de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, cuyos componentes van desde el pentano (C5) hasta hidrocarburos de alto peso molecular como el dotetracontano (C42). Esta fracción líquida puede ser refinada para obtener productos valiosos como nafta, diésel y

¹⁷ Hidrocarburos Alifáticos: Compuestos formados por cadenas lineales o ramificadas de carbono, que pueden ser saturados (alcanos) o insaturados (alquenos, alquinos).

¹⁸ Hidrocarburos Aromáticos: Son compuestos cíclicos estables, como el benceno, caracterizados por su estructura en anillos con enlaces conjugados.

queroseno. No obstante, debido a la variedad de compuestos presentes, este aceite suele requerir procesos de post-tratamiento como destilación fraccionada¹⁹ e hidrotratamiento²⁰ para mejorar la calidad y estabilidad de los productos finales, asegurando su idoneidad como combustibles comerciales.

2.3 PROCESO DE DESTILACIÓN

La destilación es un proceso de separación física basado en las diferencias en los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla líquida. Consiste en la vaporización selectiva de los componentes con menor temperatura de ebullición y su posterior condensación en un sistema controlado, permitiendo la obtención de productos con una mayor pureza.

Este proceso se fundamenta en la relación entre la presión de vapor de los componentes y la temperatura del sistema. A medida que un líquido se calienta, la presión de vapor de sus componentes aumenta hasta igualar la presión externa, momento en el cual ocurre la ebullición. Durante la vaporización, las moléculas de los componentes más volátiles escapan primero, enriqueciendo la fase gaseosa con su presencia. Posteriormente, al enfriar los vapores en un condensador, estos regresan al estado líquido y pueden ser recolectados en fracciones diferenciadas.

2.3.1 Productos Generados

Una vez obtenida la fracción líquida a partir del proceso de pirólisis y posterior condensación, es necesario separar sus hidrocarburos para obtener productos específicos y de mayor valor comercial, como nafta, diésel y queroseno. La destilación es el método de separación ideal debido a su eficacia para dividir los componentes de una mezcla líquida sin alterar su estructura química.

Ajustando las temperaturas de destilación, se pueden extraer diferentes componentes uno a uno, logrando una separación precisa que optimiza el aprovechamiento de los productos obtenidos del aceite pirolítico. Los productos (InfoLEG, 2002), que se logran obtener de este aceite se presentan a continuación:

¹⁹ Destilación Fraccionada: Proceso de separación de líquidos basándose en sus diferentes puntos de ebullición, usado para obtener fracciones puras como nafta o diésel.

²⁰ Hidrotratamiento: Proceso de refinación donde se usan hidrógeno y catalizadores para eliminar impurezas y saturar enlaces en los productos de pirólisis.

- Nafta: conocida internacionalmente como “gasolina”, se obtiene a una temperatura de 190°C. Dicho combustible presenta un índice de octanaje²¹ RON (*Research Octane Number*)²² que varía entre 93 y 98, en cuanto al contenido de azufre, puede oscilar entre 10 y 150 ppm. Dichas características dependen de la calidad de la misma.
- Diésel Grado 2: se consigue en el intervalo de 190°C a 290°C. Es un combustible con un contenido máximo de azufre de 500 ppm (partes por millón). Este gasoil es utilizado principalmente en vehículos de transporte pesado, maquinaria agrícola e industrial, y motores diésel de tecnología menos avanzada. Tiene un índice de cetano²³ de 46, más bajo en comparación con el gasoil de mayor grado, lo que afecta su eficiencia de combustión.
- Diésel Grado 3: se logra dicho combustible en el rango de 290°C a 340°C. Es un combustible de alta calidad con un contenido de azufre significativamente reducido, que no puede superar las 10 ppm. Está diseñado para motores de tecnología más avanzada. Gracias a su mayor índice de cetano, 48, este combustible mejora el rendimiento del motor, reduce las emisiones contaminantes y aumenta la durabilidad del sistema de escape.
- Residuo atmosférico: para temperaturas superiores a 340°C, se presentan los compuestos que no se volatilizan. Es una fracción de alto peso molecular que puede ser sometida a procesos adicionales de refinamiento o empleada en la formulación de otros productos derivados del petróleo, como aceites pesados y asfaltos.

2.4 CONCLUSIÓN

Considerando los aspectos analizados a lo largo del presente capítulo y con el propósito de establecer con precisión los lineamientos técnicos para los capítulos subsiguientes, se determina que el proceso de conversión seleccionado es la pirólisis térmica, la cual se fundamenta exclusivamente en la aplicación de temperatura en ausencia de oxígeno, sin la intervención de catalizadores. Para dicho proceso, se empleará un reactor discontinuo por lotes, cuya elección se justifica por su menor inversión inicial, facilidad operativa y flexibilidad para procesar distintos tipos de plásticos sin requerir pretratamientos complejos. Como materia prima, se utilizará polietileno de alta y baja densidad (HDPE y LDPE, respectivamente), dada su disponibilidad en residuos plásticos y su adecuado comportamiento térmico para la

²¹ Índice de Octanaje: Mide la resistencia del combustible a la detonación o autoignición en motores de combustión interna, donde un valor más alto indica mayor resistencia.

²² RON: Unidad de medida de la resistencia del combustible a la detonación.

²³ Índice de Cetano: Mide la rapidez de encendido del combustible diésel en un motor, donde un valor más alto indica una mejor calidad de combustión.



generación de productos de valor agregado. Como resultado de la pirólisis y su posterior tratamiento, se obtendrán Diésel Grado 2 y Diésel Grado 3, combustibles que cumplen con estándares de calidad y composición adecuada para su aprovechamiento en aplicaciones industriales. Finalmente, las demás variables descritas a lo largo del presente capítulo serán detalladas y justificadas en los capítulos siguientes, asegurando un análisis técnico integral del proceso.

3 ESTUDIO DE MERCADO

Este capítulo presenta un análisis exhaustivo de los factores clave que impactan directamente en el proyecto propuesto, que se centra en la producción de diésel mediante el proceso de pirólisis de plásticos reciclados. Este estudio proporciona una visión integral del entorno económico y comercial en el que se desarrollará el proyecto, considerando tanto aspectos energéticos como de suministro.

En primer lugar, se analiza la balanza comercial de Argentina, específicamente las exportaciones e importaciones de diésel. Este análisis destaca la relevancia de estos flujos comerciales para la economía nacional y su impacto en la oferta energética interna. Se examinan las fluctuaciones en los volúmenes y valores de diésel exportado e importado para evaluar la competitividad del sector y su relación con los mercados internacionales.

A continuación, el estudio se enfoca en la oferta de diésel, examinando el panorama competitivo de las principales empresas productoras, los productos disponibles y los precios históricos. Aunque el proyecto está centrado en el autoconsumo del diésel producido, entender el mercado es fundamental, ya que estos productores sería competencia del proyecto en caso de que se evalúe la posibilidad de adquirir combustible de terceros en lugar de depender únicamente de la producción interna.

Además, el estudio aborda la demanda de diésel tanto a nivel nacional como en la provincia de Salta, analizando patrones de consumo y proporcionando proyecciones futuras. Este apartado resulta crucial para comprender las tendencias del mercado y cómo el proyecto podría alinearse con las necesidades energéticas proyectadas.

Finalmente, se incluye un análisis de la oferta de materia prima, específicamente del plástico reciclado disponible en Salta. Se identifican los posibles proveedores que podrían garantizar el suministro necesario para la producción planificada. Este apartado es esencial para determinar la capacidad productiva del proyecto y asegurar su viabilidad a largo plazo.

3.1 BALANZA COMERCIAL DE ARGENTINA

El estudio de las importaciones y exportaciones de combustibles es un componente fundamental para entender las dinámicas del sector energético en cualquier país, y Argentina no es la excepción. En el caso de Argentina, el comportamiento de las importaciones y exportaciones de combustibles refleja de manera clara la evolución de las necesidades energéticas del país, así como su capacidad para responder a ellas mediante la producción

nacional y el comercio exterior. Estos flujos comerciales están determinados por una variedad de factores, que incluyen la oferta y demanda de energía, la infraestructura de energía, producción y distribución, y las políticas energéticas adoptadas durante el período analizado.

El análisis de estos datos proporciona una visión detallada sobre el comportamiento del país en términos de abastecimiento de diésel, tanto para el consumo interno como en su interacción con los mercados internacionales. Además, resulta especialmente relevante en el contexto de proyectos innovadores, como la producción de diésel a partir de plástico reciclado para autoconsumo empresarial. Si bien este tipo de iniciativas no están orientadas a la comercialización, comprender las dinámicas del mercado a través de la balanza comercial permite identificar cómo estas propuestas pueden contribuir a reducir la dependencia de las importaciones, mejorar la seguridad energética y alinear las estrategias empresariales con políticas sostenibles.

En las últimas décadas, Argentina ha experimentado cambios significativos en su panorama energético, marcados por variaciones en las cifras de importación y exportación de diésel. Estos cambios han sido impulsados por factores como la fluctuación de los precios internacionales del petróleo, la capacidad de refinación local, las políticas energéticas adoptadas a nivel nacional y el desarrollo de nuevas fuentes de energía. Estas dinámicas reflejan la capacidad del país para responder a las necesidades internas y para adaptarse a las condiciones del mercado global, consolidando así su estrategia energética.

3.1.1 Exportaciones

La exportación de diésel implica la venta de este producto a mercados internacionales, generando ingresos para el país y contribuyendo positivamente a su balanza comercial. Estas exportaciones están influenciadas por factores como la capacidad de producción local, la demanda en los mercados internacionales, las fluctuaciones en los precios globales de la energía y las políticas de exportación implementadas en el país.

Las fluctuaciones en los volúmenes de exportación reflejan la competitividad del sector energético argentino y su capacidad para posicionarse estratégicamente en el mercado global. Elementos clave como el desarrollo de infraestructuras de exportación, los acuerdos comerciales internacionales y la evolución de la demanda externa tienen un impacto significativo en determinar los volúmenes y valores exportados.

A continuación, se presentan datos específicos sobre las exportaciones de diésel entre 2010 y 2023 (Ministerio de Economía de la Nación Argentina, 2024). Estos datos se exponen en

términos de volumen, medidos en metros cúbicos (m³), en la Tabla 3.1, y en términos monetarios, expresados en dólares estadounidenses (USD), en la Tabla 3.2. Este análisis permitirá evaluar los cambios en los volúmenes y valores exportados a lo largo del tiempo, proporcionando una visión integral sobre la evolución de Argentina en el mercado internacional de diésel (Argentina.gob.ar, 2024).

Exportaciones de Diésel en Argentina (m ³)			
Año	Diesel Grado 2	Diesel Grado 3	Total
2010	0	0	0
2011	0	0	0
2012	74.527	0	74.527
2013	128.107	0	128.107
2014	123.986	0	123.986
2015	1.843	0	1.843
2016	5.867	0	5.867
2017	4.859	0	4.859
2018	38.563	0	38.563
2019	32.574	1.523	34.097
2020	1.560	4.460	6.020
2021	0	3.763	3.763
2022	0	0	0
2023	0	2.713	2.713

Tabla 3.1: Exportaciones de diésel en Argentina expresados en m³

Exportaciones de Diésel en Argentina (USD)			
Año	Diesel Grado 2	Diesel Grado 3	Total
2010	0	0	0
2011	0	0	0
2012	63.390.976	0	63.390.976
2013	113.247.551	0	113.247.551
2014	108.629.595	0	108.629.595
2015	921.358	0	921.358
2016	2.370.971	0	2.370.971
2017	1.902.728	0	1.902.728
2018	17.890.635	0	17.890.635
2019	21.115.300	1.268.568	22.383.867
2020	767.319	2.209.671	2.976.990
2021	0	1.896.865	1.896.865
2022	0	0	0
2023	0	2.976.446	2.976.446

Tabla 3.2: Exportaciones de diésel en Argentina expresados en dólares

Entre 2010 y 2023, las exportaciones de diésel en Argentina presentaron variaciones significativas que reflejan cambios en las condiciones de la industria local y en el mercado internacional. El año 2013 se destacó como el período de mayor volumen y valor exportado, impulsado por un excedente en la producción local y una coyuntura favorable en los mercados externos. Esta tendencia contrasta con años como 2010, 2011, 2022 y 2023, donde no se realizaron exportaciones de diésel Grado 2, evidenciando una completa interrupción en esta actividad debido a la priorización de la demanda interna y la disminución de excedentes exportables.

En términos de composición, se permitirá un cambio progresivo desde el diésel Grado 2 hacia el diésel Grado 3. Mientras que el primero predominó en los primeros años del período, su relevancia disminuyó hasta desaparecer por completo en las exportaciones. Por otro lado, el diésel Grado 3 adquirió mayor protagonismo en los años más recientes, como en 2020 y 2023, reflejando una transición hacia productos de mayor calidad, en línea con regulaciones internacionales y las demandas del mercado externo.

Además, las fluctuaciones en el precio promedio por metro cúbico exportado evidencian la influencia de los precios internacionales y los acuerdos comerciales específicos en los ingresos obtenidos. Por ejemplo, años con menores volúmenes exportados lograron mantener precios unitarios elevados, destacando la capacidad de adaptar la estrategia comercial frente a las condiciones externas.

Las comparaciones entre años subrayan los desafíos de Argentina para garantizar la estabilidad en sus exportaciones de diésel. La transición progresiva hacia productos de mayor calidad y la concentración en períodos específicos reflejan la necesidad de fortalecer estrategias comerciales que permitan mitigar las fluctuaciones del mercado internacional y asegurar un rol competitivo en el comercio energético global.

3.1.2 Importaciones

La importación de diésel en Argentina durante el período 2010-2023 evidencia una dinámica influenciada por la necesidad de suplir las limitaciones de la producción local y responder a una demanda interna variable. Este comportamiento ha estado condicionado por factores como las fluctuaciones en los precios internacionales del petróleo, la capacidad de producción y refinación nacional, y las políticas energéticas implementadas durante el período.

Los volúmenes importados han registrado variaciones significativas, lo que refleja cambios tanto en la producción local como en la demanda de los consumidores. En años con

picos de importaciones, se puede inferir un aumento en la demanda o dificultades en la producción nacional, derivadas de limitaciones técnicas, económicas o contextuales. Simultáneamente, el costo de estas importaciones ha fluctuado, no solo por los volúmenes involucrados, sino también por las variaciones en los precios internacionales, que afecta directamente el valor total incluso cuando las cantidades permanecen constantes.

Además, las estrategias comerciales y la diversificación de proveedores han desempeñado un papel crucial para garantizar el abastecimiento energético. Negociaciones para asegurar un suministro estable o reducir costos se han convertido en un factor estratégico en un contexto marcado por la volatilidad del mercado global y la creciente dependencia del diésel importado. Este panorama resalta la complejidad de la balanza comercial energética en Argentina y su impacto en la economía nacional.

El análisis detallado de las Tablas 3.3 y 3.4 permitirá identificar tendencias específicas en los volúmenes y valores de las importaciones de diésel, así como comprender mejor el impacto de los factores mencionados en la política energética de Argentina.

Importaciones de Diésel en Argentina (m ³)			
Año	Diésel Grado 2	Diésel Grado 3	Total
2010	832.693	633.165	1.465.858
2011	764.617	1.230.205	1.994.822
2012	147.773	1.200.917	1.348.690
2013	646.943	1.780.149	2.427.092
2014	522.456	1.503.059	2.025.515
2015	0	1.933.691	1.933.691
2016	25.059	2.164.172	2.189.231
2017	0	2.131.897	2.131.897
2018	136.371	2.066.581	2.202.952
2019	498	2.143.139	2.143.637
2020	120.454	1.217.383	1.337.837
2021	397.192	1.574.557	1.971.749
2022	175.418	2.382.520	2.557.938
2023	0	1.608.228	1.608.228

Tabla 3.3: Importaciones de diésel en Argentina expresados en m³

Importaciones de Diésel en Argentina (USD)			
Año	Diésel Grado 2	Diésel Grado 3	Total
2010	487.517.828	384.737.204	872.255.032
2011	614.056.896	1.011.572.577	1.625.629.472
2012	114.351.685	1.041.573.892	1.155.925.577
2013	529.311.073	1.457.834.722	1.987.145.795
2014	418.837.860	1.159.407.151	1.578.245.012
2015	0	897.819.992	897.819.992
2016	10.649.605	786.528.847	797.178.452
2017	0	935.041.602	935.041.602
2018	81.754.750	1.175.118.619	1.256.873.369
2019	252.383	1.165.441.828	1.165.694.211
2020	36.475.985	487.607.559	524.083.544
2021	216.856.216	826.189.595	1.043.045.811
2022	152.256.741	2.298.587.740	2.450.844.481
2023	0	1.257.722.172	1.257.722.172

Tabla 3.4: Importaciones de diésel en Argentina expresados en dólares

Entre 2010 y 2023, las importaciones de diésel en Argentina presentan un comportamiento que responde directamente a factores concretos. En 2013 y 2022, los máximos volúmenes importados reflejan un aumento significativo en la demanda interna, acompañado de una insuficiencia en la capacidad de producción local para satisfacer dichas necesidades. Este escenario se vio influenciado también por un contexto global de alta demanda energética, que condicionó las estrategias de abastecimiento.

Por otro lado, los menores volúmenes de importación registrados en 2020 y 2023 se explican por una combinación de factores: en 2020, la reducción de la actividad económica debido a la pandemia de COVID-19 impactó directamente en la demanda energética del país, mientras que, en 2023 se logró optimizar la producción local y se consolidó el uso de alternativas energéticas que disminuyeron la dependencia externa.

En términos económicos, el gasto en importaciones alcanzó su pico en 2022, impulsado tanto por el crecimiento del volumen importado como por el incremento de los precios internacionales, particularmente del diésel Grado 3. Por el contrario, los menores costos en 2019 y 2020 resultaron de una combinación de volúmenes reducidos y precios unitarios más bajos en el mercado global.

Al igual que se observó al analizar las exportaciones, esta evolución resalta la creciente preferencia por el diésel Grado 3, tanto en términos de volumen como de valor económico, mientras que el diésel Grado 2 fue relegado hasta desaparecer en 2023. Estos patrones ponen

de manifiesto la influencia directa de las condiciones económicas internas y las dinámicas internacionales en la balanza comercial de combustibles de Argentina.

3.2 OFERTA DE COMBUSTIBLES

Al abordar la oferta, se analizan tanto las principales marcas del sector como las variedades de diésel disponibles en el mercado con sus respectivas cantidades producidas, permitiendo comprender el contexto competitivo y evaluar si los precios de adquisición podrían resultar más convenientes que los costos de producción interna. Además, la evolución histórica de los precios proporciona una visión clara de las tendencias del mercado, lo que permite identificar posibles riesgos y oportunidades a futuro.

Este análisis servirá de base para la toma de decisiones estratégicas dentro del proyecto, garantizando que se evalúen todas las opciones disponibles para asegurar la eficiencia económica y operativa en función de las dinámicas del mercado de combustibles.

3.2.1 Empresas Competidoras

El análisis de competidores es crucial en proyectos de producción de bienes o servicios, especialmente en mercados consolidados como el energético. Evaluar a las empresas productoras de diésel en Argentina permite entender las dinámicas del sector y las alternativas que enfrentan las empresas consumidoras al decidir entre producir su propio combustible o adquirirlo de proveedores externos.

Las compañías productoras de combustibles representan una competencia directa al ofrecer soluciones eficientes respaldadas por su capacidad logística, productiva y comercial. Estas ventajas las posicionan como una opción confiable para garantizar el suministro de diésel sin incurrir en los riesgos y costos de la producción interna.

Incluir este análisis en el proyecto es esencial para evidenciar el nivel de competitividad del mercado de combustibles en Argentina. Este enfoque permite no solo evaluar la viabilidad técnica y económica del proyecto, sino también medir su capacidad para competir con las opciones existentes, identificando tanto desafíos como oportunidades en el sector.

A continuación, se presentan los competidores en el mercado de combustibles en Argentina en el año 2024, con el objetivo de identificar las empresas que actualmente ofrecen productos y servicios dentro de este sector, y así comprender el entorno competitivo en el cual se inserta:

- Fox Petrol SA: Empresa argentina dedicada al procesamiento de hidrocarburos, ubicada en Neuquén. Su refinería produce diesel, naftas, solventes y aguarrás, abasteciendo tanto al mercado nacional como internacional (Fox Energía Pura, sf).
- New American Oil (NAO): Fundada en 2000, esta compañía argentina se dedica a la refinación y distribución de productos derivados del petróleo. Su planta principal se encuentra en Plaza Huincul, Neuquén, y ofrece productos como diésel, fuel oil, queroseno y solventes a diversos sectores (NAO Combustibles, sf).
- Refinería del Norte SA (Refinor): Empresa de hidrocarburos en Argentina que opera en el norte del país. Su refinería se encuentra en Campo Durán, Salta, y se enfoca en la producción y distribución de combustibles líquidos y gas natural (Refinor, sf).
- Shell CAPSA: Filial argentina de Royal Dutch Shell, especializada en la producción, refinación y comercialización de combustibles y lubricantes en Argentina. Su refinería en Dock Sud, Buenos Aires, abastece una parte significativa del mercado local (Shell, sf).
- YPF SA: Empresa estatal líder en el sector energético argentino. Se dedica a la exploración, producción, refinación y comercialización de petróleo, gas y electricidad, y es la mayor refinadora y proveedora de combustibles del país (YPF, sf).
- Refipampa SA: Empresa de menor tamaño en el sector de refinación en Argentina, operando en la región pampeana. Se dedica a la refinación y distribución de combustibles derivados del petróleo a clientes industriales y comerciales (Refipampa, sf).
- Pan American Energy (PAE): Segunda mayor productora de hidrocarburos en Argentina, con una refinería en Campana. Participa en la exploración y producción de petróleo y gas, con un enfoque importante en la exportación de productos (Pan Energy, sf).
- Pampa Energía SA: Empresa reconocida principalmente por su generación de electricidad, pero también tiene presencia en la producción de hidrocarburos y distribución de gas natural, con inversiones en el sector de hidrocarburos (Pampa Energía SA, sf).
- Trafigura Argentina SA: Multinacional suiza que opera en Argentina bajo la marca Puma Energy. Se dedica a la comercialización y distribución de combustibles, gestionando estaciones de servicio y una refinería (Trafigura, sf).

- Combustibles Ítalo Argentino SA: Empresa más pequeña en comparación con otras en el sector, que ofrece productos derivados del petróleo a clientes comerciales e industriales en varias regiones de Argentina (Combustibles Ítalo Argentino SA, sf).
- Nueva Energía Argentina SA: Empresa emergente que distribuye combustibles fósiles y energías alternativas, enfocada en fomentar soluciones energéticas sostenibles y apoyar la transición energética del país hacia un modelo más limpio (Nueva Energía SA, sf).

Para concluir, el análisis de los competidores revela un mercado de combustibles en Argentina con una estructura sólida y bien consolidada, donde tanto grandes empresas como YPF, Shell y Pan American Energy, así como actores más pequeños, desempeñan un papel crucial. La presencia de estas empresas con capacidades productivas y logísticas desarrolladas representa un entorno altamente competitivo para cualquier proyecto que busque satisfacer la demanda de combustibles.

3.2.2 Producción de Combustibles

En la siguiente sección se presentarán los datos anuales sobre la producción de diesel del sector energético en su totalidad, sin discriminar por empresa, en Argentina. Este análisis permitirá desglosar el comportamiento en términos de volúmenes producidos y su evolución a lo largo del tiempo. La importancia de este estudio radica en que proporciona una base cuantitativa esencial para evaluar la capacidad productiva del mercado local, así como para identificar posibles tendencias en la oferta de mismo.

Al comprender el nivel de producción alcanzado por estas empresas en años recientes, es posible contextualizar de manera más precisa la dinámica del sector energético en el país. Este análisis permitirá identificar patrones que son cruciales para la evaluación del proyecto, al ofrecer una perspectiva clara de las capacidades y limitaciones que el entorno competitivo podría presentar para iniciativas futuras en el área de producción y distribución de combustibles.

Seguidamente, se presentan en la Tabla 3.5, los datos de producción de diésel en Argentina en m³ para el período 2010-2023 (Ministerio de Economía de la Nación Argentina, 2024). Este registro incluye los volúmenes anuales, ofreciendo una visión clara de la evolución en la producción de este a lo largo de estos años.

Producción de Diésel en Argentina (m ³)			
Año	Diésel Grado 2	Diésel Grado 3	Total
2010	11.844.144	294.988	12.139.133
2011	11.770.697	320.999	12.091.696
2012	11.762.672	215.533	11.978.205
2013	11.223.344	457.499	11.680.843
2014	10.866.251	655.316	11.521.566
2015	11.332.854	848.192	12.181.046
2016	10.968.133	977.587	11.945.720
2017	10.308.899	1.694.283	12.003.183
2018	9.522.911	2.015.947	11.538.858
2019	9.770.969	1.828.327	11.599.296
2020	8.650.496	2.009.650	10.660.146
2021	8.788.528	3.257.833	12.046.361
2022	8.764.782	3.747.550	12.512.332
2023	8.860.355	4.293.828	13.154.183

Tabla 3.5: Producción de diésel en Argentina expresados en m³

A partir de los datos presentados en la Tabla 3.5, se realizará un análisis gráfico que ilustrará la evolución histórica de la producción de Diésel Grado 2 y Grado 3 de forma individual, en la Ilustración 3.1 y 3.2, respectivamente. Al visualizar gráficamente estos datos, se facilitará la identificación de patrones, picos o caídas en la producción de ciertos combustibles, lo que aportará una perspectiva más precisa y enriquecida para el análisis comparativo y la toma de decisiones en el contexto del proyecto.

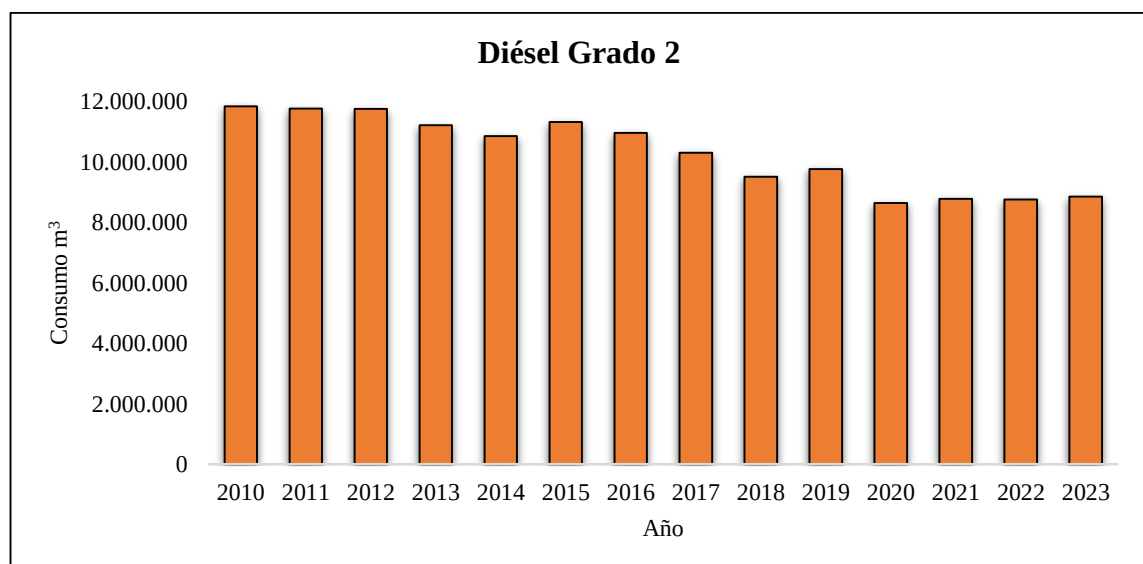


Ilustración 3.1: Producción de Diésel Grado 2 en Argentina expresados en m³

La Ilustración 3.1 detalla claramente el comportamiento de la oferta del Diésel Grado 2 a lo largo del período analizado con tendencia descendente. Entre 2010 y 2013, la producción

se mantuvo relativamente estable, con pequeñas variaciones. En 2014, cayó un 4,7%, pero en 2015 hubo una recuperación del 4,3%.

A partir de 2016, la producción comenzó a descender, acumulando una baja del 21,2% hasta 2020. Entre 2020 y 2023, la producción se estabilizó en niveles más bajos, con variaciones mínimas del 1%. A pesar de una ligera recuperación en 2023, los niveles siguen siendo mucho menores en comparación con los primeros años.

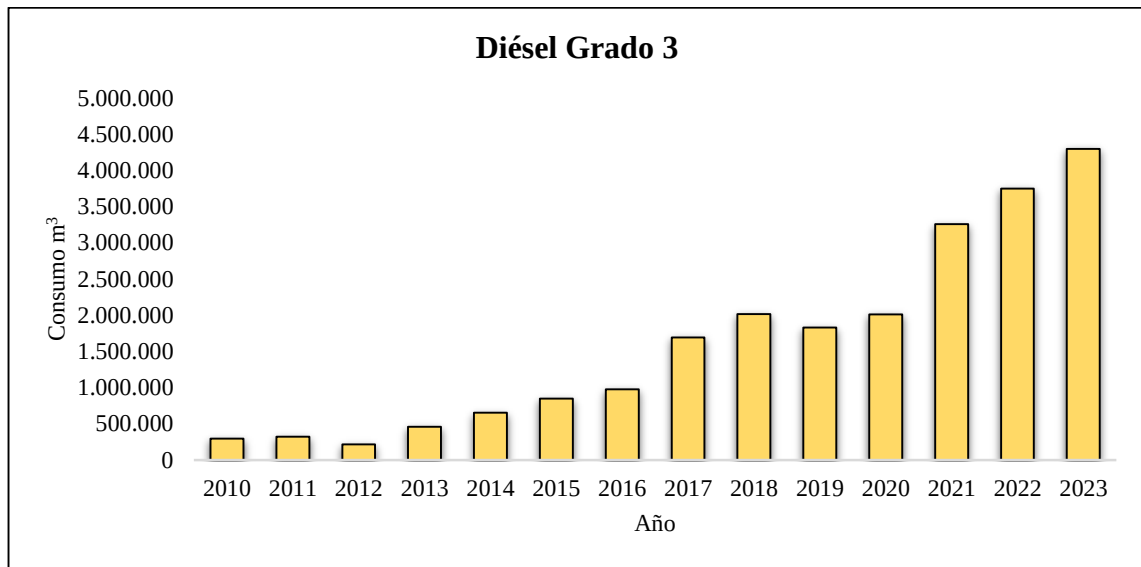


Ilustración 3.2: Producción de Diésel Grado 3 en Argentina expresados en m³

Entre 2010 y 2023, la producción de Diésel Grado 3 en Argentina mostró un importante crecimiento, como se observa en Ilustración 3.2. De 2010 a 2013, el aumento fue del 55%. A partir de 2014, el crecimiento se aceleró aún más, destacando hasta 2018 un incremento del 307%. Entre 2018 y 2019, el crecimiento se detuvo, ocurriendo una baja del 9%. Sin embargo, de 2020 a 2023, la tendencia positiva continuó alcanzando en 2023 el máximo de todo el período.

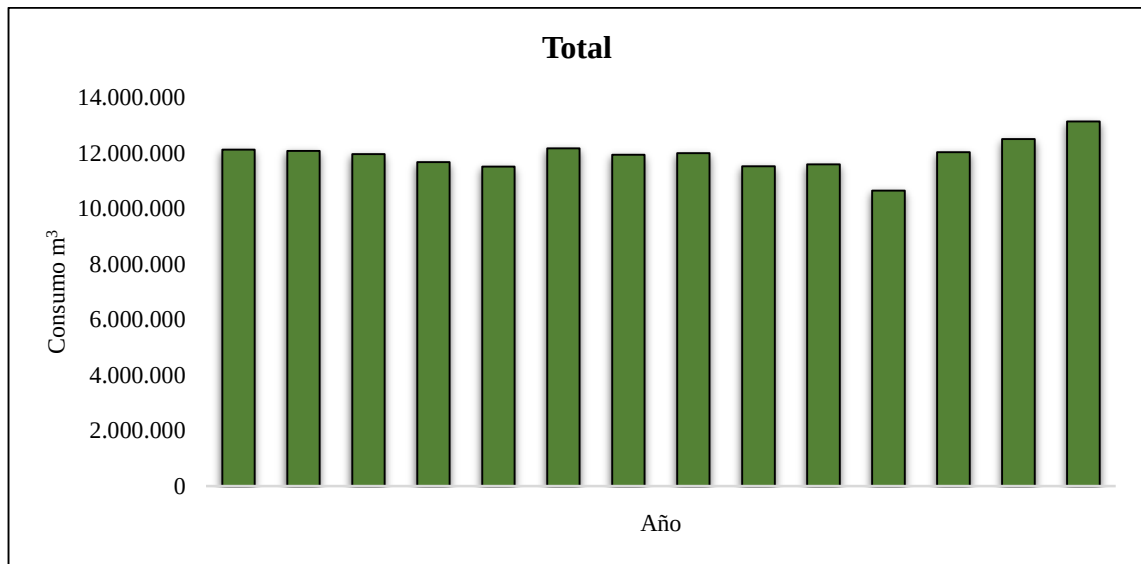


Ilustración 3.3: Producción total de diésel en Argentina expresados en m³

Durante el período 2010-2023, la producción de diésel en Argentina presentó varias tendencias y fluctuaciones significativas.

Entre 2010 y 2015, la producción mostró una estabilidad relativa, con un crecimiento acumulado del 0,3 % durante este período. Este comportamiento se debió a una demanda estable ya un entorno económico moderadamente favorable.

A partir de 2016, la producción comienza a disminuir, acumulando una caída del 12,5 % hasta 2020, cuando se registra el punto más bajo del período. Este descenso se debió a un contexto de contracción económica en el país y una reducción de la actividad industrial, agravada por la pandemia de COVID-19 en 2020, lo cual no puede ser identificado como una situación particular que no forma parte de la tendencia general del mercado.

En 2021, la producción inicia una recuperación significativa, incrementándose un 13 % respecto al año anterior. Este crecimiento se mantuvo en los años siguientes, alcanzando en 2023 un aumento acumulado del 23,4 % respecto al mínimo de 2020. Este repunte se debió a la reactivación económica pos-pandemia y un aumento en la demanda interna.

En términos generales, la producción de diésel en Argentina muestra una tendencia positiva, aunque con fluctuaciones significativas. Estas variaciones en la oferta nacional impactan directamente en proyectos que buscan producir diésel de manera independiente. En momentos de caídas en la producción local, contar con una fuente propia de diésel reduce la dependencia de los altibajos de la oferta interna, asegurando un suministro más constante y predecible.

Esto no solo facilita la planificación operativa y financiera de la empresa que desea el proyecto, sino que también ofrece mayor estabilidad al reducir la dependencia de la oferta nacional de diésel. Al contar con una fuente de producción propia, la empresa incrementa su autosuficiencia energética, lo que minimiza los riesgos asociados con las fluctuaciones en el suministro y refuerza la seguridad del proyecto a largo plazo.

3.2.3 Precios de Combustibles

Dentro del estudio de mercado, consideramos realizar el análisis de los precios del diésel que ofrece la competencia, es fundamental tener en cuenta que, si bien el proyecto está diseñado para el autoconsumo, existe la posibilidad de optar por adquirir combustibles de proveedores ya establecidos en el mercado. Esto podría representar una alternativa más conveniente en determinados momentos, dependiendo de los costos asociados a la producción interna versus la compra externa. Por lo tanto, comparar los precios actuales de los combustibles disponibles en el mercado argentino resulta clave para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

El análisis de precios no solo permitirá tener una visión clara de las opciones disponibles, sino también ayudará a determinar si la producción interna de combustibles puede generar ahorros en comparación con la compra a terceros. Además, este estudio proporciona una referencia importante para la planificación financiera y la gestión de costos operativos a largo plazo.

A continuación, se presenta en Ilustración 3.6 los precios promedios históricos y actuales del diésel en pesos argentinos por litro (Secretaría de Energía de la Nación Argentina, 2024), y en dólares estadounidenses, los cuales servirán de referencia para este análisis.

Precios del Diésel en Argentina por litro				
Año	Pesos Argentinos		Dolares Estadoudinense	
	Diésel Grado 2	Diésel Grado 3	Diésel Grado 2	Diésel Grado 3
2016	16,62	17,09	1,06	1,09
2017	18,87	21,88	1,03	1,19
2018	28,85	34,36	0,78	0,93
2019	44,3	51,87	0,76	0,89
2020	61,1	72,09	0,73	0,87
2021	78,03	88,71	0,77	0,87
2022	149,67	191,13	0,85	1,09
2023	333,18	413,72	0,42	0,52
2024	1008	1281	1,00	1,27

Tabla 3.6: Precios históricos del diésel en Argentina

La evolución de los precios del diésel en Argentina evidencia un incremento significativo tanto para el diésel Grado 2 como para el Grado 3 entre 2016 y 2024. En términos generales, el diésel Grado 3 presenta precios consistentemente más altos que el Grado 2, lo cual es coherente con su calidad superior y mayor costo de producción.

Dicha variación muestra un incremento sostenido, especialmente en pesos argentinos, debido a factores macroeconómicos y estructurales. Este aumento ha sido acelerado en los últimos períodos, reflejando el impacto de la inflación y la constante devaluación de la moneda local. Si bien los valores en dólares estadounidenses también han mostrado cierta variación, el incremento en esta moneda es considerablemente menor, lo que indica que el encarecimiento en pesos argentinos no responde únicamente a factores internacionales, sino que está influenciado por la dinámica económica del país.

Uno de los principales factores que explican este comportamiento es la alta inflación que ha caracterizado a la economía argentina en los últimos años. La depreciación del peso frente al dólar ha generado una suba en los costos de bienes y servicios que dependen de insumos cotizados en moneda extranjera, como es el caso del diésel. Esta devaluación ha impactado directamente en el costo de los combustibles, generando ajustes constantes en sus precios. Asimismo, la reducción progresiva de los subsidios al sector energético ha contribuido a trasladar el costo real del diésel al consumidor final, lo que ha llevado a aumentos significativos en su valor.

Otro aspecto relevante es la relación de los precios internos con el mercado internacional. Si bien Argentina cuenta con producción local de hidrocarburos, la importación de gasoil es necesaria para abastecer la demanda interna, lo que hace que los precios se vean afectados por las fluctuaciones en la cotización del petróleo y los costos logísticos asociados. A esto se suman los costos de refinación y distribución, que han experimentado aumentos debido a la inflación interna, las restricciones en la importación de insumos y las limitaciones en la capacidad de refinación del país.

El contexto macroeconómico y las decisiones de política energética han influido de manera determinante en la evolución de los precios. La falta de estabilidad en las regulaciones, los cambios en los esquemas impositivos y la necesidad de ajuste en las tarifas han generado un escenario de aumentos recurrentes en los combustibles. Esto ha llevado a que el diésel experimente incrementos sostenidos que impactan directamente en los costos de producción y transporte de diversos sectores industriales.

En conclusión, la evolución de los precios del diésel en Argentina pone de manifiesto las dificultades económicas del país, tales como la elevada inflación, la depreciación del peso y la dependencia de insumos externos. Estos factores provocan una volatilidad significativa en los costos de los combustibles, lo que puede generar incertidumbre para los proyectos que dependen de su adquisición en el mercado. Para este proyecto, la posibilidad de generar diésel localmente representa una clave de ventaja, ya que permite reducir la exposición a estas fluctuaciones. Al tener control sobre su propio suministro, el proyecto no solo logra asegurar una mayor previsibilidad en los costos operativos, sino que también fortalece su independencia frente a los factores económicos externos, garantizando así la continuidad y estabilidad en el tiempo.

3.3 ANÁLISIS DE DEMANDA DE COMBUSTIBLES

En este capítulo del estudio de mercado, se analizará en profundidad la demanda del diésel, un aspecto fundamental para la evaluación de la viabilidad del proyecto. El análisis de la demanda de combustibles permitirá entender el comportamiento de consumo en dos niveles: primero, a nivel nacional, evaluando el consumo de combustibles en Argentina, y luego, en un enfoque más local, en la provincia de Salta, donde se estudia la factibilidad de implementar este proyecto. La evaluación tanto global como local nos proporcionará una visión integral de las tendencias de consumo y las particularidades del mercado en ambas escalas geográficas.

Además, se incluirán proyecciones de la demanda de diesel tanto para Argentina como para Salta, con el fin de anticipar el comportamiento futuro del consumo energético y evaluar cómo la producción de combustibles puede contribuir a satisfacer las necesidades proyectadas. Estas proyecciones proporcionarán información clave para la planificación del proyecto, asegurando que la capacidad de producción esté alineada con las tendencias de demanda y que el proyecto pueda adaptarse eficazmente a los requerimientos energéticos futuros.

3.3.1 Análisis de Demanda de Argentina

La Tabla.3. presenta un análisis detallado de los consumos de diesel, discriminado por tipo, en Argentina durante el período de 2010 a 2023 (Ministerio de Economía de la Nación Argentina, 2024). Estos datos permiten identificar las variaciones en los patrones de consumo a lo largo del tiempo, lo que es fundamental para comprender las dinámicas energéticas del país y evaluar cómo factores como la demanda interna, las fluctuaciones en el mercado internacional, y las políticas energéticas han influido en el abastecimiento y uso de combustibles.

Demanda de Diésel en Argentina en m ³			
Año	Diésel Grado 2	Diésel Grado 3	Total
2010	12.859.955	915.489	13.775.444
2011	12.731.254	1.479.419	14.210.674
2012	12.231.323	1.260.356	13.491.679
2013	12.209.710	1.540.204	13.749.914
2014	11.754.066	1.660.957	13.415.023
2015	11.593.989	2.122.623	13.716.612
2016	11.304.246	2.370.541	13.674.787
2017	10.669.312	3.047.294	13.716.606
2018	10.092.010	3.398.946	13.490.956
2019	10.038.246	3.358.172	13.396.419
2020	9.173.010	2.758.823	11.931.833
2021	10.032.976	3.682.471	13.715.447
2022	10.411.520	4.367.899	14.779.420
2023	10.628.699	4.039.200	14.667.899

Tabla 3.7: Demanda de diésel en Argentina expresada en m³

La información proporcionada en la Tabla.3.7 será desglosada gráficamente para cada combustible. Este enfoque permitirá visualizar de manera clara las variaciones en el consumo de cada combustible a lo largo del tiempo. A través de gráficos individuales, se facilitará el análisis aislado de las tendencias y patrones específicos para cada tipo de combustible, lo que nos ayudará a entender con mayor detalle cómo ha evolucionado su uso. Cada gráfico estará acompañado de su respectivo análisis, lo que ofrecerá una visión más profunda y comprensible de los cambios en el consumo energético.

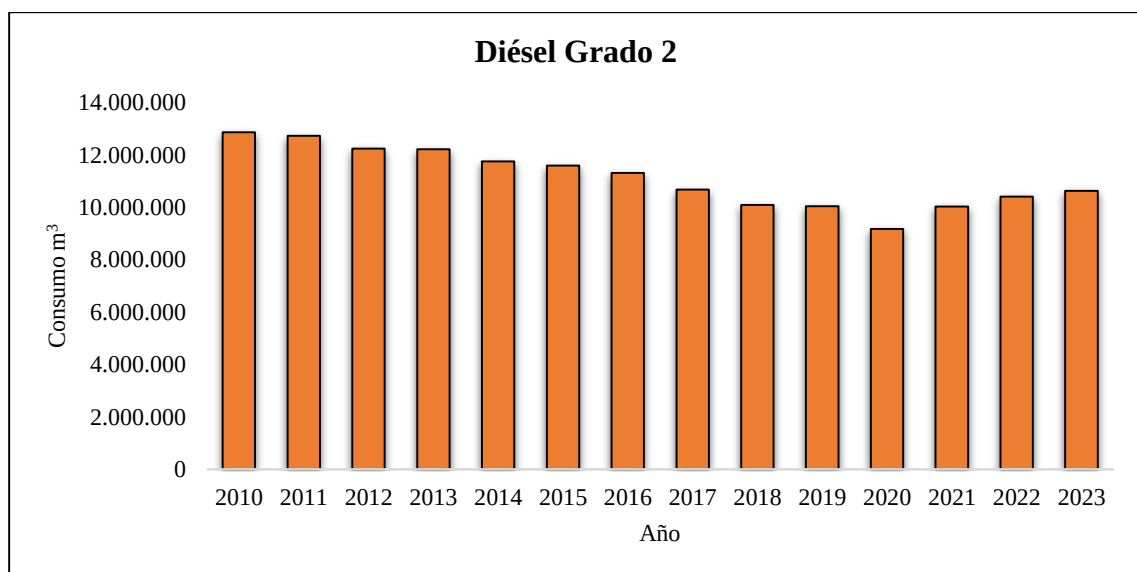


Ilustración 3.4: Demanda de Diésel Grado 2 en Argentina expresada en m³

El análisis de la demanda de Diésel Grado 2 en Argentina entre 2010 y 2023, como se observa en la Ilustración 3.4, refleja una tendencia descendente durante la mayor parte del período, con caídas leves entre 2010 y 2013, acumulando un descenso del 5%. A partir de 2014, esta disminución se aceleró, alcanzando un 10% adicional hasta 2016. El nivel más bajo se registró en 2020, con una reducción acumulada del 28% desde 2010.

En 2021, la demanda mostró signos de recuperación con un incremento del 9%, y entre 2021 y 2023 se mantuvo en aumento con un total del 6%, alcanzando su nivel más alto desde 2018.

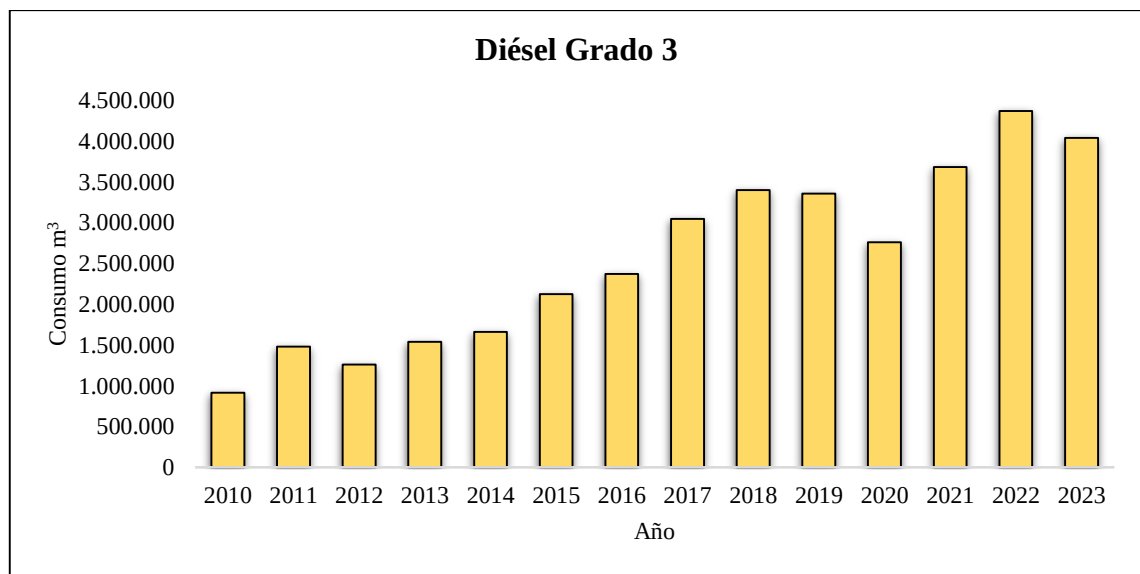


Ilustración 3.5: Demanda de Diésel Grado 3 en Argentina expresada en m³

Tal como lo revela la Ilustración 3.5, la demanda de Diésel Grado 3 ha seguido una tendencia de crecimiento constante desde 2010 hasta 2023, a pesar de algunas fluctuaciones. Entre 2010 y 2013, la demanda creció un 68%, y entre 2014 y 2016 se mantuvo un aumento constante del 43%, al igual que entre 2016 y 2018.

Aunque en 2020 la demanda cayó un 18%, se recuperó en 2021 con un aumento del 33%. Entre 2021 y 2022, la demanda alcanzó su máximo, con un aumento del 19%, aunque en 2023 disminuyó un 8%.

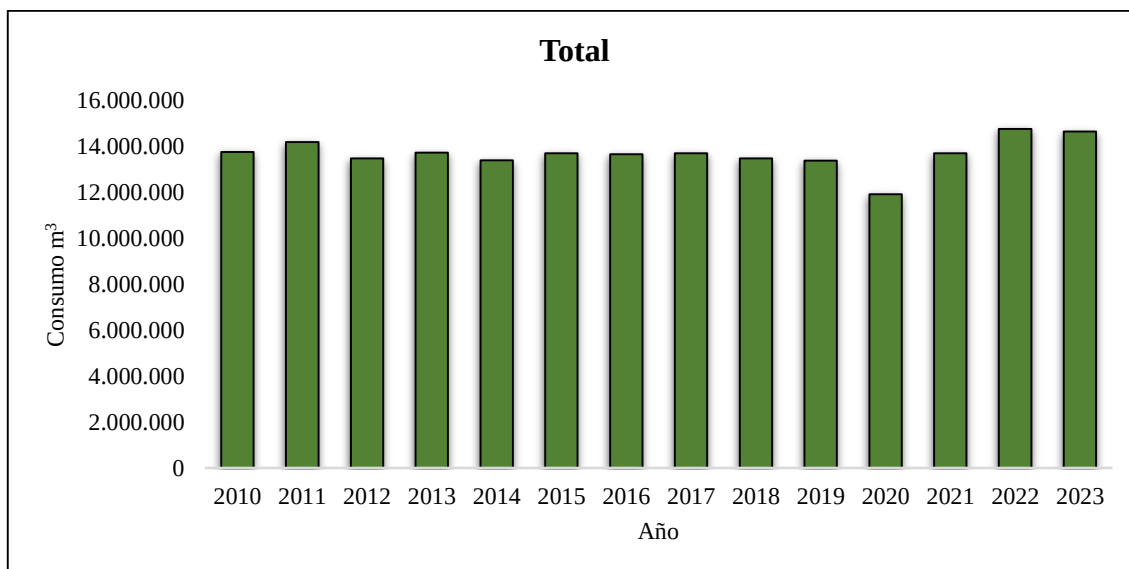


Ilustración 3.6: Demanda total de diésel en Argentina expresada en m³

El consumo de diésel en Argentina entre 2010 y 2023 evidencia una evolución dinámica, con períodos de crecimiento sostenido, estabilidad y una notable recuperación tras un descenso pronunciado, como se aprecia en la Ilustración 3.6.

Entre 2010 y 2015, el consumo total mostró un crecimiento marginal del 1,8 %. Este comportamiento se debió a un aumento moderado en la actividad económica y del transporte, así como a una creciente demanda agrícola. Entre 2016 y 2020, el consumo presentó fluctuaciones con una leve tendencia decreciente, acumulando una caída del 16 %. Este descenso fue consecuencia directa de una desaceleración económica generalizada y las restricciones derivadas de la pandemia de COVID-19.

En 2021, el consumo experimentó una recuperación significativa, con un incremento del 14,9 % respecto al año anterior. Esta tendencia de recuperación se intensificó en los años siguientes, alcanzando en 2023 un aumento acumulado del 22,9 % respecto al mínimo de 2020, consolidándose como el valor más alto del período analizado.

En términos generales, el consumo de diésel en Argentina presenta una tendencia ascendente en los últimos años, reflejando el proceso de recuperación económica nacional.

3.3.2 Análisis de Demanda en la provincia de Salta

En la Tabla 3. se proporciona una visión completa sobre los consumos de diésel en la provincia de Salta entre 2010 y 2023. Estos datos son esenciales para entender cómo ha evolucionado la demanda energética en la provincia, y permiten analizar tendencias y

variaciones que han afectado su abastecimiento y consumo de combustibles. Al estudiar estos patrones, podemos observar cómo factores como el crecimiento económico, la industrialización y las políticas energéticas locales han impactado el uso de los recursos energéticos en Salta.

Demanda de Diésel en Salta en m ³			
Año	Diésel Grado 2	Diésel Grado 3	Total
2010	327.323	15.510	342.834
2011	318.925	27.644	346.569
2012	323.796	20.724	344.520
2013	277.270	26.222	303.492
2014	274.944	31.663	306.608
2015	270.183	42.456	312.639
2016	258.255	51.421	309.676
2017	247.741	71.357	319.099
2018	233.426	82.925	316.351
2019	224.215	81.197	305.412
2020	196.810	65.476	262.286
2021	256.008	93.572	349.581
2022	278.162	113.341	391.503
2023	303.718	106.626	410.344

Tabla 3.8: Demanda de diésel en Salta expresada en m³

Lo proporcionado en la Tabla.3.8 se representará gráficamente para cada tipo de combustible, lo que facilitará la comprensión de sus variaciones de manera aislada.

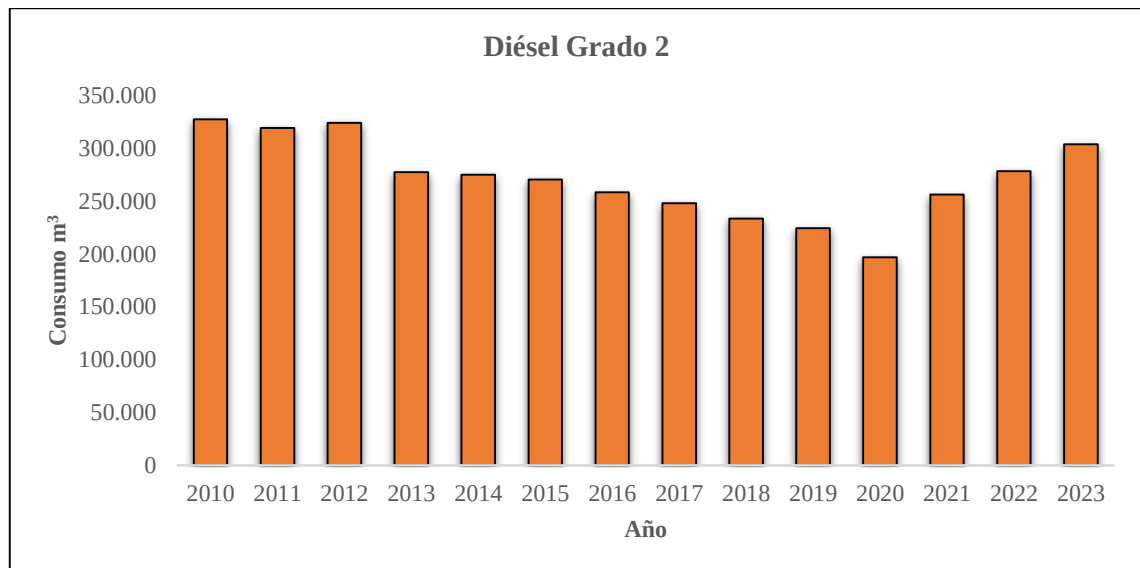


Ilustración 3.7: Demanda de Diésel Grado 2 en Salta expresada en m³

Según lo mostrado en la Ilustración 3.7, la demanda de Diesel Grado 2 en Salta entre 2010 y 2023 revela una tendencia general de disminución hasta 2020, con una caída acumulada del 39% desde 2010. Durante el período de 2010 a 2012, la demanda fue relativamente estable,

pero en 2013 sufrió una caída significativa del 14%, dando inicio a un descenso sostenido. Entre 2013 y 2016, la reducción fue del 17%, y entre 2016 y 2019, del 13%, alcanzando su mínimo en 2020.

A partir de 2021, la demanda comenzó a recuperarse, aumentando un 30% en 2021 en comparación con el año anterior. Esta tendencia positiva continuó, y para 2023, la demanda alcanzó niveles similares a los de 2012, con un aumento acumulado del 54% desde 2020.

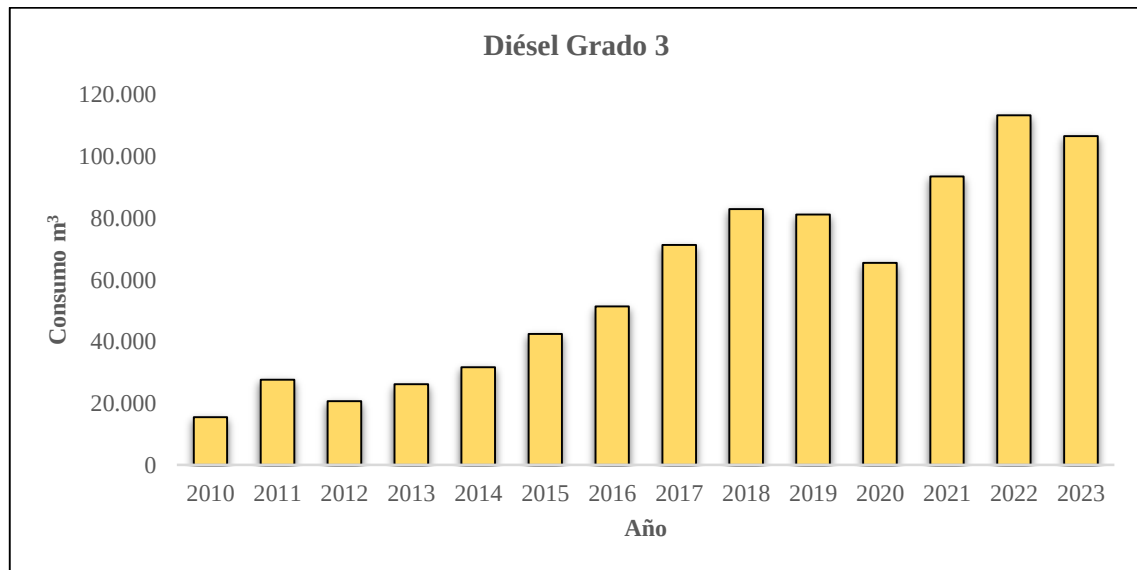


Ilustración 3.8: Demanda de Diésel Grado 3 en Salta expresada en m³

El análisis de la demanda de Diesel Grado 3 en Salta entre 2010 y 2023 muestra una tendencia general de crecimiento, con algunas fluctuaciones, tal como se observa en Ilustración 3.8. Entre 2010 y 2013, la demanda experimentó variaciones, incluyendo un aumento del 78% en 2011 y una caída del 25% en 2012. A partir de 2014, el crecimiento fue más sostenido, acumulando un 34% entre 2013 y 2015.

Aunque en 2020 hubo una caída del 19%, la demanda se recuperó con un aumento del 43% en 2021, debido a la situación particular vivida por la pandemia del COVID-19. En 2023, ocurrió una disminución del 6%, pero se mantuvo en niveles elevados.

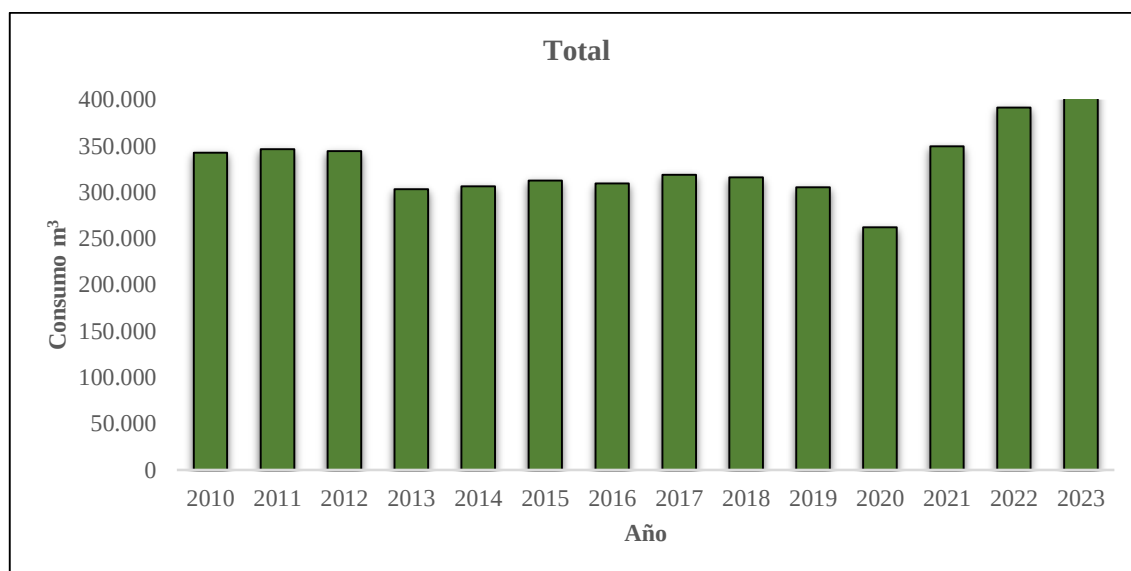


Ilustración 3.9: Demanda total de diésel en Salta expresada en m³

El consumo de diésel en la provincia de Salta entre 2010 y 2023, según se aprecia en Ilustración 3.9, presenta una evolución caracterizada por períodos de estabilidad, crecimiento moderado, contracción significativa y una notable recuperación en los últimos años.

Entre 2010 y 2012, el consumo se mantuvo relativamente constante, con apenas una variación del 0,5 % en este período. Este comportamiento estable se debió a un equilibrio entre la demanda agrícola e industrial de la región y condiciones económicas relativamente constantes.

A partir de 2013, se observó una caída en el consumo del 11,9 % respecto al año anterior. Sin embargo, desde este punto hasta 2018, el consumo exhibió un crecimiento moderado pero sostenido, acumulando un incremento del 9,8 %. Este crecimiento refleja una reactivación progresiva en actividades clave de la provincia, como la agricultura, el transporte y la minería.

En 2019, el consumo registró un leve declive con una reducción del 4,9 % respecto al año anterior, lo cual podría estar vinculado a una desaceleración económica generalizada en el país. La caída se profundizó en 2020, donde el consumo descendió un 14,1 %, alcanzando su punto más bajo en todo el período analizado. Este descenso coincidió con la pandemia de COVID-19 y las restricciones asociadas, que afectaron severamente las actividades económicas en la región.

A partir de 2021, el consumo de diésel en Salta inició una recuperación significativa, aumentando un 49,3 % respecto a 2020. Esta tendencia de crecimiento continuó en los años siguientes, acumulando un incremento del 56,4 % desde el mínimo registrado en 2020. Este

repunte estuvo impulsado por la recuperación pos-pandemia, liderada por el aumento en la producción agrícola, el transporte y la reactivación de proyectos industriales y mineros.

3.3.3 Proyección de Demanda

En este apartado se presenta la proyección de la demanda de Argentina y Salta en relación con el consumo de diésel, basada en los datos analizados previamente. Para realizar esta proyección se emplea el Método de Suavización Exponencial, el cual ha sido seleccionado debido a las características fluctuantes y la variabilidad en la tendencia que exhibe la demanda.

Este método destaca por su capacidad para ajustarse tanto al nivel como a la tendencia de los datos, lo cual resulta crucial en situaciones donde la demanda experimenta cambios significativos en dirección y magnitud.

Es importante destacar que el valor correspondiente al año 2020 ha sido excluido del análisis, ya que representa un dato atípico o desviado en comparación con los demás registros históricos. Esta exclusión tiene como objetivo asegurar que la proyección sea representativa de las tendencias generales de la demanda, garantizando así resultados más precisos y fiables.

3.3.3.1 Proyección de Demanda de Argentina

Seguidamente, se presenta el análisis detallado de la proyección de demanda previamente mencionado, el cual se encuentra reflejado en la Tabla 7. Dicho análisis se ha realizado exclusivamente para Argentina, tomando en consideración los datos históricos pertinentes y aplicando una metodología adecuada para obtener resultados precisos y representativos. Asimismo, en la Figura X se adjunta una representación gráfica del estudio, permitiendo visualizar de manera clara y concisa las tendencias proyectadas para la demanda en los próximos años.

Pronóstico Demanda Argentina en m ³		
Año	Demanda Real	Pronóstico
2010	13.775.444	
2011	14.210.674	
2012	13.491.679	
2013	13.749.914	
2014	13.415.023	
2015	13.716.612	
2016	13.674.787	
2017	13.716.606	
2018	13.490.956	
2019	13.396.419	
2021	13.715.447	
2022	14.779.420	
2023	14.667.899	14.667.899
2024		14.243.697
2025		14.300.503
2026		14.321.335
2027		14.803.328
2028		14.416.813
2029		14.466.711
2030		14.403.162
2031		14.533.122
2032		14.583.020
2033		14.519.472
2034		14.649.432
2035		14.699.330

Tabla 3.9: Pronóstico de la demanda de diésel en Argentina expresada en m³

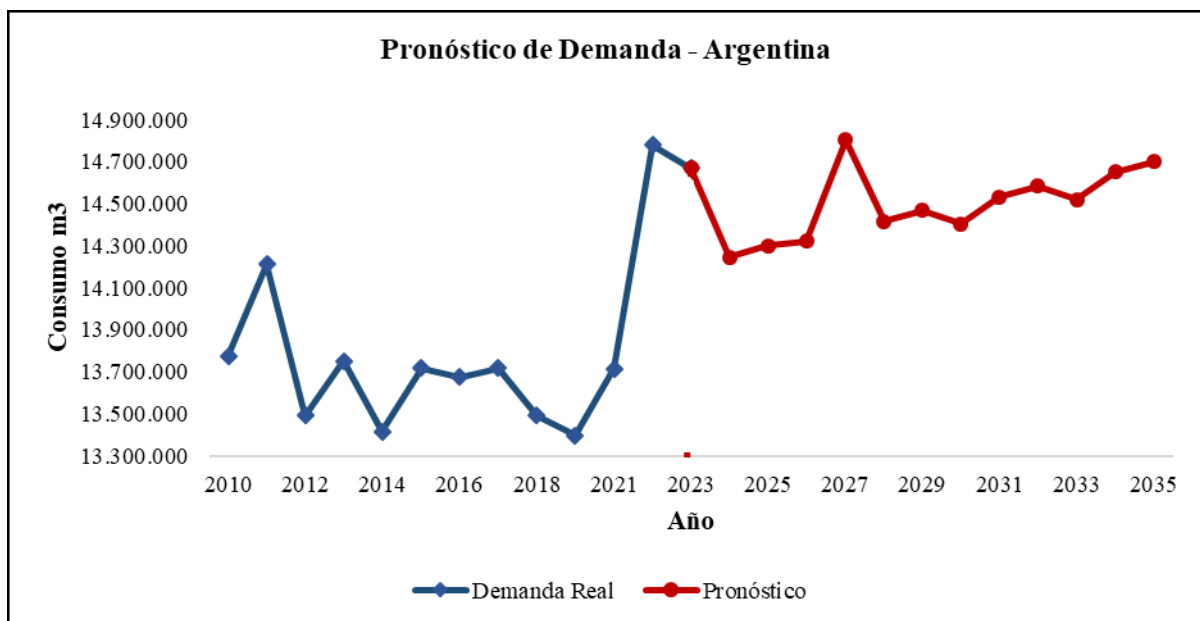


Ilustración 3.10: Pronóstico de la demanda de diésel en Argentina expresada en m³

3.3.3.2 Proyección de Demanda en la provincia de Salta

A continuación, se expone el análisis detallado de la proyección de demanda, el cual se encuentra presentado en la Tabla 8. Este estudio se enfoca exclusivamente en la provincia de Salta, utilizando los datos históricos ya mencionados y aplicando el método definido anteriormente para garantizar la precisión y representatividad de los resultados. De manera complementaria, en la Figura X se ofrece una representación gráfica del estudio, facilitando la visualización clara de las tendencias proyectadas para la demanda en los próximos años.

Pronóstico Demanda Salta en m ³		
Año	Demanda Real	Pronóstico
2010	342.834	
2011	346.569	
2012	344.520	
2013	303.492	
2014	306.608	
2015	312.639	
2016	309.676	
2017	319.099	
2018	316.351	
2019	305.412	
2021	349.581	
2022	391.503	
2023	410.344	410.344
2024		410.063
2025		429.734
2026		420.894
2027		424.737
2028		433.645
2029		431.934
2030		440.842
2031		439.130
2032		448.038
2033		446.327
2034		455.235
2035		453.524

Tabla 3.10: Pronóstico de la demanda de diésel en Salta expresada en m³

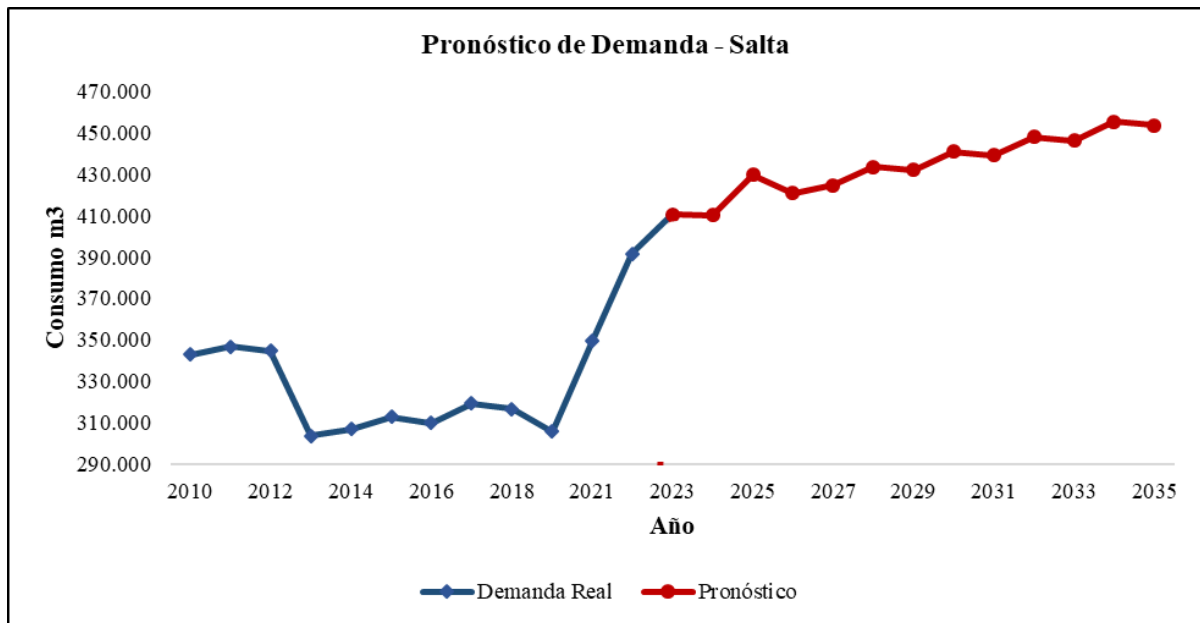


Ilustración 3.11: Pronóstico de la demanda de diésel en Salta expresada en m³

3.3.3.3 Análisis de los Pronósticos

La proyección de la demanda de diesel tanto a nivel nacional como en la provincia de Salta para el período hasta 2035 refleja un crecimiento sostenido, evidenciando un contexto propicio para la planificación y evaluación de proyectos energéticos. A nivel nacional, la demanda real muestra un comportamiento fluctuante entre 2010 y 2023, con una tendencia general hacia el aumento que alcanza un pico significativo en 2021. A partir de este punto, las proyecciones apuntan a un crecimiento estable y continuo, lo que subraya la importancia de considerar esta expansión en la planificación estratégica y el desarrollo de proyectos que aseguren un abastecimiento eficiente y sostenido.

En la provincia de Salta, las tendencias siguen un patrón similar, pero con características particulares que destacan la dinámica regional. La demanda real experimenta una estabilización seguida de un aumento pronunciado entre 2020 y 2023. Las proyecciones para el período posterior indican un crecimiento constante que consolida la tendencia ascendente, alcanzando niveles superiores a los 450.000 m³ en los años venideros. Este ritmo acelerado en la evolución del consumo energético en Salta resalta la importancia de diseñar estrategias específicas para atender las necesidades locales, considerando su impacto en el mercado regional de combustibles.

En síntesis, las proyecciones tanto a nivel nacional como provincial reflejan un entorno favorable para el desarrollo de proyectos que puedan satisfacer la creciente demanda de diesel. La alineación de estas iniciativas con las tendencias proyectadas resulta esencial para garantizar

su integración y éxito en un mercado energético en constante expansión, tanto en Argentina como en la provincia de Salta.

La producción de diésel para autoconsumo, en este contexto, representa una oportunidad clave para aprovechar el crecimiento proyectado en la demanda. Este pronóstico respalda la viabilidad del proyecto al permitir un suministro propio que reduce la dependencia de las fluctuaciones del mercado y asegura la disponibilidad constante del combustible necesario para las operaciones. Además, la capacidad de producción local de diésel no solo fortalece la autonomía energética del proyecto, sino que también ofrece ventajas económicas al disminuir costos asociados al transporte y adquisición en mercados externos. Estas características posicionan al proyecto como una solución estratégica para enfrentar el incremento sostenido en el consumo, garantizando sostenibilidad y competitividad a largo plazo.

3.4 OFERTA DE MATERIA PRIMA

En esta sección, se abordará el análisis de la oferta de plástico reciclado, que constituye la materia prima esencial para la implementación del proyecto. Este estudio se centrará en identificar los principales productores de plásticos reciclados dentro de la provincia de Salta, tanto a través de programas públicos de reciclaje como de empresas privadas dedicadas a la recuperación y procesamiento de plásticos. Se analizarán los tipos de plásticos que se reciclan, su disponibilidad en el mercado local y la capacidad de las fuentes de abastecimiento para satisfacer las necesidades mensuales del proyecto.

Cabe señalar que, debido a la naturaleza sensible de los datos, no será posible obtener información detallada sobre las capacidades productivas específicas de cada una de estas empresas. Sin embargo, se intentará acceder a la información general disponible para realizar una estimación adecuada. Para ello, se trabajará con valores aproximados de capacidad productiva, permitiendo así una evaluación más precisa de la oferta de materia prima y su disponibilidad para el proyecto.

Aunque la cantidad de plástico reciclado disponible será un factor determinante para la capacidad productiva del proyecto, no será el único. Otros aspectos como la eficiencia del proceso de reciclaje y los rendimientos de la pirólisis también influirán en la cantidad de material que se podrá procesar mensualmente. Este análisis permitirá establecer estrategias de abastecimiento efectivas, asegurando un flujo continuo de materia prima, lo que contribuirá a garantizar la sostenibilidad operativa y el éxito del proyecto a largo plazo.

3.4.1 Reciclaje de plástico en la provincia de Salta

Para garantizar un suministro eficiente de plástico reciclado, es esencial contar con una estimación aproximada de la cantidad de plástico disponible en la provincia de Salta. Según datos del Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, en 2010 Salta generaba aproximadamente 890 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (RSU). Proyectando esta cifra al año 2025, se estima que la generación de RSU alcanzará las 1.364 toneladas por día (Argentina.gob.ar, 2010), de las cuales el 9,4% corresponde a plásticos.

Gracias a los diversos programas de reciclaje implementados en la provincia, se ha logrado reciclar aproximadamente el 8% de los residuos recogidos diariamente, considerando únicamente el reciclaje público y excluyendo las actividades realizadas por empresas privadas o corporaciones dedicadas al reciclaje. Este avance refleja un progreso significativo en la gestión de residuos en la provincia (Argentina Municipal, 2023).

Con base en esta información, se calcula que la provincia de Salta podría recolectar y reciclar aproximadamente 3.382,72 toneladas de RSU mensualmente, de las cuales se estima que 318 toneladas serían plásticos. Estos valores proporcionan un panorama preliminar del potencial de obtención de materia prima reciclada para el proyecto, proveniente exclusivamente de fuentes públicas.

Es importante señalar que en la ciudad de Salta no existen bases estadísticas sistematizadas que registren las distintas etapas de la gestión de residuos ni las características específicas de los mismos. Sin embargo, dado que el comportamiento de la sociedad en términos de generación de residuos es relativamente homogéneo en todo el país, se toma como referencia la caracterización de residuos sólidos realizada por el Instituto de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires en colaboración con la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE) y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA). En este estudio se discriminan, salvo excepciones, siete tipos diferentes de plásticos.

Según los datos de este estudio, los plásticos más relevantes para el proyecto presentan las siguientes proporciones dentro del total de plásticos reciclados:

- HDPE (Polietileno de Alta Densidad): representa el 14,6% del total de los plásticos presentes en los RSU.
- LDPE (Polietileno de Baja Densidad): representa el 43,7% del total de los plásticos presentes en los RSU.

Considerando estos porcentajes y proyectando para el año 2025, se estima que, de las 318 toneladas mensuales de plástico reciclado, un total de 185,38 toneladas corresponderían a los plásticos de interés para el proyecto, específicamente HDPE y LDPE.

3.4.2 Empresas Productoras

En esta sección, se analizarán las empresas privadas radicadas en la provincia de Salta que se dedican al reciclaje de plástico, complementando la información previamente expuesta sobre los programas públicos de reciclaje. A partir de esta revisión, se identificarán los potenciales proveedores locales del sector privado que podrían abastecer de manera eficiente las necesidades productivas del proyecto:

- INTREC: Empresa dedicada a ofrecer soluciones integrales en reciclaje, con un enfoque en la economía circular. Procesa una variedad de plásticos, incluyendo HDPE, LDPE, PP, PET y PVC, y se enfoca en transformar residuos en productos útiles, contribuyendo a la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental. (INTREC, sf)
- Petit Plast: Empresa familiar con más de 40 años en el mercado, especializada en la fabricación de productos basados en polietileno. Además de su actividad principal de distribución y venta de productos descartables, se destaca por su compromiso con el reciclaje de polietileno. Ofrece cobertura en el Noroeste y Noreste Argentino, promoviendo la economía circular en la región. (Intedya, sf)
- Salta Plast: Empresa dedicada a la fabricación de productos plásticos, especialmente en polietileno, y con una cartera de clientes que incluye tanto el sector industrial como comercial. También se involucra en el reciclaje de polietileno, reafirmando su compromiso con la sostenibilidad y la economía circular. (Saltaplast, sf)
- EcoNorte: Empresa salteña con 13 años de experiencia en el reciclaje, enfocada en la recuperación y tratamiento de materiales reciclables, con un enfoque en ofrecer soluciones sostenibles para organizaciones industriales, comerciales y mineras. Se especializa en el reciclaje de PET, PP, HDPE y LDPE, consolidándose como un actor clave en la economía circular regional. (Econorte Reciclado, sf)

Dentro de las empresas mencionadas, Petit Plast y Salta Plast son las de mayor capacidad productiva de plástico HDPE y LDPE, cada una produce una cantidad similar a la recuperada mediante los programas públicos de reciclaje. Las demás empresas presentan capacidades inferiores, aunque siguen siendo alternativas viables para el abastecimiento de materia prima.

En conjunto, considerando todas las empresas analizadas, la producción total de plástico reciclado en la provincia alcanza aproximadamente las 500 toneladas mensuales, lo que refuerza la viabilidad del abastecimiento para el proyecto.

3.4.3 Capacidad Operativa

La capacidad productiva del proyecto dependerá de diversos factores, siendo uno de los principales la cantidad de plástico reciclado disponible. No obstante, este no será el único factor determinante, ya que otros elementos como el rendimiento del proceso de pirólisis y la cantidad de diésel que se desea obtener también influirán de manera significativa en la capacidad de procesamiento. Si bien la disponibilidad de plástico reciclado es un aspecto crucial, la capacidad productiva total se calculará considerando igualmente los objetivos de producción de diésel y las características operativas del proceso, los cuales serán detallados en capítulos posteriores.

Para alcanzar los objetivos de producción establecidos, se estima necesario procesar un total de 174 toneladas mensuales de plástico reciclado, específicamente combinando los plásticos HDPE y LDPE, que se identifican como los más adecuados para el proceso de pirólisis. Esta cantidad de material permitirá cumplir con los requisitos operativos necesarios para alcanzar la producción deseada de diésel, tomando en cuenta los rendimientos del proceso que se desarrollarán en el capítulo correspondiente.

En conclusión, el proyecto se abastecerá exclusivamente de plástico reciclado proveniente de empresas privadas especializadas en el reciclaje de polietilenos (HDPE y LDPE) en la provincia de Salta. Esta decisión se basa en la flexibilidad para establecer acuerdos comerciales a mediano y largo plazo, así como en los estrictos procesos de pretratamiento que estas empresas aplican al material, el cual incluye clasificación por tipo de plástico y color, limpieza profunda para eliminar contaminantes como etiquetas y residuos orgánicos, y trituración y pelletizado estandarizado que garantizan homogeneidad en el tamaño y densidad del material. Estos pasos permiten que el plástico llegue listo para ser procesado en nuestro sistema de pirólisis sin requerir tratamientos previos, optimizando así costos operativos y tiempo de producción.

Según datos del sector, el reciclaje privado en Salta procesa aproximadamente 500 toneladas mensuales de HDPE y LDPE. Nuestra demanda estimada de 174 toneladas mensuales, equivalente al 34% del total disponible, se ajusta a la capacidad instalada de estos proveedores, con un precio de compra promedio de \$700 por kilogramo. Este volumen asegura estabilidad en el abastecimiento sin saturar la oferta local, proporciona margen para escalar la

producción en fases futuras y garantiza trazabilidad del material, cumpliendo con los estándares de economía circular.

3.5 CONCLUSIÓN

El análisis desarrollado a lo largo del capítulo confirma la viabilidad del proyecto en sus aspectos fundamentales. En primer término, se ha verificado que la provincia de Salta cuenta con la capacidad necesaria para abastecer las 174 toneladas mensuales de plástico reciclado (HDPE y LDPE) requeridas, a un precio competitivo de \$700/kg, garantizando así un suministro constante en condiciones óptimas para su procesamiento.

El estudio evidencia, además, un crecimiento sostenido en la demanda de Diésel Grado 2 y Grado 3, acompañado de una marcada volatilidad en los precios de los combustibles convencionales. Este escenario refuerza las ventajas competitivas del modelo de autoabastecimiento propuesto, que se posiciona como una alternativa estable frente a las fluctuaciones del mercado.

La principal fortaleza del proyecto reside en su capacidad para garantizar un suministro energético independiente, reduciendo significativamente tanto la exposición a las variaciones de precios como la dependencia de distribuidores externos. Esta autonomía operativa, combinada con la disponibilidad comprobada de materia prima y el crecimiento constante de la demanda, no solo valida la viabilidad técnica y económica del proyecto, sino que además establece bases sólidas para su potencial replicación en otros contextos industriales con características similares.

En síntesis, los resultados obtenidos no solo avalan la implementación del proyecto bajo las condiciones analizadas, sino que además destacan su capacidad para constituirse como referente de eficiencia operativa y sostenibilidad dentro del marco de la economía circular aplicada al sector energético.

4 ESTUDIO TÉCNICO

El presente capítulo establece los fundamentos operativos, el diseño de procesos y la selección de equipos e instalaciones necesarias para la producción de diésel a partir de plásticos reciclados mediante pirólisis. Se analiza en detalle cada etapa del proceso productivo, desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del combustible final, considerando los parámetros operativos, el balance de materia y la capacidad productiva proyectada.

Para garantizar la viabilidad del proyecto, se estudió la selección de equipos específicos que cumplen con los requerimientos técnicos y operativos, asegurando una producción eficiente y segura. Además, se describen las instalaciones auxiliares esenciales, como el suministro de nitrógeno, agua, gas natural comprimido y aire comprimido, que permiten el correcto desempeño del sistema.

A lo largo del capítulo, se presentan diagramas de flujo, balances de materia y cálculos que validan la capacidad de producción, proyectando la generación de diésel a escala industrial y evaluando la factibilidad técnica del proceso.

4.1 PROCESO PRODUCTIVO

En esta sección se detallará el proceso productivo completo para la obtención de combustibles a partir de la pirólisis de polietileno de alta y baja densidad. Inicialmente, se describirán las etapas del proceso, analizando en profundidad cada una de ellas. Se hará especial énfasis en las etapas de pirólisis y destilación, dado que son fundamentales para la transformación de los residuos plásticos en productos de valor agregado.

Para estas etapas críticas, nos basamos principalmente en dos estudios que trabajaron la pirólisis de la manera en que nos interesaba, (Paúl Palmay Paredes, 2022) y (Brajendra K. Sharma, 2014). Estos dos ofrecen datos clave sobre rendimientos y características de los productos obtenidos. Esta información fue esencial para definir los parámetros operativos del proyecto y garantizar un diseño eficiente y sostenible.

A partir de las etapas definidas, se presentará el diagrama de flujo del proceso, que sintetiza gráficamente la lógica operativa, y los balances de masa, que muestran cómo se distribuyen las corrientes de entrada y salida a lo largo de las diferentes etapas. Estos elementos permiten comprender de manera clara y estructurada la relación entre la materia prima procesada y los productos obtenidos.

4.1.1 Etapas

A continuación, en la Ilustración 4.1 se presenta un diagrama de bloques que sintetiza las principales etapas del proceso productivo. En este diagrama, no se detallan los equipos específicos utilizados en cada fase, sino que se representan únicamente los procesos más relevantes que permiten la transformación de la materia prima en el producto final. Esto facilita una comprensión general del flujo del proceso, antes de profundizar en la explicación detallada de cada etapa.

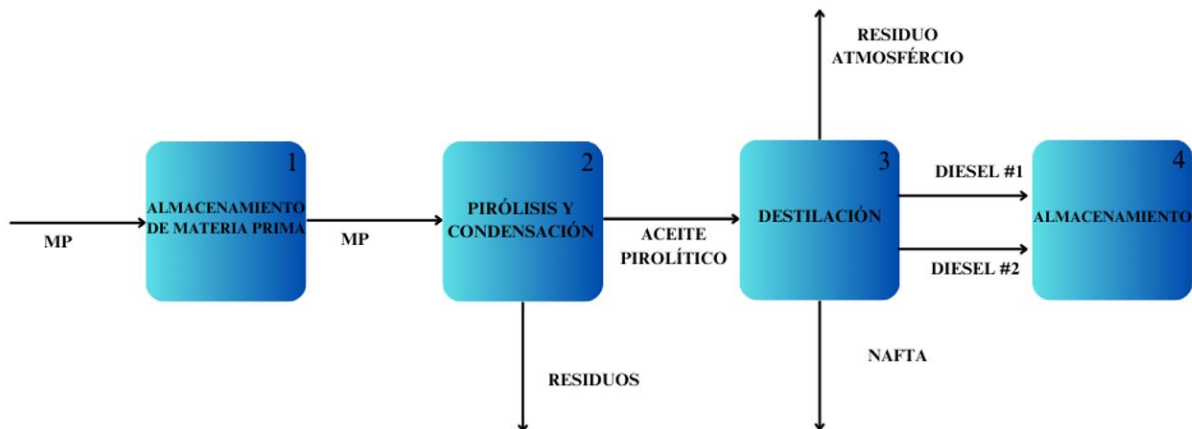


Ilustración 4.1: Diagrama de bloques

4.1.1.1 Recepción y Almacenamiento de Materia Prima

La fase inicial del proceso de producción de combustible comienza con la recepción y el almacenamiento de las materias primas, siendo el plástico reciclado el principal insumo requerido para llevar a cabo el proceso de pirólisis.

El plástico reciclado será adquirido en forma de partículas preprocesadas y uniformes, con tamaños controlados para garantizar un calentamiento homogéneo dentro del reactor pirolítico. Se priorizará el uso de fragmentos en forma de pellets o piezas de dimensiones inferiores a 50 mm, lo cual maximiza la transferencia térmica y la eficiencia del proceso.

Es indispensable que el material mantenga un contenido de humedad reducido, idealmente inferior al 1-2% en peso. La presencia de agua no solo incrementa el consumo energético debido a la necesidad de evaporación, sino que también genera vapor que podría alterar el equilibrio del sistema, reduciendo su eficiencia global y afectando la calidad de los productos obtenidos.

Adicionalmente, los plásticos seleccionados deben contar con un alto contenido de carbono y bajos niveles de oxígeno en su composición molecular. Estas características son

fundamentales para optimizar la generación de aceites y gases condensables durante la reacción de pirólisis, maximizando el rendimiento del proceso y la calidad del producto final.

Finalmente, el almacenamiento del material deberá realizarse en condiciones que preserven su calidad, evitando contaminaciones externas y controlando los niveles de humedad ambiental, con el objetivo de mantener la uniformidad y las propiedades requeridas de la materia prima.

4.1.1.2 Pirólisis y Condensación

Para esta etapa del proceso, se considera como referencia el estudio realizado por Paúl Palmary Paredes, titulado "Revalorización Energética de Residuos Plásticos Urbanos mediante Pirólisis: Estudio Termodinámico, Experimentación, Aplicación y Usos" (Paúl Palmary Paredes, 2022), donde se investigó la pirólisis de residuos plásticos urbanos de forma experimental.

4.1.1.2.1 Variables del Proceso

Tras analizar la bibliografía y los resultados obtenidos, hemos definido las variables bajo las cuales se llevará a cabo el proceso de pirólisis, con el fin de optimizar la producción de la fracción líquida. Esta fracción servirá como base para maximizar la cantidad de diésel producido en la fase inicial del proceso. A continuación, se presenta la Tabla 4.2 con las variables de operación que se utilizarán.

Variables de Operación en el Proceso de Pirólisis	
Variable	Magnitud
Temperatura	400°C
Presión de trabajo	1 atm
Temperatura de condensación	10°C
Agitación	Si (revoluciones bajas)
Tasa de calentamiento	20°C/min
Gas de purga	150 ml/min
Plástico	HDPE y LDPE
Tiempo de residencia	3 horas

Tabla 4.1: Variables del Proceso de Pirólisis

4.1.1.2.2 Rendimiento

El estudio proporciona un análisis detallado sobre los rendimientos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de plásticos, permitiendo establecer referencias para evaluar la eficiencia del proyecto. Según los resultados obtenidos en este estudio, se considera un

rendimiento del 68% en la conversión de plástico en aceite pirolítico, valor que se adopta como base para la estimación de la producción dentro de este proyecto.

Este rendimiento representa una cifra óptima en términos industriales, ya que permite maximizar la obtención de fracciones líquidas aprovechables, como el diésel, minimizando la generación de residuos y mejorando la viabilidad económica del proceso.

4.1.1.2.3 Proceso

En esta sección explicaremos entonces cómo definimos que operaremos cada batch del proceso de pirólisis. En cada batch, se introducen 2900 kg de polietileno de alta y baja densidad para su transformación en productos valiosos. Se abre la entrada del reactor pirolítico y se carga el polietileno triturado en partículas pequeñas para mejorar la transferencia de calor y garantizar una descomposición uniforme. Una vez cargado el material, se cierra herméticamente el reactor para evitar fugas durante el proceso.

A continuación, se conecta el suministro de nitrógeno como gas de purga y se ajusta su flujo a 150 ml/min. Este gas inerte crea una atmósfera libre de oxígeno dentro del reactor, previniendo la combustión y promoviendo una descomposición controlada del material. Seguidamente, se activa el sistema de agitación interna para mantener el polietileno en movimiento durante el proceso, optimizando el contacto térmico y evitando puntos fríos.

El sistema de calentamiento del reactor se pone en marcha, programando una tasa de calentamiento de 20 °C/min. Esta rampa de calentamiento gradual permite que el material alcance de manera uniforme la temperatura de 400°C, evitando sobrecalentamientos localizados.

Una vez alcanzada la temperatura de 400°C, se mantiene constante durante 3 horas (tiempo de residencia), permitiendo que el polietileno se descomponga en hidrocarburos más simples mediante craqueo térmico, generando una mezcla de gases y vapores líquidos. Los productos generados son canalizados hacia un sistema de condensación, donde los vapores de mayor peso molecular se enfrían a 10°C, condensándose en una fracción líquida (aceite pirolítico). Los gases no condensables, como metano e hidrógeno, son redirigidos para abastecer los quemadores del reactor pirolítico.

El proceso concluye dejando que el reactor se enfríe de manera controlada una vez transcurridas las 3 horas de residencia a temperatura constante. Una vez que el reactor ha alcanzado una temperatura segura, se procede a abrirlo y retirar el residuo sólido generado

durante la pirólisis. Este subproducto se reserva de forma adecuada, asegurando su almacenamiento en condiciones óptimas para su posterior comercialización en aplicaciones industriales o energéticas. Finalmente, se inspecciona y prepara el reactor para iniciar un nuevo ciclo, asegurando que esté limpio, sellado y listo para recibir la siguiente carga de materia prima.

4.1.1.2.4 Caracterización del Producto Obtenido

En este estudio se describe que los productos de la fracción líquida generada en el proceso de pirólisis presentan un aspecto aceitoso y ceroso a temperatura ambiente, con propiedades específicas determinadas por la presencia de compuestos de cadena larga (mayores a 20 carbonos).

Como se aprecia en la Tabla 4.2, el punto de inflamación es relativamente bajo debido a los compuestos ligeros presentes, mientras que la viscosidad es elevada, lo que puede ser atribuido a la presencia de ceras en la mezcla.

Los análisis también revelan bajos contenidos de agua y azufre, lo que es beneficioso para su uso como combustible, ya que minimiza la formación de compuestos corrosivos y mejora el desempeño en motores industriales.

Propiedades Fisicoquímicas del Producto Obtenido		
Parámetro	Aceite Pirolítco	Unidades
Poder calórico	46490	kJ kg ⁻¹
Cetano calculado	--	--
Punto de inflamación	19	°C
API a 60°F	41,49	°API
Gravedad específica (15°C)	0,8124	--
Densidad (15°C)	812,4	Kg m ⁻³
Contenido de azufre	0,194	ppm
Viscosidad cinemática (40°C)	1,7	cSt
Contenido de agua y sedimentos	0,39	%v/v

Tabla 4.2: Caracterización del Aceite Pirolítco

4.1.1.3 Destilación

En este proyecto, se tomó como referencia el estudio realizado por Brajendra K. Sharma y colaboradores, titulado "Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags" (Brajendra K. Sharma, 2014). Este trabajo analizó la destilación de hidrocarburos obtenidos a partir de la pirólisis de bolsas plásticas de

polietileno, con un enfoque en la producción y caracterización de combustibles alternativos, como el diésel, de manera experimental.

4.1.1.3.1 Variables del Proceso

En Tabla 4.3 se han definido las variables bajo las cuales se llevará a cabo el proceso de destilación fraccionada. El objetivo principal es maximizar la recuperación de las fracciones líquidas correspondientes al rango de diésel, logrando una separación eficiente de los productos resultantes de la pirólisis

Variables de Operación en el Proceso de Destilación	
Variable	Magnitud
Rango de temperatura de destilación	
Diésel Grado 2	190 – 290 °C
Diésel Grado 3	290 – 340 °C
Presión de trabajo	1 atm
Tasa de calentamiento	5 - 10 °C/min
Tipos de columna	Fraccionamiento con platos
Condensación de fracciones	Agua a 10 – 20 °C
Tiempo de residencia	3 horas

Tabla 4.3: Variables del proceso de destilación

4.1.1.3.2 Rendimiento

La investigación presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos a través de la destilación, estableciendo parámetros clave para la definición del proceso. Los rendimientos obtenidos, que serán utilizados como referencia en este proyecto, se detallan en la Ilustración

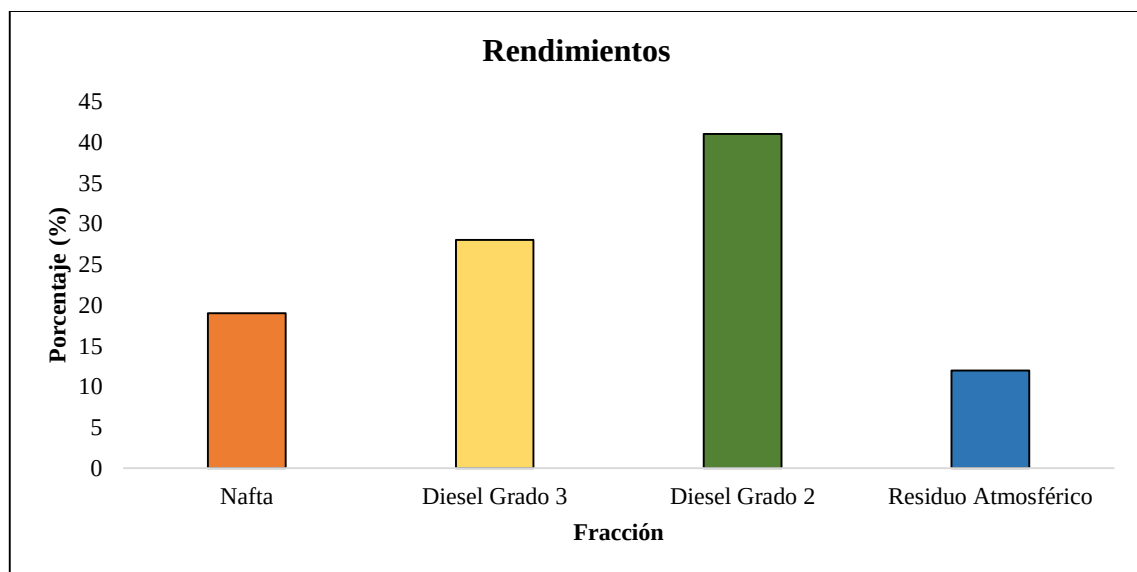


Ilustración 4.2: Rendimientos del Proceso de Destilación

Un aspecto destacado de estos resultados es el alto rendimiento obtenido en las fracciones buscadas, ya que, el rendimiento de Diésel Grado 3 supera el 40% y el de Diésel Grado 2 alcanza más del 25%, logrando un rendimiento combinado de casi el 70% en productos tipo diésel. Este rendimiento refuerza la viabilidad del proceso al producir cantidades significativas del combustible objetivo.

Además, aunque no está dentro de las incumbencias de esta tesis, es relevante señalar que se obtuvo más de un 10% de Nafta. Este subproducto, altamente valioso, podría tener un impacto positivo en el proyecto si se incluyera en un análisis más detallado, aunque no será abordado en este trabajo. Estos resultados subrayan el potencial económico y estratégico del proceso propuesto.

4.1.1.3.3 Proceso

El proceso comienza con la preparación del sistema de destilación. Se añade aceite pirolítico a la torre de destilación, asegurándose de que el tanque de recolección de fracciones esté limpio y seco. El aceite se filtra previamente para eliminar partículas sólidas residuales que puedan interferir en la separación eficiente de las fracciones.

Una vez cargada la torre, se establece una presión de trabajo atmosférica (1 atm), lo que simplifica el control del proceso y permite una operación segura. Se programa una tasa de calentamiento de 5 a 10 °C/min, asegurando que las fracciones se evaporen de manera gradual, evitando la degradación térmica de los compuestos y garantizando una separación precisa.

El sistema se calienta hasta alcanzar las temperaturas correspondientes a cada fracción:

- Diésel Grado 2: rango de 190 – 290 °C
- Diésel Grado 3: rango de 290 – 340 °C.

Los vapores generados durante la destilación son conducidos hacia un condensador, donde se enfrían a temperaturas de 10 a 20 °C, permitiendo su transformación en líquido. Este sistema asegura una alta eficiencia en la captura de las fracciones líquidas sin pérdida significativa de producto. Durante el proceso, las fracciones se recolectan de forma secuencial en recipientes separados.

Si bien una torre de destilación puede operar de manera continua, en este caso el proceso se lleva a cabo de forma discontinua, ya que la alimentación proviene de la pirólisis, la cual se

realiza en ciclos o lotes. Por lo tanto, la destilación también se efectúa en lotes, siguiendo la naturaleza intermitente del suministro de aceite pirolítico.

Para optimizar la recuperación de productos y evitar la pérdida de hidrocarburos valiosos, el sistema cuenta con un Rehervidor o Reboiler, el cual calienta los residuos pesados que quedan en la base de la torre y genera vapores adicionales que se recirculan en la destilación. De esta manera, se maximiza la eficiencia en la separación de fracciones sin comprometer la calidad del proceso.

El proceso tiene una duración estimada de 3 horas. Una vez finalizada la recolección de las fracciones, la torre se enfría de forma controlada para evitar daños al equipo y permitir la extracción segura de los residuos remanentes, como compuestos de alto punto de ebullición ($>340^{\circ}\text{C}$). Estos residuos pueden destinarse a otras aplicaciones, como la producción de lubricantes o combustibles de menor calidad.

Finalmente, se realiza una inspección del sistema para garantizar que el equipo esté limpio y listo para un nuevo ciclo de destilación. El aceite pirolítico restante, si no se ha procesado por completo, se almacena adecuadamente para futuros ciclos de operación.

4.1.1.3.4 Caracterización de los Productos Obtenidos

En la Tabla 4.4 se presentan las características de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de plástico reciclado, correspondientes a Diésel Grado 2 y Grado 3. A su vez, se realiza una comparación con las especificaciones establecidas en la normativa argentina para estos combustibles, así como con los estándares internacionales EN 590 y ASTM D975.

La norma EN 590, utilizada en Europa, establece los requisitos técnicos y de calidad para el diésel utilizado en motores de encendido por compresión, asegurando su compatibilidad con las tecnologías modernas y su impacto ambiental reducido. Por su parte, la norma ASTM D975, ampliamente adoptada en América y otras regiones, define las especificaciones del diésel en función de sus propiedades físicas y químicas, garantizando su rendimiento y seguridad en aplicaciones comerciales e industriales.

A través de esta comparación, es posible evaluar el grado de conformidad del diésel obtenido por pirólisis con los parámetros exigidos para su uso en motores diésel convencionales.

Características de los Productos Obtenidos							
	Unidad	Norma ASTM D975	Norma EN 590	Diésel Grado 2		Diésel Grado 3	
				Pirólisis	Ley Argentina	Pirólisis	Ley Argentina
Baja temperatura	°C						
Punto de obstrucción por frío ²⁴				– 30,1		4,7	
Punto de fluidez ²⁵				– 37,3	≤ -7	-10	≤ -7
Punto de filtro frío ²⁶				– 31,0		3,7	
Estabilidad oxidativa							
Viscosidad cinemática ²⁷	mm ² /s	1,9-4,1	2-4,5	2,48	2-4,5	2,96 (0)	2-4,5
Número de cetano		≥ 40	≥ 51	54,6	48	73,4	51
Punto de inflamación ²⁸	°C	≥ 52	≥ 55	51	≥ 45	81,5	≥ 45
Cicatriz de desgaste, 60°C ²⁹	µm	≤ 520	≤ 460	293		198	
Azufre	ppm	≤ 515	≤ 10	3	0-500	2	0-10
Densidad, 15°C	kg/m ³		820-845	802	800-870	839	800-870
Tensión superficial, 40°C ³⁰	mN/m		≤ 200	22,5		24,7	
Poder calorífico superior ³¹	MJ/kg			45,86		46,16	
Porcentaje de Carbono	%			85		85,3	
Porcentaje de Hidrógeno	%			14,5		14,8	
Porcentaje de Nitrógeno	%			0,4		0,31	
Porcentaje de Oxígeno	%			0,11		0	

Tabla 4.4: Caracterización de los Productos Obtenidos

²⁴ Punto de obstrucción por frío: Temperatura mínima a la cual un fluido se vuelve tan espeso que obstruye el paso por conductos.

²⁵ Punto de fluidez: Temperatura más baja a la cual un líquido puede fluir bajo condiciones estándar.

²⁶ Punto de filtro frío: Temperatura a la que el combustible comienza a formar cristales sólidos que pueden bloquear los filtros.

²⁷ Viscosidad cinemática: Medida de la resistencia de un fluido a fluir bajo la influencia de la gravedad, expresada en unidades de tiempo.

²⁸ Punto de inflamación: Temperatura mínima a la cual un líquido produce vapores inflamables en el aire.

²⁹ Cicatriz de desgaste, 60°C: Marca o daño visible en una superficie de contacto después de una prueba de fricción a 60°C.

³⁰ Tensión superficial, 40°C: Fuerza que actúa sobre la superficie de un líquido a 40°C, tendiendo a reducir su área superficial.

³¹ Poder calorífico superior: Cantidad total de energía liberada cuando un combustible se quema completamente, incluyendo el calor latente de vapor de agua.

A partir de la revisión de sus propiedades, se observan ciertas diferencias con respecto a los valores de referencia, aunque en términos generales el combustible presenta características compatibles con las especificaciones requeridas.

En cuanto a las propiedades de baja temperatura, no se dispone de valores para el punto de obstrucción por frío ni para el punto de filtro frío, lo que impide una comparación directa con los límites establecidos por la normativa. Sin embargo, en el caso del punto de fluidez, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango permitido, lo que indica que el diésel de pirólisis no presentará problemas de fluidez a bajas temperaturas. Además, la viscosidad cinemática para ambos grados de diésel cumple con los valores especificados en las normas, lo que sugiere que la fluidez del combustible es adecuada para su uso en sistemas de inyección sin comprometer la lubricación de los componentes.

El número de cetano de ambos grados de diésel supera los valores mínimos requeridos, lo que indica una buena capacidad de ignición y una combustión eficiente. Asimismo, el punto de inflamación cumple con las exigencias normativas, garantizando condiciones seguras de almacenamiento y manipulación. En cuanto a la cicatriz de desgaste a 60°C, los valores obtenidos se encuentran dentro del límite permitido, lo que implica una adecuada lubricidad y menor desgaste de los componentes del sistema de inyección.

El contenido de azufre en ambos grados de diésel cumple con los valores establecidos por la normativa, lo que es un aspecto positivo en términos de impacto ambiental y compatibilidad con los motores modernos. En relación con la densidad a 15°C, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango normativo, lo que indica que el diésel de pirólisis presenta características similares a los combustibles convencionales en este aspecto.

En lo que respecta a la tensión superficial, los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros aceptados según la norma ASTM D975, lo que sugiere un comportamiento adecuado en la atomización del combustible dentro de los inyectores. Por otro lado, en cuanto al poder calorífico superior, si bien se ha determinado su valor en el diésel de pirólisis, no existen especificaciones concretas en la normativa de referencia para realizar una comparación directa.

Desde el punto de vista de la composición química, los valores obtenidos en carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno reflejan una composición acorde con la de los combustibles fósiles convencionales. El elevado porcentaje de carbono e hidrógeno, combinado con bajos niveles de oxígeno, favorece un alto poder calorífico, lo que convierte a estas fracciones en

fuentes de energía eficientes. Además, la baja cantidad de nitrógeno implica menores emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), contribuyendo a un menor impacto ambiental.

En conclusión, tanto el Diésel Grado 2 como Grado 3, obtenido a partir de la pirólisis de plástico reciclado, cumple con las especificaciones establecidas tanto en la normativa argentina como en los estándares internacionales evaluados. Su conformidad con los requisitos técnicos permite su utilización en motores diésel sin requerir modificaciones en los sistemas de combustión, asegurando un desempeño adecuado en términos de seguridad y eficiencia. Además, su producción a partir de residuos plásticos representa una alternativa con beneficios ambientales, contribuyendo a la valorización de materiales descartados y a la reducción del impacto ambiental asociado a los combustibles fósiles.

4.1.1.4 Almacenamiento del Diésel

Tras finalizar el proceso de producción y obtener el diésel, su almacenamiento debe cumplir con requisitos estrictos para preservar la calidad del combustible y garantizar la seguridad durante su manejo.

Los tanques de almacenamiento deben ser completamente herméticos, evitando la entrada de aire, humedad u otros contaminantes que puedan comprometer las propiedades del diésel o inducir procesos de oxidación. Asimismo, los tanques deberán fabricarse con materiales altamente resistentes y compatibles con productos derivados de hidrocarburos, como acero al carbono, acero inoxidable o materiales con recubrimientos anticorrosivos, asegurando su durabilidad y protección frente a fugas o corrosión.

Para mantener la estabilidad química del diésel, es esencial almacenarlo a temperaturas moderadas que minimicen la evaporación de sus componentes más ligeros. En zonas con temperaturas extremas, se recomienda equipar los tanques con un aislamiento térmico adecuado, garantizando así que las variaciones térmicas no afecten la calidad del producto almacenado.

Es crucial gestionar eficazmente el agua que pueda acumularse en el interior de los tanques, ya sea por condensación o durante el llenado. La presencia de agua puede provocar corrosión interna y deteriorar el combustible, por lo que los tanques deben contar con sistemas de drenaje eficientes que permitan su extracción periódica.

Para proteger el diésel de los efectos adversos de la radiación ultravioleta, se debe evitar la exposición directa de los tanques a la luz solar. Esto puede lograrse ubicándolos en áreas

sombreadas o recubriéndolos con materiales específicos que bloqueen la incidencia solar, preservando así la integridad del combustible.

En conjunto, estas condiciones de almacenamiento son fundamentales para garantizar la calidad y seguridad del diésel, permitiendo su uso eficiente y confiable en las operaciones de la empresa.

4.1.2 Diagrama de Flujo

El proceso diseñado para la producción de combustible a partir de plástico reciclado mediante pirólisis consta de varias etapas consecutivas, desde el procesamiento de la materia prima hasta la obtención y almacenamiento de los productos finales (Diesel #1 y Diesel #2). A continuación, se detalla cada etapa:

- Alimentación de materia prima e insumos

La materia prima (MP), constituida por plástico reciclado, se almacena en silos (SI – 101) y es introducida en el Reactor Pirolítico (RP - 201) a través de una tolva de alimentación (TV - 101). Por otro lado, el nitrógeno (IN), utilizado en el proceso, se encuentra almacenado en un tanque específico (TN – 101) y es suministrado al Reactor Pirolítico mediante una instalación auxiliar diseñada para su distribución controlada.

- Pirólisis en el reactor

En el Reactor Pirolítico (RP - 201), el plástico reciclado se somete a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Este proceso de pirólisis descompone el plástico en gases, líquidos y residuos sólidos.

Los residuos sólidos (FS) generados durante esta etapa se dirigen al Tanque de Residuos Pirolíticos (TR - 202) para su almacenamiento y posterior disposición.

- Colector de gases

Los gases generados en el reactor (FG) se envían al Colector de Gases (CG - 202), donde son separados y dirigidos a las siguientes etapas.

Gases no condensables: Una fracción de los gases no condensables (GNC) es redirigida hacia el quemador del Reactor Pirolítico (RP - 201), donde se reutilizan como fuente de calor, eliminando la necesidad de consumir gas natural comprimido.

- Intercambiador de calor

Los gases condensables (GC) procedentes del Colector de Gases se encuentran a altas temperaturas, por lo que son enfriados parcialmente en el Intercambiador de

Calor (IQ - 204). Este proceso reduce la temperatura de los gases antes de ingresarlos a la siguiente etapa.

- Separación en torre de destilación y reboiler

En la base de la Torre de Destilación (TD - 301), ingresa el aceite pirolítico, el cuál es calentado por el quemador de la torre, comenzando así la separación del mismo en las fracciones buscadas. El Reboiler (RB - 302) proporciona calor adicional al líquido más pesado que se acumula en la parte inferior de la torre, generando vapores que ascienden nuevamente en la torre. Esto mejora la separación de las fracciones ligeras y pesadas.

Los productos obtenidos en la torre son Diésel Grado 2 (extraído de un plato intermedio y enviado al Tanque de Producto (TP – 309), y el Diésel Grado 3 (extraído de un plato inferior y almacenado en el Tanque de Producto (TP – 310). Además, de los platos superiores se extrae Nafta en estado líquido, y será almacenado en un tanque (TR – 304).

Los residuos líquidos (RL) pesados se retiran en la base y se envían al Tanque de Residuos Pesados (TR – 303).

- Condensación y recuperación de líquidos

Los vapores que ascienden desde la torre pasan por un Condensador Parcial (IQ - 304), donde se enfrían parcialmente.

El condensado ingresa al Separador (TS - 305), donde se realiza la separación de fases:

Los líquidos condensados son enviados de vuelta a la Torre de Destilación (TD - 301) como reflujo, optimizando la eficiencia de separación.

Los gases no condensables son almacenados en un tanque específico (TR – 308) y puede ser aprovechado en otros procesos o incluso servir de reserva para el quemador del reactor (RP – 201).

- Enfriamiento final de productos

Los productos finales, Diésel Grado 2 y Diésel Grado 3, son enfriados mediante intercambiadores de calor (IQ - 306 e IQ - 307) antes de ser almacenados. Esto asegura que los combustibles lleguen a los tanques de almacenamiento a una temperatura segura.

- Almacenamiento de productos finales

Los productos obtenidos en la torre de destilación son almacenados en (TP – 309), tanque de producto para Diésel Grado 2, y en (TP – 310), tanque de producto para Diésel Grado 3.

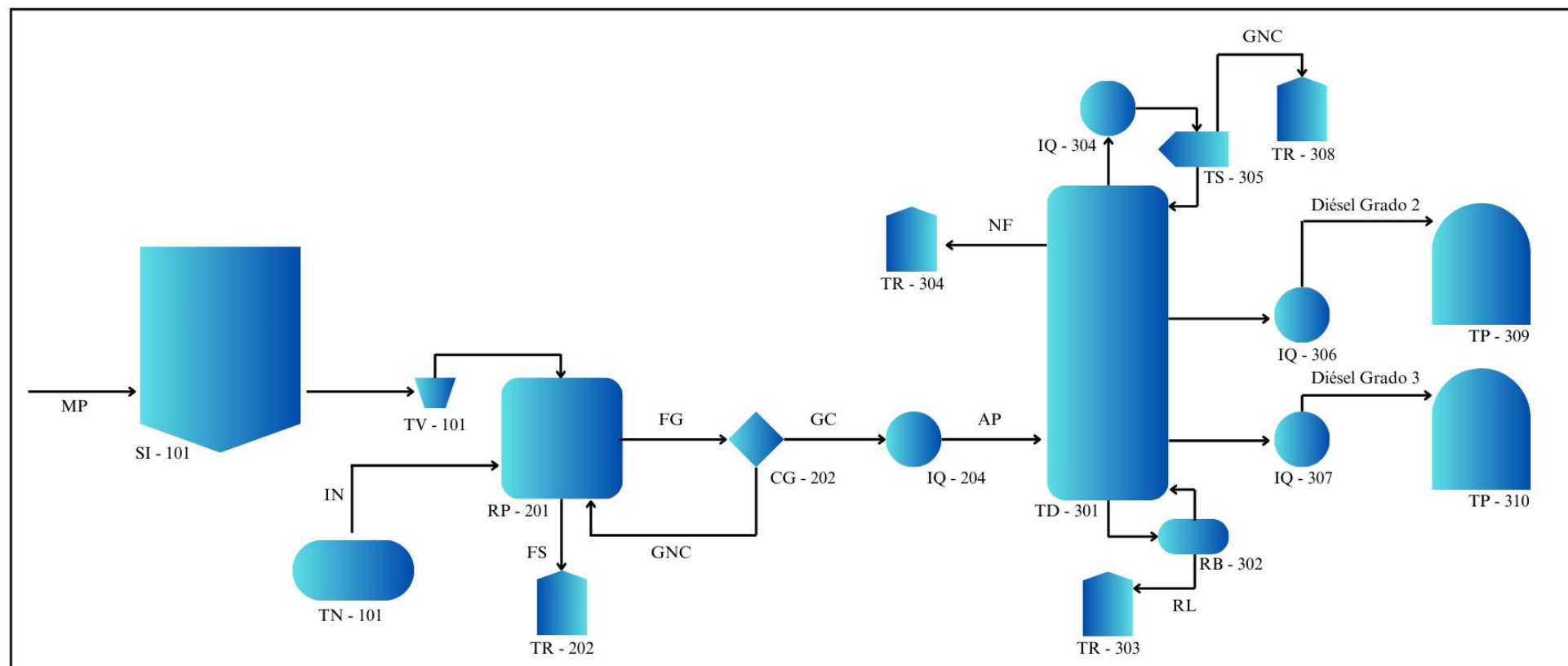


Ilustración 4.3: Diagrama de flujo del proceso

- MP: Materia Prima
- SI – 101: Silos de Materia Prima
- TN – 101: Tanque de Nitrógeno
- TV – 101: Tolva de alimentación
- IN: Insumo (nitrógeno)
- RP – 201: Reactor Piroclítico
- TR – 202: Tanque de Residuos Piroclíticos
- CG – 202: Colector de Gases
- IQ – 204: Intercambiador de Calor
- TD – 301: Torre de Destilación
- RB – 302: Rehervidor o Reboiler
- TR – 303: Tanque de Residuos Pesados
- IQ – 304: Condensador Parcial
- TS – 305: Separador
- TR – 308: Tanque de Residuos Atmosféricos
- IQ – 306: Intercambiador de Calor
- IQ – 307: Intercambiador de Calor
- TP – 309: Tanque de Producto (Diésel Grado 2)
- TP – 310: Tanque de Producto (Diésel Grado 3)

4.1.3 Balance de Materia

El balance de materia es una herramienta fundamental en el análisis de procesos industriales, ya que permite cuantificar y evaluar las entradas, salidas y acumulaciones de materiales en cada etapa del sistema productivo. En el contexto del presente estudio, el balance de materia sintetiza la lógica operativa y los rendimientos del proceso de producción de combustible a partir de pirólisis de plástico reciclado.

La representación gráfica del balance no solo facilita la comprensión del flujo de materiales, sino que también ofrece una visión clara y concisa de cómo se distribuyen y transforman las diferentes corrientes a lo largo del proceso.

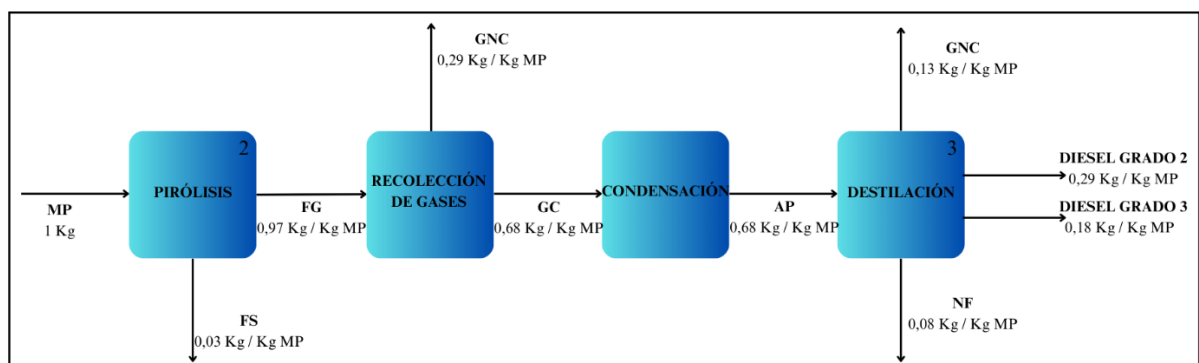


Ilustración 4.4: Balance de materia

El balance de materia mostrado en la Ilustración 4.4 sintetiza las etapas principales del proceso productivo, sin señalar en detalle los equipos necesarios para cada una, utilizando como referencia 1 kg de materia prima (MP). Este enfoque facilita la comprensión, aunque en la operación real se trabajará con toneladas de materia prima, consiguiendo proporcionalmente las fracciones de los productos obtenidos.

Cabe destacar que en el balance de materia no se incluyó la etapa de "recepción y almacenamiento", ya que esto no genera transformaciones en la materia prima ni modifica los flujos de entrada y salida. Dado que no implica una conversión química ni posee rendimientos asociados, no afecta los cálculos de distribución de materiales dentro del proceso productivo.

En el balance se observa cómo la materia prima ingresa a la etapa de pirólisis, donde se generan 0,97 kg de gases (FG), tanto condensables como no condensables, y 0,03 kg de residuos sólidos (FS), mencionados anteriormente también como la fracción sólida.

La fracción gaseosa pasa por la etapa de recolección de gases, efectuada en el recolector de gases (CG – 202), donde se separan los gases no condensables (GNC) que representan 0,29 kg/kg MP y, los condensables (GC) que representan 0,68 kg/kg MP. Estos últimos siguen su camino hacia la etapa de condensación, efectuada en el intercambiador de calor (IQ – 204) donde se transforman en aceite pirolítico (AP) con un rendimiento de 0,68 kg/kg MP.

Luego, en la destilación, se separan 0,13 kg de gases no condensables (GNC), que como ya explicamos anteriormente tiene un alto valor energético, y podría utilizarse incluso para alimentar el quemador del reactor pirolítico, y se obtienen 0,29 kg de Diésel Grado 2, 0,18 kg de Diésel Grado 3 y 0,08 kg de nafta (NF).

En la Ilustración 4.5, se muestra un balance general simplificado, destacando los productos finales de mayor interés: 0,29 kg de Diésel Grado 2 y 0,18 kg de Diésel Grado 3, es decir rendimientos del 29% y 18% respectivamente, por cada kilogramo de materia prima procesada.

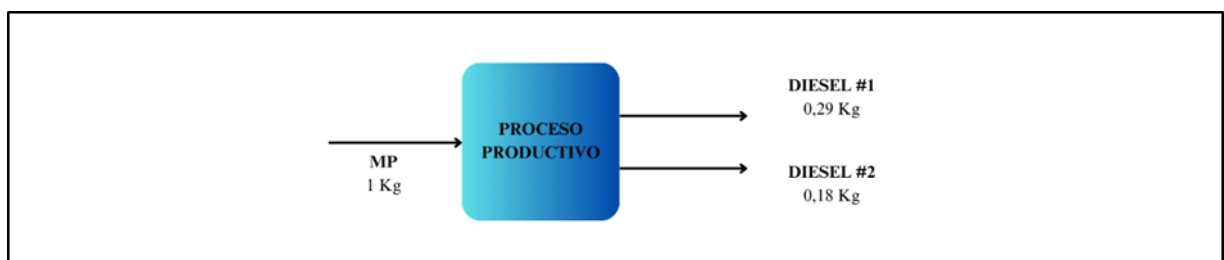


Ilustración 4.5: Balance de materia simplificado

En conclusión, el balance de materia facilita entender la distribución de los productos y subproductos del proceso. Si bien el análisis se presenta por kilogramo de materia prima para mayor claridad, en la práctica industrial se escalará a mayores cantidades manteniendo las mismas proporciones.

4.2 CAPACIDAD PRODUCTIVA

El presente capítulo tiene como objetivo determinar la capacidad productiva del proyecto, considerando las etapas clave del proceso, las variables operativas y los rendimientos obtenidos en cada una de ellas. Este análisis permite establecer de manera precisa la cantidad de combustible que se generará, garantizando una proyección fundamentada en parámetros técnicos y datos de rendimiento. Los resultados de esta evaluación se presentan de forma estructurada en la Tabla 4.5, ofreciendo una visión clara y cuantitativa de la capacidad de producción.

Capacidad de Producción		
Período	Plástico a Procesar (Tn)	Combustible Producido (m ³)
Año	2.088.000	1.103
Mes	174.000	92
Día	8.700	5

Tabla 4.5: Capacidad productiva

Con el objetivo de garantizar el cumplimiento del volumen de producción planificado, se establece un régimen de trabajo diseñado para optimizar la capacidad operativa del proceso de pirólisis. Dicho régimen contempla la realización de dos turnos diarios de trabajo, con una duración de 8 horas cada uno, en los cuales se llevan a cabo tres lotes o batch de procesamiento por jornada laboral, cada uno con una carga de 2900 kg de materia prima. Este esquema de trabajo permite maximizar la eficiencia operativa al mantener un flujo constante de producción durante el día.

Además, se define un calendario de días laborales que abarca de lunes a viernes, asegurando un equilibrio adecuado entre productividad y sostenibilidad operativa. La planificación detallada de los turnos y jornadas laborales busca garantizar la estabilidad y continuidad del proceso, minimizando riesgos de interrupciones y optimizando el uso de los recursos disponibles.

4.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS

La selección de equipos constituye una etapa crítica en el desarrollo del presente proyecto, ya que no solo define las capacidades técnicas reales de producción, sino que además representa la mayor inversión de capital dentro del mismo. Por esta razón, se ha realizado un análisis minucioso para elegir los equipos más adecuados, asegurando que cumplen con los requisitos operativos planteados, tales como capacidades de procesamiento, eficiencia y confiabilidad.

Asimismo, se ha considerado un criterio económico fundamental en el proceso de selección, priorizando opciones viables y rentables, a fin de optimizar la relación entre costo y beneficio. De esta manera, se busca garantizar que los equipos seleccionados no solo satisfagan las demandas del proceso productivo, sino que también contribuyan a la sostenibilidad económica y ambiental del proyecto.

En las siguientes secciones, se detallarán los equipos seleccionados, describiendo sus características técnicas, funcionalidades, dimensiones, etc.

4.3.1 Silo de Alimentación

Para cumplir con la producción planificada, se ha calculado un requerimiento anual de 2.088 toneladas de plástico reciclado, lo que equivale a 174 toneladas mensuales y 8,7 toneladas diarias. A partir de estos valores, se ha desarrollado una estrategia de abastecimiento que garantiza la disponibilidad continua de materia prima durante el primer año de operación.

La estrategia considera el almacenamiento de plástico reciclado en silos (SI – 101), diseñados para mantener condiciones óptimas que garanticen la calidad del material y aseguren un suministro continuo. Para la gestión del reabastecimiento de materia prima, se utiliza un enfoque basado en el stock de seguridad, teniendo en cuenta que el consumo diario se mide en toneladas. Las órdenes de compra se generarán de manera estratégica, cuando el tiempo restante antes de alcanzar el nivel de stock de seguridad sea superior al lead time (tiempo de aprovisionamiento) de la materia prima.

El stock de seguridad se calcula empleando la fórmula propuesta por Nolberto Munier, que incluye las siguientes variables:

- t_l : tiempo de espera de aprovisionamiento expresado en días.
- d_L : demanda anual / número de días laborales por año.

- H: factor de riesgo, que considera varios elementos, como el costo de paralización de la producción, eficiencia de las inspecciones, calidad final del producto y el comportamiento del proveedor.

En este proyecto, se establece un nivel de riesgo bajo, con un $H=1,89$ (correspondiente al 10% de probabilidad de interrupción), ya que garantizar el suministro ininterrumpido de plástico reciclado es fundamental para cumplir con la producción mensual planificada. Una interrupción en el abastecimiento podría desalinear el cronograma operativo, lo cual es crítico en un proceso discontinuo que exige un cumplimiento riguroso de los tiempos establecidos.

Con la información proporcionada, es posible calcular el nivel de stock de seguridad requerido para el plástico reciclado como se observa en Tabla 4.6, y con ello determinar el número de órdenes mensuales o anuales, según se detalla en Tabla 4.7:

Materia Prima Requerida por Año					
Materia Prima	Tn Anuales	DI (Tn/días)	tI (días)	H	Sp (Tn)
Plástico	2.088	8,7	5	1,29	8,5

Tabla 4.6: Materia prima requerida por año

Órdenes de Materia Prima por Año					
Materia Prima	Tn Anuales	Sp (Tn)	Capacidad por Pedido (Tn)	Órdenes por Año	Órdenes por Mes
Plástico	2.088	8,7	5	1,29	8,5

Tabla 4.7: Órdenes de materia prima por mes/año

Para almacenar adecuadamente el plástico reciclado, se ha estimado que el almacén debe tener capacidad para contener dos pedidos completos más el nivel de stock de seguridad requerido. Esto asegura un suministro constante y adecuado mientras se espera la llegada de nuevos envíos, y se puede observar en la siguiente Tabla 4.8:

Almacenamiento	
Materia Prima	Tn Mínimas a Almacenar
Plástico	56,5

Tabla 4.8: Almacenamiento de materia prima

El plástico será almacenado en forma de pellets, con una densidad aparente de 610 kg/m³. En base a estos valores, la capacidad total de almacenamiento requerida es de 56,5 toneladas, lo que equivale a un volumen de 93 m³. Por ello, se ha decidido implementar dos silos de 50 m³ cada uno, los cuales proporcionan un margen de seguridad adicional.

Los silos estarán equipados con sistemas de transporte integrados para facilitar la carga y descarga, suministrados por el proveedor junto con el equipo principal. Esta configuración garantiza una gestión eficiente y segura del material, alineada con los objetivos de producción del proyecto.

- Marca: Famtun steel silos
- Capacidad: 50m³
- Dimensiones (d x h): 3,667 x 9,56 (m)
- Peso: 34270 kg



Ilustración 4.6: Silos de almacenamiento

4.3.2 Tolva de Alimentación

La tolva de alimentación (TV – 101) es el equipo encargado de suministrar de manera controlada la materia prima al reactor batch de pirólisis. Su diseño permite facilitar la carga eficiente del material, asegurando un flujo continuo y sin obstrucciones hacia el reactor. Se adaptará la altura de la misma mediante infraestructura de acero para alcanzar la altura de la boca del reactor batch.

Además, su capacidad ha sido seleccionada en función del tamaño del reactor y de la cantidad de materia prima procesada en cada ciclo, optimizando así el tiempo de operación y la eficiencia del proceso.

- Marca: Boomy
- Capacidad: 900 (Kg)
- Dimensiones (l x a x h): 1450 x 1200 x 1600 (mm)
- Peso: 350 (Kg)



Ilustración 4.7: Tolva de alimentación (TV-101)

4.3.3 Reactor Batch

El reactor de pirólisis (RP – 201) es el equipo central del proceso, ya que en él se lleva a cabo la descomposición térmica de los residuos plásticos en ausencia de oxígeno, generando como productos principales aceite pirolítico, gases y residuos sólidos. El mismo equipo ya viene con su quemador incluido, el cual está específicamente diseñado para él, y funciona con GNC. Además, cuenta en su interior con un sistema de 5 aspas que permiten el movimiento que buscamos para lograr una correcta transmisión de la temperatura en todo el material

introducido. Su diseño y características son fundamentales para garantizar la eficiencia y estabilidad del proceso, asegurando la conversión óptima de la materia prima en los productos deseados.

A continuación, se presenta la imagen y las especificaciones técnicas del reactor de pirólisis seleccionado, destacando su capacidad, consumo, potencia y demás parámetros clave para su funcionamiento.

- Marca: DENOR
- Modelo: DNR 5000
- Capacidad: 5000 l/batch
- Consumo: 350 Nm³/h (gnc)
- Potencia: 3000 kW
- Dimensiones (d x h): 150 x 280 (cm)
- Peso: 550 (Kg)



Ilustración 4.8: Reactor de pirólisis (RP-201)

4.3.4 Torre de Destilación

La torre de destilación (TD – 301) juega un papel fundamental en el proceso, ya que permite la separación de los diferentes componentes del aceite pirolítico obtenido en la etapa anterior. Mediante la aplicación de calor y el control de temperaturas, se logra fraccionar el aceite en productos como nafta, diésel de diferentes calidades y residuos atmosféricos.

A continuación, se presentan la imagen y las características técnicas de la torre de destilación seleccionada, detallando su capacidad de procesamiento, dimensiones y otros parámetros que la definen.

- Marca: AWO
- Modelo: JH
- Capacidad: 100-10000 l/h
- Dimensiones (a x d x h): 260x80x750 cm
- Peso: 1150 (Kg)



Ilustración 4.9: Torre de destilación (TD-301)

4.3.5 Intercambiadores de Calor

En esta sección se detalla la selección de los intercambiadores de calor utilizados en el proceso. Se ha optado por un modelo específico para el intercambiador IQ – 204, ubicado antes de la torre de destilación. Este equipo cumple la función de condensar los gases generados durante la pirólisis, asegurando que los mismos ingresen a la torre de destilación en estado líquido, facilitando así su separación.

- IQ– 204
- Marca: Raystone
- Capacidad: 0,1-100 m³/h
- Dimensiones (l x d) = 110 x 30 (cm)
- Peso: 90 (Kg)



Ilustración 4.10: Intercambiador de calor (IQ-204)

Por otro lado, para las unidades IQ – 306 e IQ – 307, ubicadas después de la torre de destilación, se ha seleccionado un modelo de intercambiador más pequeño. Estos equipos tienen como función condensar los gases provenientes de los platos de la torre de los que se extraerán las fracciones diésel, permitiendo así almacenarlas en estado líquido.

- IQ– 306/307
- Marca: Raystone
- Capacidad: 0,1-50 m³/h
- Dimensiones (l x d) = 60 x 25 (cm)
- Peso: 50 (Kg)



Ilustración 4.11: Intercambiador de calor (IQ-306 e IQ-307)

Finalmente, cabe destacar que el intercambiador de calor IQ – 304 (ubicado en la parte superior de la torre) ya viene incorporado con la compra del equipo, por lo que no requiere una selección adicional, facilitando su integración y asegurando el correcto funcionamiento del sistema.

4.3.6 Colector de Gases

Para la recolección de gases (CG – 202), se ha seleccionado un colector de tipo Venturi seco, el cual se caracteriza por su eficiencia en la captura y conducción de gases sin necesidad de utilizar líquidos como medio de arrastre. La elección de este sistema se debe a su simplicidad operativa y menores requerimientos de mantenimiento en comparación con otros sistemas húmedos, lo que lo hace más adecuado para el presente proyecto.

El funcionamiento del Venturi seco se basa en la inyección de aire comprimido, que genera la caída de presión necesaria para arrastrar los gases hacia el sistema de recolección. Cabe destacar que el suministro de aire comprimido se detalla en la sección de instalaciones auxiliares.

- Marca: AMBOHR
- Modelo: AVS0304D
- Capacidad: 500 l/h
- Dimensiones (l x d) = 30 x 5 (cm)
- Peso: 50 (Kg)



*Ilustración 4.12: Colector de gases
(CG-202)*

4.3.7 Almacenamiento de Diésel

Para garantizar una gestión eficiente del diésel producido en la planta, se ha considerado la cantidad diaria de producción, que asciende a 5 m³. Esto representa un total de 25 m³ por semana bajo un ciclo de producción normal. Con el objetivo de satisfacer las necesidades internas de la empresa, considerando consumos irregulares, se hace necesario asegurar un sistema de almacenamiento con un margen adecuado de seguridad y flexibilidad operativa.

Por ello, se propone que la capacidad de almacenamiento permita contener una cantidad superior a una semana de producción. Este enfoque garantiza la continuidad del proceso productivo incluso frente a posibles retrasos en el consumo interno, interrupciones operativas o fluctuaciones en la demanda. En consecuencia, dado que la capacidad mínima requerida es de 25 m³, se ha determinado que el sistema de almacenamiento tendrá una capacidad total de 40 m³.

El sistema estará compuesto por dos tanques de 20 m³ cada uno (TP – 309 y TP – 310). Esta configuración no solo optimiza la distribución del combustible, sino que facilita el mantenimiento periódico de los tanques y asegura la disponibilidad del diésel, incluso cuando uno de ellos deba ser desactivado temporalmente por inspección o limpieza.

Además de cumplir con los requisitos de capacidad, los tanques estarán equipados con sistemas de distribución interna que permitan el consumo directo del combustible por parte de la empresa. Para ello, se instalarán surtidores que garanticen un suministro eficiente, seguro y compatible con las necesidades operativas de los equipos que utilizarán el diésel.

- Marca: LQMC
- Capacidad: 20 m³
- Dimensiones (d x l): 2,4 x 4,87 (m)
- Espesor del cilindro: 6 mm
- Agujero de hombre: 1
- Peso: 300000 kg
- Características: doble capa de acero al carbono. Excelente rendimiento en resistencia a la compresión y a los golpes. resistencia, resistencia a la corrosión y resistencia a la corrosión electrolítica
- Cuenta con: tubo de ventilación; tubo de llenado; sonda protectora de fugas; válvula de prevención de sobrellenado; válvula de venteo; válvula de seguridad; sistema de purga.
- Estación de surtidor: Si



Ilustración 4.13: Almacenamiento de diésel (TP-309 y TP-310)

4.4 INSTALACIONES AUXILIARES

Las instalaciones auxiliares son sistemas y servicios necesarios que apoyan y complementan al proceso principal, asegurando su funcionamiento eficiente y continuo. Aunque no forman parte directa de las etapas productivas, su rol es fundamental, ya que permiten el correcto desarrollo de las operaciones y garantizan la seguridad, estabilidad y eficiencia del proceso.

En nuestro proyecto, contaremos con cuatro instalaciones auxiliares esenciales:

- Nitrógeno: Insumo clave en la etapa de pirólisis dentro del reactor batch, donde se utiliza para generar una atmósfera inerte y evitar la oxidación de la materia prima.
- GNC (Gas Natural Comprimido): Se emplea para captar y almacenar los gases no condensables, redirigiéndolos posteriormente al quemador del reactor, aprovechando su potencial energético y minimizando emisiones.
- Agua: Fundamental para el funcionamiento de los intercambiadores de calor, donde se facilita la condensación de gases mediante un sistema de enfriamiento eficiente.

- Aire comprimido: Necesario para el colector de gases tipo Venturi en su versión seca, donde cumple un rol clave en la captación de partículas y gases, contribuyendo al tratamiento y control de emisiones.

En conjunto, estas instalaciones aseguran el correcto desempeño del proceso, optimizando los recursos disponibles y contribuyendo a un sistema productivo seguro y sustentable.

4.4.1 Nitrógeno

4.4.1.1 Instalación

La instalación de nitrógeno será un sistema seguro y eficiente, diseñado para garantizar la purga adecuada del lote del reactor durante la etapa de pirólisis. Para ello, se contará con un tanque de almacenamiento de nitrógeno de 7 m³ de volumen, con una capacidad total de 5800 litros o 2900 kg. El tanque tendrá unas dimensiones de 1,00 m de altura, 6,50 m de largo y 1,20 m de diámetro.

El nitrógeno será suministrado en estado gaseoso y se recargará periódicamente, alcanzando una presión de 200 bar. Para transportar el gas desde el tanque hasta el lote del reactor, la instalación contará con una red de tuberías diseñadas para operar con altas y bajas presiones. Debido a que el nitrógeno almacenado se encuentra a 200 bar, es necesario reducir su presión a aproximadamente 1 bar antes de su ingreso al reactor. Para lograrlo, el sistema incluye:

- Válvulas de alta presión, para controlar el flujo de gas desde el tanque.
- Reguladores de presión escalonados, que reducirán la presión progresivamente hasta niveles seguros.
- Filtros de partículas y humedad, para evitar la entrada de impurezas en el sistema.
- Válvulas de venteo, ubicadas estratégicamente para liberar cualquier exceso de presión.
- Manómetros, que permitirán monitorear la presión en distintos puntos del sistema.

Una vez regulada la presión, el flujo de nitrógeno será controlado automáticamente mediante electroválvulas, que abrirán y cerrarán el suministro de acuerdo con los requerimientos del proceso. Estas válvulas permitirán realizar la purga del reactor de manera eficiente y se cerrarán automáticamente una vez completada la operación.

4.4.1.2 Consumo

En cada ciclo de pirólisis, se utilizarán 6 m³ de nitrógeno a 1 bar para realizar la purga completa del reactor, asegurando así la máxima eficiencia en la etapa de pirólisis.

Dado que el tanque de almacenamiento puede contener aproximadamente 1400 m³ de N₂ en condiciones normales, y el régimen de trabajo establecido requiere 360 m³ de nitrógeno por mes, se estima que el tanque deberá recargarse cada cuatro meses. Esta planificación garantiza un suministro continuo sin interrupciones operativas, lo que se convierte en un aspecto vital para el proyecto por lo indispensable que es el insumo para el proceso productivo del mismo.

4.4.2 Gas Natural Comprimido

4.4.2.1 Instalación

En esta instalación, el Gas Natural Comprimido (GNC) no hace referencia a gas obtenido de una red municipal, sino que se trata de los gases no condensables generados durante el proceso de pirólisis. Estos gases se recogen a través de un colector de gases tipo Venturi, cuya función principal es capturar y redirigirlos de manera controlada.

Una vez recogidos, los gases no condensables serán enviados a un tanque de almacenamiento, donde se mantendrán hasta que sean requeridos para su aprovechamiento. Desde este tanque, los gases podrán ser reenviados al quemador del reactor batch, proporcionando una fuente de energía adicional que optimiza el uso de los subproductos del proceso y reduce la dependencia de fuentes externas de combustible.

Este sistema interno garantiza una gestión eficiente de los gases no condensables, transformándolos de un subproducto potencialmente desechable en un recurso energético aprovechable.

4.4.2.2 Consumo

En el proceso de pirolización se trabajará con 2900 kg de polietileno por ciclo. Según el balance de materia desarrollada previamente, se obtiene un rendimiento de 0,29 kg de gas no condensable (GNC) por cada kilogramo de materia prima procesada. Esto, considerando una densidad del gas de 0,7 g/cm³, implica una producción diaria aproximada de 3600 m³ de GNC.

Para almacenar este gas, se contará con un tanque de capacidad máxima de 5000 m³, suficiente para cubrir cualquier variación en el proceso. Por otro lado, el consumo de GNC

provenirá del reactor, el cual tiene una demanda de $350 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Dado que cada ciclo del proceso utiliza tres horas de combustible, el consumo diario será de aproximadamente 3150 Nm^3 . Esto demuestra que el proceso de pirólisis es completamente autosuficiente, ya que la cantidad de gas no condensable generada excede el consumo requerido por el reactor, garantizando así un suministro continuo y eficiente.

4.4.3 Agua

4.4.3.1 Instalación

El agua es un componente esencial en los intercambiadores de calor, donde se utiliza para enfriar fluidos calientes a través de un proceso de intercambio térmico eficiente. En los intercambiadores de carcasa y tubo, el fluido caliente circula por los tubos mientras que el agua fluye por la carcasa, o viceversa, lo que permite una transferencia de calor que reduce la temperatura del fluido caliente. Este tipo de equipo es altamente eficiente gracias a su diseño compacto y la alta capacidad térmica del agua, que permite absorber grandes cantidades de calor con un volumen relativamente pequeño.

El uso de agua en estos equipos es conveniente debido a su disponibilidad, bajo costo y excelente conductividad térmica. No obstante, para garantizar el óptimo desempeño y la durabilidad de los intercambiadores, es necesario que el agua pase por un tratamiento previo. Este tratamiento consiste en la eliminación de sales minerales que puedan causar incrustaciones en las superficies internas del equipo. Este proceso asegura tanto la eficiencia térmica como la vida útil del sistema.

4.4.3.2 Consumo

El sistema de enfriamiento requiere un suministro suficiente de agua para abastecer tres intercambiadores de calor clave en el proceso. El primer intercambiador, ubicado antes de la torre de destilación, enfría los gases condensables desde aproximadamente 400°C hasta 100°C . Este equipo tiene un consumo máximo de 4 m^3 de agua por hora, logrando renovar su volumen completo de agua unas 60 veces por hora, es decir, una vez por minuto.

Además, los dos intercambiadores situados después de la torre de destilación enfrían las fracciones de diésel obtenidas hasta llevarlas a temperatura ambiente. Cada uno de estos equipos puede consumir hasta 2 m^3 de agua por hora, renovando también su volumen total de agua unas 60 veces por hora.

En total, el sistema requiere un caudal de hasta 8 m³ de agua por hora para garantizar un enfriamiento eficiente y continuo en todas las etapas del proceso. Este suministro debe estar diseñado para satisfacer las demandas de operación, asegurando tanto la calidad del agua como su disponibilidad constante.

4.4.4 Aire Comprimido

4.4.4.1 Instalación

El aire comprimido es un insumo clave en el sistema de Venturi en seco, utilizado como colector de gases en el proceso de pirólisis. Este sistema aprovecha la energía cinética del flujo de aire comprimido para generar una caída de presión que permite la captura eficiente de los gases no condensables generados en el reactor discontinuo. El aire comprimido es particularmente útil en este tipo de aplicaciones debido a su disponibilidad, capacidad de control y versatilidad en una amplia variedad de condiciones operativas.

Para garantizar la funcionalidad y eficiencia del colector de gases, será necesario instalar una unidad de aire comprimido que genere un flujo constante con la presión adecuada. La instalación deberá incluir un compresor, un tanque acumulador para estabilizar la presión, un filtro de partículas para eliminar contaminantes del aire y un sistema de secado para evitar la acumulación de humedad en las tuberías. Estas medidas son esenciales para proteger tanto el sistema de Venturi como el resto de la infraestructura asociada.

4.4.4.2 Consumo

La unidad de aire comprimido deberá ser dimensionada para abastecer el sistema de Venturi con un flujo adecuado para garantizar su correcto funcionamiento. Según estimaciones generales para este tipo de aplicaciones, se requerirá un flujo de aire comprimido de aproximadamente 300-500 litros por minuto (LPM) a una presión de trabajo entre 6 y 8 bares.

Para satisfacer esta demanda, se utilizará un compresor eléctrico debido a su bajo costo operativo, mayor eficiencia energética y facilidad de integración en el sistema de la planta. Un compresor con estas especificaciones podría consumir entre 4 y 5 kWh por hora, dependiendo de la eficiencia del equipo. Esto asegura que el sistema pueda operar de manera continua durante los ciclos de pirólisis sin interrupciones.

4.5 CONCLUSIÓN

El presente estudio permitió definir la estructura operativa del proyecto, estableciendo las condiciones de producción y validando la factibilidad técnica del proceso. Se determinó que el régimen de trabajo estará compuesto por tres ciclos batch diarios, permitiendo una producción eficiente y sostenida.

A partir del balance de materia y la capacidad productiva establecida, se proyecta que la planta procesará 8.700 kg de plástico reciclado por día, generando 5 m³ de diésel diario, lo que equivale a 100 m³ mensuales y 1.200 m³ anuales.

Se verificó la disponibilidad de maquinaria adecuada para la ejecución del proceso, asegurando que los equipos seleccionados cumplen con los parámetros operativos requeridos. Asimismo, se analizaron las instalaciones auxiliares, confirmando la viabilidad del suministro de insumos clave, como nitrógeno, gas natural comprimido, aire y agua, garantizando el correcto funcionamiento del sistema.

En conclusión, los resultados obtenidos en este capítulo validan la viabilidad técnica del proyecto, estableciendo bases sólidas para su implementación y asegurando que el proceso productivo pueda desarrollarse de manera eficiente y sostenible.

5 ESTUDIO AMBIENTAL

El presente capítulo tiene como objetivo principal analizar los aspectos ambientales relevantes para la viabilidad del proyecto de producción de diésel a partir de la pirólisis de polietileno, en el contexto de las normativas y legislaciones vigentes en Argentina, tanto a nivel nacional como provincial, específicamente en la provincia de Salta. Este estudio busca garantizar que el proyecto se desarrolle de manera sostenible, minimizando los impactos negativos sobre el medio ambiente y cumpliendo con los marcos legales aplicables.

Si bien el enfoque principal de este proyecto se centra en el análisis técnico necesario para la implementación del proceso, se reconoce la importancia de considerar los aspectos ambientales que puedan influir en la ejecución del proyecto, garantizando su sostenibilidad y cumplimiento con los marcos legales aplicables. El análisis ambiental se enfoca en identificar los principales impactos asociados a las diferentes etapas del proceso, revisar las normativas que regulan estas actividades y proponer medidas de mitigación y control que permitan operar de manera responsable y alineada con los principios de protección ambiental. Asimismo, se incluirá un apartado sobre el potencial del proyecto en relación con los bonos de carbono, los cuales, si bien aún no se encuentran plenamente desarrollados en el contexto nacional, representan una oportunidad futura de valorización ambiental y económica, por lo que se abordarán aspectos clave a considerar para una eventual incorporación a estos mecanismos.

De esta manera, se asegura que el proyecto no solo cumpla con los requisitos legales, sino que también contribuya a la preservación del entorno natural y al uso eficiente de los recursos.

5.1 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA)

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un proceso sistemático que permite identificar, predecir y evaluar los impactos ambientales asociados a un proyecto, con el fin de proponer medidas de mitigación y control que minimicen sus efectos negativos. Este instrumento es fundamental para garantizar que las actividades productivas se desarrollen de manera sostenible, cumpliendo con las normativas ambientales vigentes y protegiendo los recursos naturales.

En el contexto del proyecto, la EIA se enfoca en analizar los impactos asociados a las diferentes etapas del proceso, desde la pirólisis hasta el almacenamiento de los productos finales, con el objetivo de asegurar su viabilidad ambiental.

El presente proyecto, genera una serie de impactos ambientales asociados a sus diferentes etapas operativas. Estos impactos se clasifican en función de los componentes ambientales afectados: atmósfera, suelo, agua, recursos naturales y riesgos para la salud y seguridad.

5.1.1 Emisiones Gaseosas

Durante el proceso de pirólisis, se generan emisiones gaseosas compuestas principalmente por gases no condensables, como metano e hidrógeno, así como compuestos orgánicos volátiles (COV). Estas emisiones pueden afectar la calidad del aire en el entorno inmediato de la planta, especialmente si no se implementan sistemas de control adecuados.

Además, durante la etapa de destilación, se liberan vapores de hidrocarburos que, en caso de no ser debidamente capturados, podrían contribuir a la formación de ozono troposférico y otros contaminantes secundarios. La liberación de estos gases sin tratamiento previo podría incumplir los límites establecidos por las normativas de calidad del aire, como el Decreto 674/89.

5.1.2 Generación de Residuos Sólidos

El proceso de pirólisis produce un residuo carbonoso, el cual, si no es gestionado adecuadamente, puede convertirse en un foco de contaminación del suelo. Este residuo, aunque no es tóxico, requiere un manejo cuidadoso para evitar su dispersión en el ambiente.

Por otro lado, los subproductos líquidos de la destilación, como los compuestos de alto punto de ebullición, pueden clasificarse como residuos peligrosos según la Ley 24.051. Su almacenamiento y disposición final inadecuados podrían generar riesgos de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

5.1.3 Efluentes Líquidos

El agua utilizada en los intercambiadores de calor puede contaminarse con hidrocarburos y partículas sólidas, lo que representa un riesgo para los recursos hídricos si no se gestiona adecuadamente.

Por otra parte, los derrames accidentales de diésel o aceite pirolítico durante el almacenamiento o transporte podrían afectar fuentes de agua cercanas, como ríos o acuíferos. Estos derrames, aunque de baja probabilidad, podrían tener consecuencias significativas si no se cuenta con medidas de contención y respuesta rápida.

5.1.4 Consumo de Recursos Naturales

El proceso consume energía eléctrica y térmica, lo que contribuye a la huella de carbono del proyecto. Aunque el uso de gases no condensables como combustible reduce la dependencia de fuentes externas, el consumo de energía sigue siendo un factor relevante en términos de sostenibilidad. Asimismo, el uso de agua en los intercambiadores de calor, aunque no es excesivo, debe ser optimizado para reducir el consumo y minimizar el impacto sobre los recursos hídricos locales.

5.1.5 Riesgos de Incendio y Explosión

El manejo de gases inflamables, como metano e hidrógeno, así como de combustibles líquidos como el diésel, implica riesgos de incendio o explosión. Estos riesgos son inherentes a la naturaleza de los materiales procesados y requieren medidas de seguridad específicas para prevenir accidentes. La liberación accidental de gases inflamables o derrames de combustibles podría tener consecuencias graves para la seguridad del personal y las instalaciones, así como para el entorno circundante.

5.2 NORMAS AMBIENTALES

El presente apartado tiene como objetivo revisar las principales leyes y normativas ambientales, tanto nacionales como provinciales, que son relevantes para el proyecto. Estas normativas proporcionan el marco legal que regula las actividades del mismo, estableciendo los requisitos y estándares que deben cumplirse para garantizar la protección del medio ambiente y la sostenibilidad de las operaciones.

5.2.1 Normas Nacionales

5.2.1.1 Ley General del Ambiente (Ley 25.675)

La Ley General del Ambiente, sancionada en 2002, establece los presupuestos mínimos para la gestión ambiental en Argentina, con el objetivo de garantizar el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. Esta ley se basa en principios fundamentales como el de prevención, que promueve la adopción de medidas anticipadas para evitar daños ambientales; el de precaución, que establece que la falta de certeza científica no debe ser excusa para postergar medidas preventivas ante posibles daños graves o irreversibles; y el de "quien contamina paga", que asigna la responsabilidad económica de los daños ambientales al causante (Congreso de la Nación Argentina, 2002).

Además, la ley exige la realización de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para proyectos que puedan generar impactos significativos sobre el ambiente, y fomenta la participación ciudadana en la toma de decisiones ambientales. En el contexto del proyecto, esta normativa es fundamental, ya que obliga a evaluar los impactos de las emisiones gaseosas, residuos sólidos y efluentes líquidos generados durante la pirólisis y destilación, y a adoptar medidas de prevención y mitigación para minimizar los impactos negativos.

5.2.1.2 Ley de Residuos Peligrosos (Ley 24.051)

La Ley de Residuos Peligrosos, promulgada en 1991 (Congreso de la Nación Argentina, 1991), regula la generación, manejo, transporte, tratamiento y disposición final de residuos considerados peligrosos debido a sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológicas. Esta ley establece la obligación de inscribirse en un registro nacional de generadores de residuos peligrosos, obtener certificados de transporte y cumplir con los límites de emisiones y disposición de residuos.

Por otro lado, exige la presentación de informes anuales sobre la gestión de residuos y fija sanciones para quienes incumplan las regulaciones. En el caso del proyecto, el residuo carbonoso generado en la pirólisis y los subproductos líquidos de la destilación se clasifican como residuos peligrosos, por lo que es esencial garantizar su manejo seguro. Esto incluye el almacenamiento en recipientes homologados, la contratación de empresas certificadas para su disposición final y la presentación de informes periódicos a las autoridades competentes.

5.2.1.3 Regulaciones sobre Emisiones y Calidad del Aire (Decreto 674/89)

El Decreto 674/89 establece los valores límite para emisiones industriales, incluyendo partículas, compuestos orgánicos volátiles y dióxido de carbono. Esta normativa obliga a los proyectos a instalar sistemas de monitoreo continuo de emisiones y a adoptar tecnologías de control para reducir las emisiones al ambiente. Del mismo modo, fija sanciones para quienes incumplan los límites establecidos. En el contexto del proyecto, las emisiones gaseosas de la pirólisis y destilación deben cumplir con los límites establecidos por este decreto (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, 2024).

5.2.1.4 Legislación sobre Plásticos y Reciclaje (Ley 25.612)

La Ley 25.612, promulgada en 2002, fomenta el reciclaje y la valorización de residuos plásticos, promoviendo la reutilización de estos materiales en proyectos productivos. Esta ley

establece pautas para la gestión integral de residuos plásticos, incluyendo su clasificación, etiquetado y disposición final.

También, promueve la participación de los sectores público y privado en la implementación de programas de reciclaje y economía circular. En el caso del proyecto, el uso de polietileno reciclado como materia prima alinea el proyecto con los principios de esta normativa (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, 2024).

5.2.1.5 Normativa sobre Almacenamiento de Combustibles (Ley 13.660)

La Ley 13.660, reglamentada por el Decreto Nro. 10877/1960, regula el almacenamiento, transporte y manipulación de combustibles líquidos, como diésel y nafta. Esta normativa establece especificaciones técnicas para los tanques de almacenamiento, incluyendo la utilización de materiales resistentes a la corrosión y la instalación de sistemas de contención para prevenir derrames (Congreso de la Nación Argentina, 1960).

De igual manera, exige la implementación de medidas de seguridad contra incendios, como la instalación de extintores y detectores de fugas, y fija distancias mínimas entre los tanques y otras estructuras o zonas habitadas. En el contexto del proyecto, el diésel producido debe almacenarse en tanques que cumplan con las especificaciones técnicas y medidas de seguridad establecidas. Esto incluye la instalación de barreras de contención y sistemas de detección de fugas para prevenir derrames y proteger el entorno.

5.2.2 Normativas Provinciales

5.2.2.1 Ley de Protección Ambiental para la Actividad Minera (Ley 7.070)

La Ley 7.070, vigente en la provincia de Salta, regula los aspectos ambientales relacionados con actividades mineras y productivas. Esta normativa exige la presentación de un informe de impacto ambiental (IIA) previo al inicio de las actividades, y establece criterios para la protección del suelo, agua y aire en proyectos productivos (Gobierno de la Provincia de Salta, 2024).

Incluso, obliga a los responsables a implementar medidas de mitigación de impactos y a presentar planes de manejo ambiental. Aunque el proyecto no es una actividad minera, comparte características como el manejo de residuos y emisiones, por lo que debe adoptar las mejores prácticas de esta normativa. Esto incluye la elaboración de un IIA específico para el proyecto y la implementación de un plan de manejo ambiental que contemple medidas para el control de emisiones, gestión de residuos y tratamiento de efluentes.

5.2.2.2 Resolución N° 1088/12 – Evaluación Ambiental Estratégica (EAE)

La resolución N° 1088/12 introduce la Evaluación Ambiental Estratégica como herramienta para evaluar proyectos, asegurando que las actividades productivas sean compatibles con las políticas ambientales de la provincia. Esta normativa establece la necesidad de realizar una EAE para proyectos que impliquen un cambio significativo en el uso del suelo o tengan impactos acumulativos (Gobierno de la Provincia de Salta, 2024).

Ahora bien, promueve la integración de aspectos ambientales en la planificación de políticas y proyectos, y define indicadores clave para evaluar impactos, como la biodiversidad, calidad del agua y emisiones de gases de efecto invernadero. En el contexto del proyecto, es necesario integrar los indicadores definidos en la EAE, especialmente aquellos relacionados con emisiones gaseosas, uso de recursos naturales y generación de residuos, para garantizar que el proyecto sea compatible con las políticas ambientales provinciales.

5.3 MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y CONTROL

Las medidas de mitigación y control de impactos ambientales tienen como objetivo principal reducir o eliminar los efectos negativos asociados a las diferentes etapas del proyecto de producción de diésel a partir de la pirólisis de polietileno. Estas medidas se definen teniendo en cuenta los impactos ambientales identificados en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y los requisitos establecidos por las normativas nacionales y provinciales aplicables. Su implementación garantiza el cumplimiento de los marcos legales vigentes y promueve prácticas sostenibles que minimizan el impacto sobre el medio ambiente.

5.3.1 Control de emisiones gaseosas

- Recirculación de gases no condensables: los gases no condensables generados durante el proceso de pirólisis, como metano e hidrógeno, se redirigirán hacia los quemadores del reactor pirolítico para su uso como combustible. Esta práctica no solo reduce las emisiones al exterior, sino que también optimiza el aprovechamiento de recursos, disminuyendo la dependencia de combustibles externos y reduciendo la huella de carbono del proyecto.
- Instalación de sistemas de filtración: para capturar partículas y compuestos orgánicos volátiles (COV) antes de su liberación al ambiente, se instalarán colectores de gases en la salida del reactor pirolítico. Estos sistemas, de implementación sencilla y eficaz, permiten cumplir con los límites de emisiones establecidos por el Decreto 674/89.

- Monitoreo continuo de emisiones: se implementarán equipos de monitoreo en puntos estratégicos del proceso, como la salida del reactor y las chimeneas de los quemadores, para medir en tiempo real las concentraciones de partículas, COV y otros contaminantes. Los datos obtenidos se registrarán y reportarán periódicamente a las autoridades ambientales, asegurando el cumplimiento de las normativas de calidad del aire.

5.3.2 Gestión de residuos sólidos

- Comercialización del residuo carbonoso: el residuo carbonoso generado durante la pirólisis se comercializará como materia prima para la fabricación de productos industriales, como ladrillos refractarios. Esta medida no solo reduce el volumen de residuos que deben ser dispuestos, sino que también genera ingresos adicionales para el proyecto.
- Disposición segura de residuos peligrosos: los subproductos líquidos de la destilación, como los compuestos de alto punto de ebullición, se almacenarán en tanques de doble pared con sistemas de contención para prevenir derrames. Se contratará una empresa certificada para la recolección y disposición final de estos residuos, garantizando el cumplimiento de la Ley 24.051 de Residuos Peligrosos.

5.3.3 Protección de recursos hídricos

- Sistemas antiderrames: se instalarán barreras de contención alrededor de los tanques de almacenamiento de diésel y aceite pirolítico. Estas barreras, complementadas con kits de absorción en áreas estratégicas, permitirán una respuesta rápida y efectiva ante derrames menores, evitando la contaminación del suelo y de fuentes de agua cercanas. Esta medida cumple con los requisitos de la Ley 13.660 sobre almacenamiento de combustibles.
- Optimización del uso de agua: el agua utilizada en los intercambiadores de calor se recirculará en el proceso, reduciendo el consumo de agua fresca. Adicionalmente, se implementará un sistema de filtración básico para eliminar partículas sólidas e hidrocarburos antes de su reutilización. Esta práctica contribuye a la reducción del impacto sobre los recursos hídricos locales sin requerir infraestructura compleja.

5.3.4 Eficiencia en el uso de recursos naturales

- Recuperación de calor residual: además de la recirculación de gases no condensables, se aprovechará el calor residual de los gases de salida del reactor para calentar el mismo en los siguientes lotes de producción. Esta medida, de bajo costo y alta eficiencia, permite reducir el consumo de energía.
- Optimización del consumo de energía eléctrica: se implementarán equipos de alta eficiencia energética y prácticas operativas que reduzcan el desperdicio de energía. Esta estrategia no solo disminuye los costos operativos, sino que también contribuye a la sostenibilidad del proyecto.

5.3.5 Prevención de riesgos de incendio y explosión

- Instalación de extintores: se colocarán extintores en áreas estratégicas de la planta, especialmente en las proximidades del reactor pirolítico, los tanques de almacenamiento y las zonas de manejo de combustibles. Estos equipos estarán sobredimensionados para garantizar una respuesta rápida y efectiva en caso de incendio.
- Sistemas de detección de fugas: se instalarán detectores de gas y sensores de temperatura en áreas críticas del proceso, como el reactor y los tanques de almacenamiento. Estos sistemas permitirán identificar fugas de gases inflamables o aumentos de temperatura anormales, activando alarmas para prevenir accidentes.
- Capacitación del personal: se realizarán cursos de capacitación periódicos para el personal, enfocados en el manejo seguro de materiales inflamables, respuesta a emergencias y uso de equipos de protección personal (EPP). Esta medida no solo reduce el riesgo de accidentes, sino que también garantiza el cumplimiento de las normativas de seguridad laboral.

5.4 BONOS DE CARBONO

Los bonos de carbono constituyen instrumentos financieros que representan la reducción o remoción de una tonelada de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, como resultado de proyectos certificados que mitigan el cambio climático. Estos bonos pueden comercializarse en mercados voluntarios o regulados, permitiendo a países y empresas alcanzar sus metas de reducción de emisiones de manera más eficiente.

5.4.1 Contexto Internacional y Nacional

A nivel global, el Acuerdo de París (2015)³² estableció un marco de cooperación internacional para limitar el aumento de la temperatura global. Su Artículo 6 introdujo mecanismos de mercado que permiten la transferencia de reducciones de emisiones entre países, facilitando así el cumplimiento de sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) (CMNUCC, 2015).

En la 29ª Conferencia de las Partes (COP29)³³, celebrada en Bakú, se alcanzó un acuerdo clave para definir normas claras y transparentes que regulen un mercado global de créditos de carbono. Este avance fortalece las posibilidades de cooperación entre naciones y promueve el desarrollo de proyectos con impacto positivo sobre los gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2023).

En el ámbito nacional, Argentina ha mostrado avances significativos. En 2023, se aprobó la Estrategia Nacional para el Uso de los Mercados de Carbono (ENUMeC), mediante la Resolución MAyDS N° 385/2023. Esta estrategia establece un marco de referencia para fomentar condiciones habilitantes que permitan el desarrollo de proyectos aptos para acceder a los mercados de carbono, contribuyendo a la mitigación y adaptación al cambio climático. Asimismo, se han presentado iniciativas legislativas para la creación de un Sistema de Comercio de Emisiones, orientado a establecer un mercado regulado que brinde seguridad jurídica y transparencia a los actores involucrados (Ministerio de Ambiente, 2023).

5.4.2 Mercados de Bonos de Carbono

Los bonos de carbono pueden negociarse en dos tipos principales de mercados, los cuales son:

- Mercado regulado: conformado por países y empresas sujetos a obligaciones legales de reducción de emisiones.
- Mercado voluntario: dirigido a organizaciones privadas, instituciones y personas que deciden compensar sus emisiones de forma no obligatoria.

³² Acuerdo de París: reunión anual para negociar y coordinar acciones globales contra el cambio climático.

³³ Conferencia de las Partes: acuerdo internacional comprometido a reducir emisiones para frenar el calentamiento global.

En ambos casos, los proyectos que demuestren reducciones verificables de GEI pueden generar ingresos adicionales mediante la venta de estos bonos a terceros interesados en compensar su huella de carbono.

5.4.3 Implicancias para el Proyecto

El proyecto de instalación de una planta de pirólisis para la conversión de plástico reciclado en combustible diésel, en la provincia de Salta, presenta un alto potencial de incorporación futura a esquemas de compensación mediante bonos de carbono. Al evitar la disposición final de residuos plásticos y sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles, este tipo de iniciativa puede contribuir significativamente a la reducción neta de emisiones de gases de efecto invernaderos (GEI).

Diversos estudios internacionales estiman que el reciclaje de una tonelada de polietileno (materia prima contemplada en el proyecto) puede evitar entre 1.200 y 2.000 kg de CO₂. Esto sugiere que por cada tonelada procesada podrían generarse entre 1,2 y 2 bonos de carbono, siempre que se cumplan los estándares establecidos por organismos certificadores (IEA, 2022).

Con una capacidad estimada de procesamiento de 1.200 toneladas de plástico al año, el proyecto podría evitar entre 1.440 y 2.400 toneladas anuales de emisiones de CO₂, lo que se traduce en una posibilidad equivalente de generar bonos de carbono.

En términos económicos, los precios actuales en el mercado voluntario (más frecuentado por Argentina) oscilan entre USD 1 y USD 15 por tonelada, pudiendo alcanzar hasta USD 30 en casos de proyectos con impactos sociales y ambientales diferenciados. Aunque estos ingresos no están contemplados en el análisis económico inicial del proyecto, una eventual certificación podría representar, en condiciones favorables, una fuente adicional de ingresos estimada entre USD 1.440 y USD 72.000 anuales, según el volumen certificado y los precios de mercado.

5.4.4 Requisitos y Limitaciones

La generación de bonos de carbono requiere la certificación de organismos reconocidos como Verra (VCS)³⁴, Gold Standard³⁵ o Plan Vivo³⁶. El proceso implica:

³⁴ Verra (VCS): principales programas de certificación de proyectos de reducción de emisiones a nivel mundial.

³⁵ Gold Standard: sistema de certificación que valida proyectos de reducción de emisiones con beneficios adicionales en desarrollo sostenible.

³⁶ Plan Vivo: certificadora de proyectos comunitarios que generan créditos de carbono mediante prácticas sostenibles en el uso de la tierra y recursos naturales.

- Aplicación de metodologías específicas.
- Verificación técnica y auditorías externas.
- Documentación detallada del impacto ambiental.
- Seguimiento constante del proyecto.

Los costos asociados a la certificación pueden variar entre USD 30.000 y USD 100.000 o más, lo cual representa una barrera significativa para proyectos de pequeña y mediana escala, especialmente en etapas iniciales. Adicionalmente, aún no existen metodologías ampliamente aceptadas para proyectos basados en el reciclaje de plástico, lo cual complica su validación.

Por otro lado, el mercado voluntario se caracteriza por su alta volatilidad, dado que los precios de los bonos dependen de factores como la demanda corporativa, la reputación de los proyectos y el tipo de certificación obtenida. A esto se suma la falta de implementación de un mercado regulado en Argentina, lo que limita las oportunidades de monetización a corto plazo.

A pesar de los desafíos, los avances regulatorios, tanto a nivel nacional como internacional, permiten anticipar un escenario más favorable en el mediano plazo. En este sentido, resulta estratégico que el proyecto incorpore desde su diseño inicial elementos que faciliten una futura certificación, tales como:

- La trazabilidad del plástico reciclado.
- El monitoreo de emisiones evitadas.
- La documentación técnica y ambiental del proceso.

Esta visión proactiva permitirá al proyecto posicionarse de manera ventajosa ante un eventual desarrollo del marco normativo argentino o la consolidación de alianzas con plataformas de certificación, reforzando así su viabilidad ambiental y económica a largo plazo.

5.5 CONCLUSIÓN

El análisis ambiental realizado en este capítulo ha permitido evaluar en profundidad la viabilidad del proyecto de producción de diésel a partir de la pirólisis de polietileno, considerando tanto los impactos ambientales potenciales como el marco normativo vigente. A través de la identificación de los principales riesgos ambientales y la propuesta de medidas concretas de mitigación y control, se ha demostrado que el proyecto puede desarrollarse de manera sostenible y responsable, cumpliendo con las normativas aplicables a nivel nacional y provincial, especialmente en la jurisdicción de la provincia de Salta.

Las acciones propuestas no solo permiten abordar de forma efectiva los posibles impactos ambientales negativos asociados al proceso de pirólisis, sino que también fomentan la incorporación de buenas prácticas de gestión ambiental, promoviendo el uso racional de los recursos, la eficiencia energética y la reducción de residuos. Estas estrategias no solo están alineadas con los principios fundamentales de desarrollo sostenible y de protección ambiental, sino que también contribuyen a la mejora continua del proceso industrial, optimizando el rendimiento del proyecto y reduciendo al mínimo las externalidades negativas que pudieran derivarse de su operación.

Asimismo, el diseño y ejecución de estas medidas permitirán al proyecto adaptarse a futuros desafíos ambientales y legislativos, contribuyendo de manera activa a la sostenibilidad local y regional. El cumplimiento con las regulaciones vigentes no solo garantiza la legalidad del proyecto, sino que también refuerza la confianza de los diferentes actores involucrados, incluidos los inversores, las autoridades gubernamentales y la comunidad en general. De esta forma, el proyecto se posiciona como una iniciativa viable y responsable desde el punto de vista ambiental, siempre y cuando se implementen las medidas de mitigación y control establecidas en el análisis.

En cuanto a los bonos de carbono, el proyecto posee un notable potencial para integrarse, en el futuro, a esquemas de compensación de emisiones, dado que la valorización de plásticos reciclados contribuye significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero. Esto se debe a que se evita la disposición final de residuos y se sustituyen parcialmente combustibles fósiles convencionales. Aunque este mecanismo aún no se ha implementado plenamente en Argentina, y la certificación de los bonos requiere cumplir con normativas internacionales, el proyecto puede estar en condiciones de generar bonos de carbono una vez que se logren avances regulatorios, generando una fuente adicional de ingresos y fortaleciendo su sostenibilidad.

6 ESTUDIO LEGAL

En este capítulo, se abordarán las leyes, normativas y regulaciones pertinentes a nivel nacional y provincial que rigen tanto el desarrollo como la operación de la planta de producción de diésel. Se analizarán los requisitos legales que deben cumplirse en áreas clave como la seguridad laboral, la salud de los trabajadores, la protección ambiental y las condiciones operativas para garantizar el adecuado funcionamiento de la planta.

Asimismo, se propondrán medidas específicas que permitirán cumplir con la normativa vigente, enfocándose en la creación de un entorno de trabajo seguro y sostenible. Estas medidas buscan asegurar que la planta opere de manera conforme a las regulaciones aplicables, protegiendo tanto a los trabajadores como al medio ambiente y la comunidad circundante.

El cumplimiento riguroso de estas normativas es esencial para garantizar la viabilidad legal del proyecto, así como para proteger la integridad de los trabajadores, la comunidad y el entorno en el que se desarrollará la operación.

6.1 REQUISITOS LEGALES

6.1.1 Habilitaciones Municipales y Provinciales

La instalación de una planta industrial requiere cumplir con una serie de requisitos legales y administrativos tanto a nivel municipal como provincial. Estas habilitaciones son esenciales para garantizar que las instalaciones cumplan con los estándares de seguridad, higiene y urbanismo exigidos por la normativa vigente.

A nivel provincial, la Ley N° 6.070, que regula los procedimientos administrativos para habilitar obtención, establece los plazos para presentar documentación, realizar inspecciones y emitir resoluciones. Además, establece mecanismos de apelación y revisión en caso de desacuerdos. A nivel municipal, se requieren informes de impacto ambiental, certificados de zonificación y permisos de construcción para garantizar que el sitio cumpla con las normativas locales de urbanismo y seguridad (Municipalidad de Salta, 2024).

6.1.2 Legislación sobre Seguridad e Higiene Industrial

La seguridad e higiene industrial son aspectos esenciales para cualquier proyecto industrial, y están regulados tanto a nivel nacional como provincial. A nivel nacional, la Ley N° 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo es la normativa que establece los requisitos mínimos para condiciones laborales seguras, incluyendo aspectos como iluminación,

ventilación, control de riesgos y provisión de equipos de protección personal (EPP). Asimismo, obliga a los trabajadores a realizar inspecciones periódicas ya capacitar a los trabajadores en seguridad (Congreso de la Nación Argentina, 1972).

A nivel provincial, la Ley N° 6.177 establece requisitos adicionales, como la instalación de sistemas de seguridad (matafuegos, señalización adecuada y equipos de protección), para garantizar la seguridad de los trabajadores (Gobierno de la Provincia de Salta, 2024).

6.1.3 Normativas sobre Residuos y Gestión Ambiental

La gestión de residuos y el cumplimiento de las normativas ambientales son aspectos clave en cualquier proyecto industrial. La Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos es la normativa nacional que regula la gestión de residuos peligrosos, estableciendo requisitos para la identificación, clasificación, tratamiento y disposición final de estos residuos. Exige la obtención de autorizaciones y el cumplimiento de normas de seguridad en el manejo de residuos (Congreso de la Nación Argentina, 1991).

Por otro lado, la Ley N° 13.660 regula la manipulación y transporte de combustibles líquidos, estableciendo requisitos de seguridad y capacitación del personal que maneja estos materiales, así como la obtención de las autorizaciones necesarias para operar estas instalaciones (Congreso de la Nación Argentina, 1960).

6.1.4 Contratos y Condiciones de Trabajo

Las normativas laborales regulan la relación entre empleadores y trabajadores, estableciendo derechos y deberes para ambas partes.

A nivel nacional, la Ley N° 20.744 regula las condiciones básicas de trabajo, como jornada laboral, salarios, vacaciones, licencias y modalidades de contratación, y obliga a los trabajadores a registrar a los trabajadores en el sistema de seguridad social ya elaborar contratos escritos (Congreso de la Nación Argentina, 1972).

En Salta, no existen leyes provinciales específicas que complementen esta legislación, pero se aplican las disposiciones nacionales en cuanto a condiciones laborales. Esto significa que los empleadores deben garantizar que todos los trabajadores sean contratados bajo condiciones que cumplan con la Ley de Contrato de Trabajo, incluyendo el pago de salarios en tiempo y forma y el cumplimiento de las condiciones laborales mínimas.

6.1.5 Seguridad Laboral

La Ley N° 24.557 de Riesgos del Trabajo establece los lineamientos necesarios para proteger la salud y seguridad de los trabajadores, minimizando accidentes laborales y enfermedades profesionales. Esta ley obliga a los empleadores a contratar una Aseguradora de Riesgos del Trabajo (ART) que cubra a sus trabajadores ante posibles accidentes o enfermedades laborales. Además, define las obligaciones de los empleadores, como la evaluación de riesgos laborales, la implementación de medidas preventivas y la provisión de capacitaciones periódicas (Congreso de la Nación Argentina, 1960).

Por otro lado, la Ley N° 13.660 también es relevante en el ámbito de la seguridad laboral, ya que aborda la seguridad de los trabajadores en actividades relacionadas con la manipulación y transporte de combustibles líquidos. Esta ley establece disposiciones específicas sobre capacitación y medidas preventivas que deben aplicarse para minimizar los riesgos asociados con estas tareas. Además, exige que los empleadores proporcionen equipos de protección personal (EPP) adecuados y capaciten a los trabajadores en su uso correcto.

6.1.6 Capacitación y Equipos de Protección Personal (EPP)

La capacitación continua y el uso adecuado de equipos de protección personal (EPP) son esenciales para prevenir accidentes laborales y garantizar un ambiente de trabajo seguro.

Aunque no existe una normativa específica para la capacitación, tanto la Ley N° 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo como la Ley N° 24.557 de Riesgos del Trabajo destacan la importancia de las capacitaciones como medida preventiva. Estas leyes exigen que los empleadores capaciten a los trabajadores en temas de seguridad, manejo de equipos y protocolos de emergencia (Congreso de la Nación Argentina, 1972)

Además, la Resolución SRT N° 299/2011 establece los lineamientos para la provisión y uso de EPP, indicando que los empleadores son responsables de proporcionar equipos adecuados a las tareas realizadas por sus trabajadores. Esta resolución también exige que los EPP cumplan con estándares técnicos y sean debidamente certificados.

6.2 MEDIDAS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA

En este apartado se detallan las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de la normativa vigente relacionada con el proceso de producción de combustible a partir de la pirólisis de plástico reciclado.

Es importante señalar que la parte ambiental ya ha sido abordada en el capítulo anterior. Además, en este proyecto no se considera la construcción de la planta ni la zonificación, ya que estas son responsabilidades de la empresa encargada de implementar el proyecto. El propósito de este trabajo es permitir que una empresa ya existente utilice la planta para autoabastecerse de combustible, en caso de desearlo.

Este apartado se enfoca exclusivamente en las acciones que están dentro del alcance del proyecto, tales como la elaboración de planes de contingencia, emergencia, la implementación de los Equipos de Protección Personal (EPP) necesarios, la capacitación del personal, y el cumplimiento de todos los requisitos legales relacionados con la seguridad, salud laboral y protección ambiental, según lo establecido por la normativa vigente.

6.2.1 Análisis y Gestión de Riesgos

En el presente apartado, se llevará a cabo una identificación y evaluación detallada de los riesgos asociados a las distintas actividades involucradas en el proyecto. Este análisis tiene como finalidad garantizar la seguridad operativa, proteger la salud de los trabajadores y asegurar el cumplimiento de las normativas legales aplicables.

A través de la elaboración de una matriz de riesgos, se clasificarán y priorizarán los riesgos identificados, teniendo en cuenta su probabilidad de ocurrencia y el impacto potencial sobre la seguridad, la salud y el medio ambiente. La matriz de riesgos constituirá una herramienta clave para la implementación de medidas preventivas y correctivas, así como para la toma de decisiones informadas que contribuirán a mitigar los riesgos asociados al proyecto.

Matriz de Riesgos					
Actividad	Riesgo	Probabilidad	Impacto	Consecuencia Potencial	Medidas de control
Recepción y almacenamiento de plástico reciclado	Incendio por material inflamable	Media	Crítico	Daños a infraestructura, lesiones graves	Almacenamiento en áreas ventiladas, inspección de materiales.
	Riesgos ergonómicos	Media	Leve	Lesiones musculoesqueléticas	Uso de equipos de manipulación y capacitación en ergonomía.
Alimentación del reactor	Atrapamiento en maquinaria	Media	Moderado	Fracturas, amputaciones	Instalación de resguardos y capacitación en seguridad.
	Exposición a vapores tóxicos	Alta	Crítico	Intoxicaciones, enfermedades respiratorias	Uso de EPP (respiradores, guantes) y ventilación adecuada.
	Incendios o explosiones	Media	Crítico	Pérdida de instalaciones, fatalidades	Control de temperatura y monitoreo de gases.
Proceso de pirólisis	Fuga de gases inflamables	Media	Crítico	Incendios, intoxicaciones	Mantenimiento preventivo y sensores de gas.
	Sobrepresión en el reactor	Baja	Crítico	Explosiones, daños estructurales	Válvulas de seguridad y monitoreo de presión.
	Quemaduras por contacto	Media	Moderado	Quemaduras de primer o segundo grado	Uso de protección térmica y señalización.
Separación de productos	Derrames de combustible	Media	Crítico	Contaminación ambiental, incendios	Uso de bandejas de contención y procedimientos de emergencia.
	Generación de residuos peligrosos	Alta	Moderado	Contaminación del suelo y agua	Plan de gestión de residuos peligrosos.
Almacenamiento de diésel	Incendios o explosiones	Media	Crítico	Pérdidas materiales, riesgos para la vida	Extintores ABC y sistemas contra incendios.
	Contaminación ambiental por fugas	Media	Moderado	Daños a ecosistemas, sanciones legales	Doble contención en tanques y monitoreo continuo.

Para minimizar los riesgos en el proceso de producción de combustible a partir de pirólisis, se implementarán capacitaciones regulares en seguridad y respuesta a emergencias, junto con el uso obligatorio de Equipos de Protección Personal (EPP) específicos para cada actividad. Se establecerán protocolos de seguridad en cada etapa del proceso, realizando inspecciones periódicas de equipos y sistemas de seguridad para detectar fallas y prevenir incidentes. Además, se elaborarán y difundirán planes de contingencia ante emergencias como incendios, fugas de gases o derrames de combustible. Se mantendrá un registro y análisis de incidentes con el fin de mejorar continuamente el sistema de seguridad y garantizar el cumplimiento normativo en todas las operaciones del proyecto.

6.2.2 Equipos de Protección Personal (EPP)

El uso de Equipos de Protección Personal (EPP) es fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores en cada etapa del proceso. Su correcta selección, uso y mantenimiento son esenciales para prevenir accidentes y reducir la exposición a riesgos físicos, químicos y ergonómicos, en conformidad con las normativas de seguridad laboral vigentes.

El adecuado uso de los Equipos de Protección Personal constituye un pilar fundamental dentro de la estrategia de seguridad industrial, garantizando condiciones óptimas para la ejecución de las tareas operativas y reduciendo significativamente los riesgos laborales.

6.2.2.1 Casco de seguridad

El casco de seguridad es un elemento indispensable para la protección contra impactos y la caída de objetos, siendo de uso obligatorio en todas las áreas operativas, especialmente en la manipulación de materiales y durante el mantenimiento de equipos e instalaciones.

6.2.2.2 Guantes de seguridad

Los guantes de seguridad desempeñan un papel crucial en la protección de las manos frente a diversos riesgos. Los guantes resistentes a cortes permiten la manipulación segura del plástico reciclado, mientras que los guantes térmicos y químicos son indispensables para prevenir quemaduras y la exposición a sustancias peligrosas durante la alimentación del reactor y la manipulación de productos derivados.

6.2.2.3 Calzado de seguridad

El calzado de seguridad es esencial para minimizar el riesgo de lesiones en los pies. Se requiere el uso de botas con puntera reforzada y suela antideslizante en todas las etapas del

proceso, mientras que el calzado dieléctrico es obligatorio en tareas con riesgo de descargas eléctricas. Adicionalmente, en zonas de alta temperatura, como la alimentación del reactor, se exige el uso de calzado resistente al calor.

6.2.2.4 Lentes de seguridad

Los lentes de seguridad brindan protección ocular ante distintos riesgos. Los modelos con protección lateral son esenciales para prevenir el contacto con partículas en suspensión, especialmente en la manipulación de materiales, mientras que los lentes con filtro para vapores resultan necesarios en áreas donde se generan gases y humos durante el proceso de pirólisis y condensación.

6.2.2.5 Máscara de protección respiratoria

Las máscaras de protección respiratoria son un elemento clave para evitar la inhalación de sustancias peligrosas. En la manipulación de plásticos triturados se requiere el uso de máscaras contra polvo, mientras que, en la alimentación del reactor, el proceso de pirólisis y la manipulación de combustibles derivados es imprescindible el uso de máscaras con filtros para vapores orgánicos y gases tóxicos.

6.2.2.6 Ropa de protección

La ropa de protección cumple una función esencial en la seguridad del personal. Se exige el uso de indumentaria ignífuga y antiestática para mitigar riesgos asociados a la exposición a llamas y a la acumulación de cargas electrostáticas, particularmente en la alimentación del reactor y el almacenamiento de combustible. Asimismo, la ropa resistente a productos químicos es obligatoria para la manipulación segura de sustancias inflamables y derivadas del proceso.

6.2.2.7 Mantenimiento y uso adecuado de los EPP

El mantenimiento y uso adecuado de los Equipos de Protección Personal (EPP) es crucial para garantizar su efectividad en la prevención de riesgos. Para ello, se realizarán capacitaciones periódicas sobre el uso correcto de los EPP, asegurando que todo el personal esté debidamente instruido. Además, se llevarán a cabo inspecciones regulares para verificar el estado de los equipos y proceder con su reemplazo en caso de desgaste o daño. Se implementarán protocolos de limpieza y almacenamiento adecuados para prolongar la vida útil de los EPP y evitar fallos en su funcionamiento. Por último, se llevará un registro detallado de la entrega y uso de los EPP, garantizando su disponibilidad y el cumplimiento normativo.

6.2.3 Equipos de Extinción de Incendios

En el contexto del proyecto de producción de combustible a partir de pirólisis de plástico reciclado, los equipos de extinción de incendios son fundamentales para la seguridad de los trabajadores, las instalaciones y el entorno. Dado que el proceso involucra materiales inflamables, altas temperaturas y productos derivados del proceso de pirólisis, se hace indispensable contar con un sistema de extinción de incendios eficaz y adecuado. Los matafuegos ABC son esenciales, ya que son capaces de combatir incendios de diferentes clases. Estos equipos permiten enfrentar tres tipos de incendios comunes en el entorno industrial:

- Clase A: Incendios originados por materiales sólidos combustibles como madera, papel, plásticos, textiles, entre otros, que se pueden encontrar en la recepción y almacenamiento de plásticos reciclados.
- Clase B: Incendios que involucran líquidos inflamables o gases, como aceites, solventes y combustibles derivados del proceso de pirólisis. Estos se pueden presentar en la condensación, separación de productos y almacenamiento de combustible.
- Clase C: Incendios eléctricos, que son comunes en áreas donde se manipulan equipos energizados, tales como la alimentación del reactor y las instalaciones eléctricas.

6.2.3.1 Ubicación y accesibilidad

Es esencial que los matafuegos estén ubicados en áreas clave del proyecto, garantizando su fácil acceso en caso de emergencia. Los extintores deben instalarse en puntos estratégicos como la recepción y almacenamiento de plásticos reciclados, el área de alimentación y proceso de pirólisis, la condensación y separación de productos, y el almacenamiento y despacho de combustible.

Los matafuegos se colocarán a una distancia máxima de 15 metros de cualquier área donde haya riesgos potenciales de incendio. Esto asegura que, en caso de incendio, el personal pueda acceder al equipo de extinción de manera rápida y efectiva. Además, los matafuegos estarán instalados en soportes visibles y accesibles, sin obstrucciones, y a una altura recomendada de 1,5 metros del suelo, para facilitar su manejo por todo el personal.

6.2.3.2 Mantenimiento y Revisión

Para asegurar que los matafuegos ABC estén en condiciones óptimas en todo momento, se deben seguir procedimientos rigurosos de mantenimiento y revisión. Se deben realizar inspecciones periódicas para verificar su estado físico, el nivel de presión y la cantidad de agente extintor disponible. Los extintores deben ser revisados mensualmente y sometidos a un mantenimiento técnico más exhaustivo cada seis meses.

En caso de que un extintor no haya sido utilizado, la recarga de los matafuegos se realizará anualmente, independientemente de su estado. Si se presenta alguna anomalía, como pérdida de presión, daño físico o agotamiento del agente extintor, debe ser reemplazado o recargado inmediatamente. Además, se deben llevar registros detallados de cada inspección y mantenimiento realizados, para asegurar el cumplimiento con las normativas de seguridad industrial.

6.2.4 Planes de Emergencia y Contingencia

Los planes de contingencia y emergencia son fundamentales para garantizar una respuesta eficiente y organizada ante situaciones imprevistas que puedan poner en riesgo la seguridad del personal, la integridad de las instalaciones o el medio ambiente. En el contexto del proyecto, se deben establecer procedimientos claros y específicos para hacer frente a los posibles incidentes que puedan ocurrir en cada una de las fases del proceso. Estos planes deben ser revisados y actualizados periódicamente, en función de las lecciones aprendidas y las condiciones operativas cambiantes, y deben ser comunicados de manera efectiva a todo el personal involucrado.

La efectividad de dichos planes depende en gran medida de una comunicación clara y efectiva. Se establecerán canales de comunicación para informar a todo el personal sobre el desarrollo de una emergencia y las acciones a seguir. Además, se designarán responsables para coordinar las acciones de respuesta y se llevarán a cabo reuniones periódicas para revisar y mejorar los planes de contingencia en función de las experiencias previas.

6.2.4.1 Derrames de materiales y fluidos

En caso de derrames de materiales, como productos derivados del proceso de pirólisis o destilación, se activará un protocolo de contención inmediato. Este protocolo incluirá la utilización de absorbentes adecuados, el aislamiento de la zona afectada y la notificación a los equipos de respuesta. El personal capacitado utilizará los EPP correspondientes, como guantes

resistentes a productos químicos y ropa protectora, para manejar el derrame de manera segura. Posteriormente, se procederá a la limpieza y disposición de los residuos conforme a las normativas ambientales vigentes.

6.2.4.2 Incendios

El riesgo de incendios es elevado debido a la presencia de materiales inflamables durante el proceso de pirólisis y la manipulación de combustibles. En caso de incendio, se activará el protocolo de emergencia que incluye la evacuación inmediata del personal y la utilización de extintores manuales para apagar el fuego. Todo el personal será capacitado en el uso de estos equipos y en la evacuación de emergencia. Los procedimientos estarán claramente señalizados en las áreas de alto riesgo, y se realizarán simulacros periódicos para evaluar la efectividad del plan. Además, se mantendrá una comunicación constante con los servicios de emergencia locales para garantizar una rápida respuesta ante cualquier incidente de mayor magnitud.

6.2.4.3 Fugas de gases

Dado que el proceso de pirólisis genera la liberación de gases, se implementará un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire en las áreas críticas, como el reactor y la zona de condensación. En caso de detectar una fuga de gases tóxicos, se activará un protocolo de evacuación inmediata, y el personal usará máscaras con filtro para vapores orgánicos. Además, se aislará la zona afectada para evitar la propagación del riesgo. El personal también recibirá capacitación en el manejo de situaciones relacionadas con la exposición a gases peligrosos. En caso de emergencia, se realizará un llamado inmediato a los servicios de emergencia para garantizar una respuesta profesional y eficaz.

6.2.4.4 Evacuación del personal

En situaciones de emergencia donde sea necesario evacuar rápidamente, se contará con rutas de evacuación bien señalizadas y un plan de reunificación fuera de la planta. Se capacitará al personal en los procedimientos de evacuación y se realizarán simulacros periódicos para asegurar la efectividad de la respuesta ante emergencias. Además, se asignarán puntos de reunión y se designarán responsables de cada área para garantizar que todas las personas sean evacuadas de manera ordenada y segura. Durante la evacuación, se realizará un llamado de emergencia a los servicios de respuesta para asegurar que la situación sea atendida adecuadamente.

6.2.4.5 Accidentes y lesiones laborales

En caso de accidentes laborales, como caídas o lesiones por contacto con equipos calientes, se implementarán protocolos médicos de atención inmediata. Se contará con un botiquín de primeros auxilios completo y personal capacitado para actuar en situaciones de emergencia. Además, se establecerán protocolos para la notificación y registro de accidentes laborales, así como para el seguimiento de la salud del personal después de cualquier incidente. En caso de accidentes graves, se realizará un llamado a los servicios médicos de emergencia para la atención inmediata del afectado.

6.2.5 Capacitaciones

Las capacitaciones son fundamentales para garantizar que el personal del proyecto esté debidamente preparado para actuar de manera segura y eficiente en todas las etapas. El cumplimiento de las normativas vigentes de seguridad y salud laboral es esencial para prevenir accidentes y mitigar riesgos, por lo que se implementarán programas de formación continua para todos los trabajadores involucrados en el proyecto.

Las capacitaciones de seguridad cubrirán una amplia gama de temas relacionados con los peligros específicos del proceso de pirólisis, la manipulación de materiales peligrosos, el uso adecuado de los Equipos de Protección Personal (EPP) y las medidas preventivas para minimizar los riesgos laborales. Estas capacitaciones se brindarán a todo el personal.

Además, se ofrecerán capacitaciones de salud ocupacional, con el objetivo de sensibilizar a los trabajadores sobre la importancia de la prevención de enfermedades laborales, el reconocimiento de síntomas de intoxicación por vapores o contacto con productos químicos, y la importancia de mantener un ambiente laboral saludable. Estas capacitaciones también abarcarán la importancia de las buenas prácticas de higiene personal, la gestión de residuos y la prevención de riesgos ergonómicos.

En cuanto a los procedimientos de emergencia y primeros auxilios, se brindarán entrenamientos específicos para asegurar que el personal sepa cómo actuar ante posibles situaciones de emergencia, como incendios, derrames de materiales peligrosos, fugas de gases o accidentes laborales. Los trabajadores estarán capacitados para identificar rápidamente los riesgos y aplicar medidas de primeros auxilios hasta la llegada del personal médico o de emergencias.

Por último, se realizarán evaluaciones periódicas de los conocimientos adquiridos durante las capacitaciones, y se mantendrán registros detallados de las mismas para garantizar que todos los empleados cuenten con la formación adecuada en cuanto a seguridad, salud y manejo de emergencias. Las capacitaciones serán obligatorias para todo el personal, y su cumplimiento será supervisado y evaluado, a fin de cumplir con las exigencias legales y normativas de seguridad laboral.

6.3 CONCLUSIÓN

El análisis de las normativas legales aplicables al proceso de conversión de plástico reciclado en combustible muestra que es completamente viable cumplir con los requisitos establecidos por la legislación vigente en áreas clave como seguridad, salud laboral y protección ambiental. A lo largo del capítulo, se han detallado las leyes pertinentes y las medidas necesarias para asegurar su cumplimiento en todas las fases del proceso.

Las acciones propuestas, como la implementación de protocolos de seguridad, la formación continua del personal y la provisión de equipos de protección adecuados, permitirán mitigar los riesgos asociados al proceso, garantizando el cumplimiento de los estándares exigidos por la ley. Esto asegura una operación segura y conforme a las normativas vigentes.

Por lo tanto, el cumplimiento de la normativa es factible y esencial para el adecuado desarrollo del proceso, permitiendo su ejecución conforme a los requerimientos legales y promoviendo un entorno de trabajo seguro y saludable.

7 ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo se expone el análisis económico del proyecto, abordando en detalle todos los elementos necesarios para evaluar su viabilidad financiera. El estudio contempla la identificación y estimación de las inversiones iniciales requeridas —como maquinaria, mobiliario, infraestructura, seguridad y servicios—, junto con los costos operativos directos e indirectos, las estrategias de financiamiento y los ingresos proyectados. El objetivo es construir un flujo de caja estimado a 10 años, sobre el cual se calculan indicadores clave como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), además de realizar análisis de sensibilidad que permitan comprender cómo se comporta la rentabilidad del proyecto ante diferentes escenarios.

El enfoque adoptado ha sido deliberadamente conservador, priorizando supuestos desfavorables para evaluar la solidez del proyecto ante riesgos e imprevistos. No solo se ha penalizado al proyecto en cuanto a sus costos, sino también en lo referido a los ingresos: no se contemplaron las ganancias derivadas de los subproductos del proceso, ni los potenciales beneficios económicos asociados al impacto ambiental positivo, como la obtención de bonos de carbono. Al omitir estas fuentes adicionales de ingreso, el estudio establece una base sólida y prudente, que garantiza que los resultados reflejen un margen de seguridad y sean consistentes con los principios de cautela financiera

7.1 INVERSIÓN FIJA TOTAL

La inversión fija total constituye uno de los aspectos fundamentales del análisis económico del proyecto, ya que comprende los costos iniciales necesarios para la puesta en marcha de la planta de producción de diésel a partir de plástico reciclado. En esta sección, se desglosarán detalladamente los componentes de esta inversión, agrupados en diferentes categorías clave para comprender su impacto financiero y su distribución dentro del presupuesto general.

Luego, se integrarán estos datos en una visión global de la inversión fija total, incorporando tanto activos tangibles como intangibles, y permitiendo visualizar con claridad la magnitud del capital requerido para la ejecución del proyecto.

7.1.1 Maquinaria

En la Tabla 7.1, se detalla el listado de las maquinarias y equipos necesarios para el proyecto. Aquí, se incluyen el nombre de cada equipo, su cantidad, los consumos específicos

(eléctrico, de agua y de gas, según corresponda), así como los precios unitarios y totales. Cabe aclarar que se calculan la mínima cantidad de depósitos de combustible necesarios, pero se podría optar por incluir más unidades para ser utilizadas como pulmones o para aumentar la capacidad de reserva en caso de que se considere necesario. Además, se incluye una sección de “Equipos complementarios”, los cuales son equipos auxiliares menores necesarios para el funcionamiento de los equipos, y se calculó su valor como un porcentaje del total del valor de los equipos. Este análisis permite identificar los costos iniciales necesarios para adquirir todos los equipos fundamentales del proceso productivo.

Maquinarias y Equipos	Cantidad	Máquinas y Equipos			Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
		Consumo Eléctrico (Watt)	Consumo de Agua (m ³ /hs)	Consumo de Gas (m ³ /h)		
Silos	2	0	0	0	4200	8400
Tolva de alimentación	1	0	0	0	100	100
Reactor pirolítico	1	2500	0	350	12000	12000
Torre de destilación	1	0	0	100	13000	13000
Intercambiador de calor 1	1	0	4	0	500	500
Intercambiador de calor 2	2	0	2	0	350	700
Colector de gases	1	0	0	0	80	80
Almacenamiento de diésel	2	8000	0	0	3500	7000
Tanque N2	1	0	0	0	2500	2500
Equipos complementarios	1	3000	0	0	8856	8856
Total		13500	8	450		\$ 53.136

Tabla 7.1: Máquinas y Equipos

Una vez identificados los equipos requeridos, se procedió a calcular el costo de importarlos hasta Salta, Argentina. Este cálculo incluye los valores FOB, los costos de flete y seguro, así como los impuestos y tasas aplicables en aduana. En la tabla que sigue, se detalla el desglose de estos costos, ofreciendo una visión clara del valor final de la importación. Esto se observa a continuación en la Tabla 7.2:

Cálculo del Costo de Importación			
Valor CIF (Costo FOB + Flete + Seguro)			
Valor FOB	USD	53.136,00	Presupuesto
Flete	USD	1.300,00	1x20Ft container
Valor CFR	USD	54.436,00	
Valor seguro internacional	USD	544,36	1% de CFR
Valor CIF	USD	54.980,36	
Derecho de importación			
Derecho de importación	USD	19.243,13	35% de CIF
Tasa de estadística	USD	274,90	0,5% de CIF
Base IVA (Base imponible + Derechos + Tasa estadística)			
Base imponible	USD	54.980,36	Valor CIF
Derecho de importación	USD	19.243,13	
Tasa de estadística	USD	274,90	
Base IVA	USD	74.498,39	
Alicuotas generales			
Base imponible	USD	54.980,36	Valor CIF
Derecho de importación	USD	19.243,13	
Tasa de estadística	USD	274,90	
Base IVA	USD	74.498,39	
IVA	USD	15.644,66	21%
IVA Adicional	USD	14.899,68	20%
Impuesto a las Ganancias	USD	4.469,90	6%
Ingresos Brutos	USD	2.234,95	3%
Tasa de oficialización de aduana	USD	10,00	
Tasa de digitalización de aduana	USD	28,00	
Pago en aduana			
Derecho de importación	USD	19.243,13	
Tasa de estadística	USD	274,90	
IVA	USD	15.644,66	
IVA Adicional	USD	14.899,68	
Impuesto a las Ganancias	USD	4.469,90	
Ingresos Brutos	USD	2.234,95	
Tasa de oficialización de aduana	USD	10,00	
Tasa de digitalización de aduana	USD	28,00	
Total a pagar en Aduana	USD	56.805,22	
Valor total de importación			
Valor CIF	USD	54.980,36	
Total a pagar en Aduana	USD	56.805,22	
Transporte Bs. As. - Salta	USD	1.000,00	
Otros	USD	43.984,29	80% de CIF
Total en dólares	USD	156.769,87	
Valor del dólar oficial	ARS	1.030,00	23/12/2024
Total en pesos argentinos	ARS	161.472.965,79	

Tabla 7.2: Costos de Importación

El costo total de traer todas las maquinarias y equipos necesarios hasta la provincia de Salta asciende a \$161.472.965,79 ARS, considerando tanto los valores CIF como los derechos de importación y demás gastos asociados. Este importe constituye una parte significativa de la inversión inicial y resalta la importancia de realizar un análisis exhaustivo de los costos logísticos y aduaneros en la planificación del proyecto.

7.1.2 Mobiliario

En esta sección se analiza el mobiliario necesario para la correcta instalación y operación de la planta proyectada. Este mobiliario incluye solo los elementos esenciales para equipar las áreas administrativas y operativas, asegurando funcionalidad y comodidad tanto para el personal como para el adecuado control de las actividades.

En la Tabla 7.3 se detallan los artículos, la cantidad requerida, su precio unitario y el costo total por artículo en pesos argentinos (ARS). Esta información proporciona una visión clara y precisa del presupuesto necesario para esta categoría.

El monto total estimado para la adquisición del mobiliario es de \$8.220.000 ARS, considerando todos los elementos indispensables para cumplir con los requisitos del proyecto.

Mobiliario y Equipamiento			
Item	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Silla	5	\$ 100.000	\$ 500.000
Escritorio	5	\$ 120.000	\$ 600.000
PC	5	\$ 800.000	\$ 4.000.000
Iluminación	20	\$ 15.000	\$ 300.000
Aire Acondicionado	1	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
Impresora	1	\$ 500.000	\$ 500.000
Heladera	1	\$ 600.000	\$ 600.000
Microondas	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Inodoro	1	\$ 150.000	\$ 150.000
Videt	1	\$ 80.000	\$ 80.000
Bacha	1	\$ 90.000	\$ 90.000
Total (ARS)			\$ 8.220.000

Tabla 7.3: Mobiliario y Equipamiento

7.1.3 Seguridad

En esta sección se analizará el costo de los principales equipos de seguridad necesarios para garantizar el bienestar de los trabajadores y la protección de las instalaciones de la planta. Dado el alto poder incendiario del proceso productivo, se decidió sobredimensionar significativamente la cantidad de matafuegos en comparación con lo requerido por las normas de higiene y seguridad. Esta decisión responde al objetivo de minimizar riesgos y estar preparados para cualquier eventualidad.

Asimismo, se incluyó la vestimenta de seguridad necesaria para todos los operarios y técnicos que estarán involucrados en el proyecto. Esta vestimenta incluye guantes, borcegos y ropa adecuada para el entorno de trabajo. El cálculo, como se analiza en Tabla 7.4, se realizó considerando la cantidad total de trabajadores (lo cual se detalla y profundiza posteriormente), y prevé la entrega de un conjunto completo de estos artículos cada año, asegurando así la renovación periódica y el cumplimiento de los estándares de seguridad.

El costo total estimado para los equipos de seguridad asciende a \$1.782.000 ARS, lo que refleja una inversión esencial para priorizar la seguridad de las personas y las operaciones en la planta.

Seguridad			
Item	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Matafuegos de 5 Kg. Clase ABC	10	\$ 60.000	\$ 600.000
Gabinete para Matafuego	10	\$ 25.000	\$ 250.000
Iluminación de emergencia	10	\$ 20.000	\$ 200.000
Guantes	4	\$ 8.000	\$ 32.000
Botines de Seguridad	5	\$ 50.000	\$ 250.000
Ropa de trabajo grafa	5	\$ 40.000	\$ 200.000
Cascos	5	\$ 50.000	\$ 250.000
Total (ARS)			\$ 1.782.000

Tabla 7.4: Elementos de Seguridad

7.1.4 Recaudación Edilicia

En esta sección se analizarán los costos asociados a la infraestructura necesaria para la puesta en marcha del proyecto, considerando todos los elementos constructivos y adaptativos requeridos, los cuales han sido dispuestos de una forma tentativa, entendiendo el alcance del

proyecto. Para la estimación de los costos, se ha contemplado el peor escenario posible, es decir, aquel que requiere movimiento de suelo significativo.

7.1.4.1 Movimiento de suelo

La nivelación del terreno se estimó a partir de información proporcionada por el Colegio de Arquitectos de la Provincia de Salta, actualizada a noviembre de 2024, que incluye los costos estimativos de mano de obra y materiales por metro cúbico (m^3). Se calculó el volumen necesario teniendo en cuenta la superficie total que ocupan los equipos más las áreas administrativas, a lo que se sumó un 30% adicional para accesos, pasillos y áreas de circulación, así como una pendiente pronunciada, asumiendo un caso muy desfavorable. Este enfoque garantiza que la superficie sea adecuada para la instalación segura y eficiente de los equipos y el desplazamiento de operadores.

7.1.4.2 Construcción de la nave industrial y áreas interiores.

Para la construcción de la nave industrial y sus áreas internas, se utilizó información proporcionada por el COPAIPA (Consejo Profesional de Agrimensores, Ingenieros y Profesionales Afines), actualizada a octubre de 2024. Según los datos obtenidos, se estimaron los costos por metro cuadrado (m^2) para diferentes tipos de construcciones:

- Nave industrial (Galpón Metálico): Se seleccionó este tipo de construcción por su relación costo-beneficio, especialmente considerando las necesidades del proyecto.
- Construcciones interiores: Dentro de la nave industrial se habilitarán oficinas (20 m^2), baño (4 m^2) y un comedor (16 m^2). Para estas áreas, se eligió la categoría denominada "Vivienda FONAVI", ya que es una de las más económicas y adecuadas para espacios sencillos en este tipo de proyecto.

Al igual que en el cálculo del movimiento del suelo, se sumó un 30% adicional a la superficie de los equipos para garantizar pasillos y accesorios cómodos dentro de la nave.

7.1.4.3 Costo total de infraestructura

El monto total estimado para la infraestructura necesaria asciende a \$112.864.444,12 ARS, considerando todos los aspectos anteriormente mencionados. Este cálculo busca garantizar que se disponga de un espacio adecuado, seguro y funcional para la operación de la planta, cumpliendo con las normativas vigentes y las necesidades específicas del proyecto. El detalle se realiza en Tabla 7.5.

Recaudación Edilicia				
Descripción de los Trabajos	Costos Unitarios (\$/u)		Cantidad	Total
	Materiales	Mano de Obra		
Movimiento de suelo				
Nivelación, relleno y compactado del terreno	\$ 19.873,12	\$ 13.050,65	160 m³	\$ 5.267.803,20
Construcción				
Galpón Metálico		\$ 544.913,51	132 m2	\$ 71.928.583,32
Vivienda Fonavi		\$ 891.701,44	40 m2	\$ 35.668.057,60
Total (ARS)				\$ 112.864.444,12

Tabla 7.5: Recaudación Edilicia

De esta forma, el croquis de la planta tentativa que planteamos se puede observar en la Ilustración 7.1, en la misma se pueden observar un espacio descubierto, el cual se encuentra destinado a albergar los silos de almacenamiento y la torre de destilación. El resto de equipos, se encontrarán dentro del espacio cubierto.

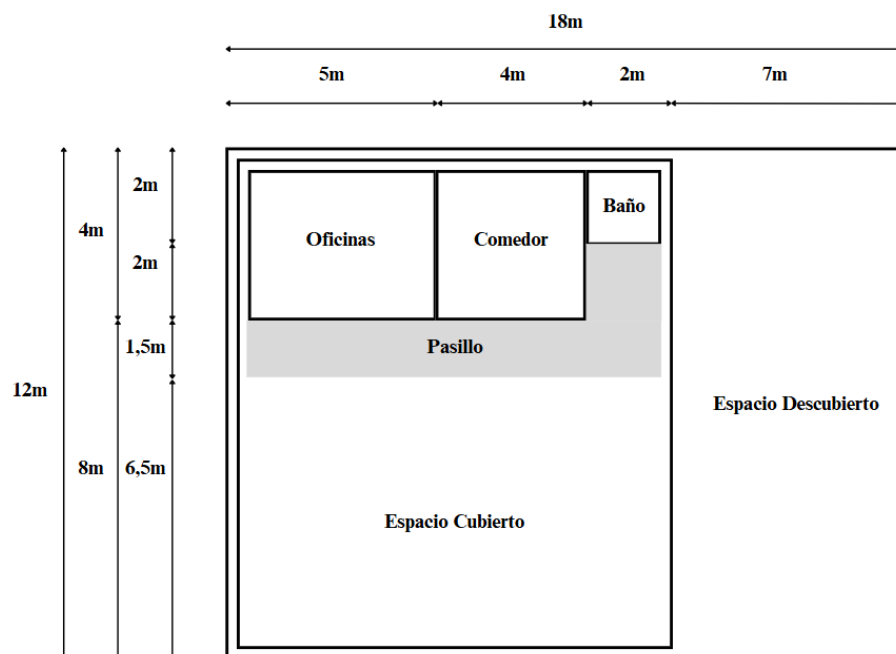


Ilustración 7.1: Croquis de planta tentativo

7.1.5 Cálculo de Inversión Fija Total

A continuación, se presentan Tabla 7.6 y Tabla 7.7, que desglosan los tipos de activos necesarios para llevar a cabo este proyecto. El primero, correspondiente a los activos tangibles, resume las inversiones detalladas en las secciones anteriores, incluyendo infraestructura, mobiliario, equipos de seguridad, y las maquinarias necesarias para el proceso productivo.

Por otro lado, el cuadro de activos intangibles incluye la inversión en software SCADA, el mismo será empleado en el proceso productivo. Esta herramienta resulta clave para optimizar el manejo de la información, la operación de los equipos y el monitoreo de las actividades en planta. La incorporación de este software asegura una integración tecnológica que permitirá alcanzar los estándares de eficiencia y calidad esperados. Además de su costo, se le añade un porcentaje del 20% en imprevistos (porcentaje sugerido por la industria), en caso de inconvenientes a la hora de adquirirlo o instalarlo. Ambas tablas reflejan el enfoque integral del proyecto, combinando elementos físicos y digitales necesarios para su éxito.

Activos Tangibles	
Rubro	Precio
Maquinaria	\$ 161.472.966
Mobiliario	\$ 8.220.000
Seguridad	\$ 1.782.000
Readecuación edicilia	\$ 112.864.444
Total (ARS)	\$ 284.339.410

Tabla 7.6: Activos Tangibles

Activos Intangibles	
Rubro	Precio
Licencias de software	\$ 15.000.000
Imprevistos 20%	\$ 3.000.000
Total (ARS)	\$ 18.000.000

Tabla 7.7: Activos Intangibles

En la siguiente Tabla 7.8, se presenta un resumen general de las inversiones fijas necesarias, integrando los valores de los activos tangibles e intangibles mencionados anteriormente. De igual manera, se añade un porcentaje del 10% en imprevistos, el cuál es sugerido por la industria. Esta inversión fija corresponde a un gasto que deberá realizarse una sola vez para poner en marcha el proyecto. Este desglose permite visualizar claramente la magnitud del esfuerzo económico inicial requerido para implementar la planta y garantizar que todos los aspectos operativos y tecnológicos queden cubiertos desde el inicio.

Inversión Fija Total	
Activos Tangibles	\$ 284.339.410
Activos Intangibles	\$ 18.000.000
Subtotal	\$ 302.339.410
Imprevistos (10%)	\$ 30.233.941
Total	\$ 332.573.351

Tabla 7.8: Inversión Fija Total

7.2 CRÉDITO

La financiación es un componente esencial para la ejecución de este proyecto. Para ello, se ha definido una estrategia financiera mixta, en la cual el 50% de la inversión será cubierta con fondos propios, mientras que el 50% restante se financiará mediante un crédito. Este esquema no solo equilibra la carga financiera del proyecto, sino que también permite optimizar el uso de recursos disponibles, reduciendo el impacto sobre el capital propio y asegurando una mayor flexibilidad para afrontar los costos iniciales y operativos.

El crédito solicitado asciende a \$141.102.037, con un plazo de amortización de 84 meses bajo el sistema de amortización Francés, el cual se caracteriza por el pago de cuotas constantes durante toda la vida del préstamo. Este sistema facilita una gestión financiera predecible al equilibrar los pagos de intereses y la amortización del capital, lo que resulta crucial para garantizar la sostenibilidad económica del proyecto. Las condiciones del crédito, incluyendo una Tasa Efectiva Anual (TEA) del 108,95%, fueron obtenidas del banco BBVA Francés, destacándose como una opción competitiva dentro del mercado financiero actual y adecuada para los riesgos asociados a proyectos de esta naturaleza.

Para proporcionar una visión más clara y detallada, a continuación, se presentan Tabla 7.9, Tabla 7.10 y Tabla 7.11, que muestran los datos principales del crédito, así como el cálculo detallado de las cuotas correspondientes, lo que permite visualizar de forma precisa la distribución de los pagos durante todo el periodo de amortización.

Origen de los Fondos	Monto
Fondos propios 50%	\$ 166.286.675
Fondos de terceros 50%	\$ 166.286.675
Total (ARS)	\$ 332.573.351

Tabla 7.9: Origen de Fondos

Línea de Crédito y Condiciones	
Préstamo	\$ 166.286.675
Periodo de Gracia (meses)	12
Tasa Efectiva Anual	108,95%
Sistema de Amortización	Francés
Periodo Deuda (meses)	84
Periodo Deuda (años)	7

Tabla 7.10: Detalles del Crédito

Préstamo				
Periodo	Deuda	Amortización	Interés	Cuota
1	\$ 166.286.675	\$ 15.301.218,66	\$ 12.805.009,86	\$ 28.106.228,51
2	\$ 125.800.818	\$ 16.689.804,25	\$ 11.416.424,26	\$ 28.106.228,51
3	\$ 109.111.014	\$ 18.204.403,98	\$ 9.901.824,53	\$ 28.106.228,51
4	\$ 90.906.610	\$ 19.856.453,65	\$ 8.249.774,87	\$ 28.106.228,51
5	\$ 71.050.156	\$ 21.658.426,81	\$ 6.447.801,70	\$ 28.106.228,51
6	\$ 49.391.730	\$ 23.623.929,05	\$ 4.482.299,47	\$ 28.106.228,51
7	\$ 25.767.801	\$ 25.767.800,61	\$ 2.338.427,91	\$ 28.106.228,51
Total (ARS)	\$ 638.314.805	\$ 141.102.037	\$ 55.641.563	\$ 196.743.600

Tabla 7.11: Pago del Préstamo

La elección de esta estructura de financiamiento responde a la necesidad de asegurar la disponibilidad inmediata de recursos para afrontar inversiones clave, como la adquisición de equipos especializados, la adecuación de la infraestructura, entre otros.

7.3 SERVICIOS

En esta sección se analizarán los servicios esenciales necesarios para el funcionamiento del proyecto, los cuales se dividen en tres apartados: consumo eléctrico, agua y gas. Para cada uno de estos servicios, se realizará un análisis técnico, determinando los consumos específicos de cada área involucrada en el proyecto, y un análisis económico, estableciendo los costos mensuales y anuales asociados. Esto permitirá incluir estos valores en el flujo de caja del proyecto, brindando una perspectiva completa de los gastos operativos y asegurando una planificación financiera adecuada.

7.3.1 Consumo Eléctrico

En este apartado se presentan dos tablas, Tabla 7.12 y Tabla 7.13, que detallan los consumos eléctricos asociados al proyecto. La primera muestra los consumos correspondientes al área de producción, considerando el funcionamiento de los equipos principales y auxiliares. La segunda detalla los consumos eléctricos del área administrativa, incluyendo los equipos necesarios para las operaciones generales. En cada tabla se calcula el consumo total mensual en kilovatios-hora (kWh/mes), permitiendo identificar claramente las necesidades energéticas de cada área.

Consumo Eléctrico de Producción					
Equipo/Maquina	Potencia [Watt]	Uso [Hs/día]	Consumo [kWh/día]	Días al mes	Consumo [kWh/mes]
Silos	0	24	0	30	0
Tolva de alimentación	0	16	0	20	0
Reactor pirolítico	2500	16	40	20	800
Torre de destilación	0	16	0	20	0
Intercambiador de calor 1	0	16	0	20	0
Intercambiador de calor 2	0	16	0	20	0
Colector de gases	0	16	0	20	0
Almacenamiento de diésel	8000	24	192	30	5.760
Tanque N2	0	24	0	30	0
Equipos complementarios	1200	16	19	20	384
Total	8.000				6.944

Tabla 7.12: Consumo eléctrico de producción

Consumo Eléctrico de Administración					
Item	Potencia [Watt]	Cantidad de [Hs/día]	Consumo [kWh/día]	Cantidad de Días al mes	Consumo [kWh/mes]
Iluminación	2000	8	16	30	480
Aire Acondicionado	3000	8	24	20	480
Impresora Multifuncion	200	2	0,4	20	8
PC	750	16	12	20	240
Heladera	300	24	7,2	30	216
Microondas	1000	2	2	20	40
Total	7250				1464

Tabla 7.13: Consumo eléctrico de administración

Luego de analizar los consumos eléctricos por separado en las áreas de producción y administración, la información se consolida en Tabla 7.14. A partir del cuadro tarifario proporcionado por la entidad EDESA, actualizado a diciembre del 2024, se determinan los costos eléctricos totales que tendría el proyecto. Este análisis permite estimar con precisión el impacto financiero del consumo eléctrico en las operaciones mensuales y anuales del proyecto.

Consumo Eléctrico					
Costo Fijo [\$]	Consumo Promedio Mensual [kWh/mes]	Costo Variable [\$/kWh]	Factor de Simultaneidad	Costo Total Mensual [\$]	Costo Total Anual [\$]
16.002	8.408	141,25	0,8	966.108	11.593.301

Tabla 7.14: Consumo eléctrico

7.3.2 Consumo de Agua

En este apartado se presenta la Tabla 6.15 que detalla el consumo de agua del proyecto, considerando tanto los requerimientos de los equipos en el proceso productivo como los consumos administrativos, para lograr la producción planteada en el estudio técnico, en un mes de trabajo. Para los cálculos, se consideró que no se recirculará agua para el consumo de los equipos, con la finalidad de simplificar el análisis. A partir de este consumo total y utilizando el cuadro tarifario proporcionado por la entidad “AGUAS DEL NORTE”, actualizado a noviembre del 2024, se determinan los costos asociados a este servicio. Este análisis permite estimar los costos mensuales y anuales del suministro de agua, asegurando su correcta incorporación al flujo de caja del proyecto.

Consumo de Agua					
Costo Fijo [\$]	\$/m ³	Coefficiente de Consumo	Consumo Promedio Mensual [m ³]	Costo Total Mensual [\$]	Costo Total Anual [\$]
263.512,2	737,6	1,1	48	302.460	3.629.515

Tabla 7.15: Consumo de agua

7.3.3 Consumo de Gas

En esta sección se analiza el consumo de gas del proyecto, destacando que, aunque el reactor pirolítico no requerirá gas de la red, ya que se planea utilizar los gases no condensables generados en el proceso de pirólisis como fuente de energía para su propio quemador, se consideró un escenario conservador en el que este suministro externo sí sería necesario.

Para este análisis, se contemplaron los consumos estimados del reactor y de la torre de destilación, simulando el peor escenario posible. Posteriormente, con base en el cuadro tarifario proporcionado por la entidad GASNOR, actualizado a diciembre del 2024, se calcularon los costos mensuales y anuales del servicio de gas, como se observa en Tabla 6.16. Esto asegura que el proyecto está preparado financieramente para cualquier eventualidad relacionada con el suministro de este recurso.

Consumo de Gas				
Equipo	Consumo (m ³ /h)	Horas/día	Días	Consumo Mensual (m ³)
Reactor	350	9	20	63000
Torre de destilación	100	6	20	12000
Cargo fijo (\$)	Costo del m ³ (\$)	Consumo mes m ³	Costo mensual (\$)	Costo anual (\$)
2.872,11	8,5355	75000	643.035	7.716.415

Tabla 7.16: Consumo de gas

7.4 DEPRECIACIONES Y AMORTIZACIONES

La depreciación y las amortizaciones son elementos esenciales en el análisis financiero de cualquier proyecto, ya que permiten reflejar de manera precisa el desgaste y la pérdida de valor de los activos con el paso del tiempo. Estos conceptos contables resultan indispensables para garantizar una correcta valoración económica, proyectar los costos operativos y evaluar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

La depreciación se refiere al proceso mediante el cual se distribuye el costo de un activo tangible, como maquinaria, mobiliario o herramientas, a lo largo de su vida útil, reconociendo así su deterioro gradual debido al uso, el desgaste físico y la obsolescencia tecnológica. Por su parte, las amortizaciones se aplican a costos intangibles o diferidos, permitiendo reflejar su agotamiento a medida que generan beneficios económicos.

A continuación, en la Tabla 7.17, se detallan los cálculos y valores específicos correspondientes a cada uno de los activos en pesos argentinos (ARS), reflejando el costo inicial, la vida útil estimada, el valor de depreciación anual.

Para el cálculo de la depreciación se emplea el método lineal, el cual distribuye de manera uniforme el costo del activo a lo largo de su vida útil. Este método es ampliamente reconocido por su simplicidad y su capacidad para facilitar la proyección financiera y la comparación de resultados a lo largo del tiempo.

Depreciación y Amortización							
Activos	Vida Útil	Valor del Activo	Períodos				
			1	2	3	4	5
Maquinaria e insumos	10	\$ 161.472.966	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297
Mobiliarios y equipamiento	10	\$ 8.220.000	\$ 822.000	\$ 822.000	\$ 822.000	\$ 822.000	\$ 822.000
Herramientas y seguridad	10	\$ 1.782.000	\$ 178.200	\$ 178.200	\$ 178.200	\$ 178.200	\$ 178.200
Readecuación edilicia	50	\$ 112.864.444	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289
Total			\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785

Depreciación y Amortización							
Activos	Vida Útil	Valor del Activo	Períodos				
			6	7	8	9	10
Maquinaria e insumos	10	\$ 161.472.966	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297	\$ 16.147.297
Mobiliarios y equipamiento	10	\$ 8.220.000	\$ 822.000	\$ 822.000	\$ 822.000	\$ 822.000	\$ 822.000
Herramientas y seguridad	10	\$ 1.782.000	\$ 178.200	\$ 178.200	\$ 178.200	\$ 178.200	\$ 178.200
Readecuación edilicia	50	\$ 112.864.444	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289	\$ 2.257.289
Total			\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785

Tabla 7.17: Depreciación y Amortización

7.5 COSTOS DE FABRICACIÓN DIRECTOS

Determinar los costos de fabricación directos es un paso fundamental en la planificación económica del proyecto, ya que permite identificar con precisión los recursos necesarios para llevar a cabo la producción de manera eficiente y sostenible. Este apartado detalla los costos relacionados con la materia prima y la mano de obra directa, ambos factores clave para garantizar la operatividad eficiente del proceso de pirólisis. Evaluar estos costos no solo es necesario para establecer el costo de producción unitario, sino también para realizar un seguimiento adecuado de los recursos asignados y garantizar la rentabilidad del proyecto.

En primer lugar, en Tabla 7.18, se presenta el costo de la materia prima, que en este caso corresponde al polietileno. Este material se obtiene de proveedores locales, los cuales ofrecen lo ofrecen ya clasificado, limpiado y pelletizado, es decir, listo para ser utilizado en nuestro proceso. Se calcula en función del precio unitario medio que se consiguió entre los diferentes oferentes del mercado Salteño. A partir de este valor, se estima el costo mensual y anual, permitiendo así evaluar la sostenibilidad económica de su suministro.

Costo de Materia Prima				
Materia	Costo Unitario	Consumo mensual (kg)	Costo mensual	Costo Anual
Polietileno	\$ 700	174000	\$ 121.800.000	\$ 1.461.600.000

Tabla 7.18: Costo de materia prima

Por otro lado, el costo del personal directo incluye a los trabajadores necesarios para la operación continua de la planta de producción, como se observa en Tabla 7.19. El equipo está compuesto por un ingeniero industrial que actúa como jefe de producción, encargado de la planificación, gestión de recursos, monitoreo del desempeño y optimización de procesos. Además, se cuenta con dos técnicos responsables de supervisar las variables diarias del proceso, como temperaturas, presiones y flujos, asegurando que se mantengan dentro de los parámetros óptimos. Finalmente, dos operarios se encargan de ejecutar las maniobras clave del proceso, como la alimentación del reactor de pirólisis, el mantenimiento básico de los equipos y el monitoreo visual de los sistemas durante su turno. La composición salarial de estos roles se basa en el costo por hora de cada categoría laboral, lo que permite calcular de manera precisa los costos mensuales y anuales asociados, considerando el sueldo anual complementario. Esta información se presenta de manera estructurada a continuación.

Balance de Personal						
Cargo	Cantidad	Horas por Mes	Costo por Hora	Costo Mensual	Costo Mensual + Carga Social	Costo Anual
Jefe de Operaciones	1	160	\$ 7.500	\$ 1.200.000	\$ 1.800.000	\$ 23.400.000
Supervisor	2	160	\$ 6.500	\$ 2.080.000	\$ 3.120.000	\$ 40.560.000
Operario	2	160	\$ 4.500	\$ 1.440.000	\$ 2.160.000	\$ 28.080.000
Total						\$ 92.040.000

Tabla 7.19: Balance de personal productivo

Finalmente, teniendo en cuenta los costos de materia prima y de personal directo, en Tabla 7.20, se estima el costo total de fabricación directa, en pesos argentinos, necesario para el proceso de producción. Esta consolidación de datos es fundamental para evaluar la eficiencia del uso de recursos y para establecer un precio competitivo del producto final en el mercado. Además, la tabla correspondiente no solo resume de manera visual y ordenada todos los costos involucrados, sino que también incluye una proyección de estos costos directos para los próximos años. Se estima un aumento anual del 10% en cada rubro, basándose en la inflación, el incremento esperado en los precios de las materias primas debido a fluctuaciones del mercado, y posibles ajustes salariales necesarios. Esta previsión no solo permite anticipar variaciones futuras en el costo operativo, sino que también asegura una planificación económica robusta, minimizando riesgos financieros asociados a incrementos no contemplados.

Costos de Fabricación Directos					
Concepto	Períodos				
	1	2	3	4	5
Materia prima (\$)	1.461.600.000	1.607.760.000	1.768.536.000	1.945.389.600	2.139.928.560
Mano de (\$)	82.680.000	90.948.000	100.042.800	110.047.080	121.051.788
Total (\$)	1.544.280.000	1.698.708.000	1.868.578.800	2.055.436.680	2.260.980.348

Costos de Fabricación Directos					
Concepto	Períodos				
	6	7	8	9	10
Materia prima (\$)	2.353.921.416	2.589.313.558	2.848.244.913	3.133.069.405	3.446.376.345
Mano de (\$)	133.156.967	146.472.663	161.119.930	177.231.923	194.955.115
Total (\$)	2.487.078.383	2.735.786.221	3.009.364.843	3.310.301.328	3.641.331.460

Tabla 7.20: Costos de fabricación directos

7.6 COSTOS DE FABRICACIÓN INDIRECTOS

Los costos de fabricación indirectos representan un componente esencial en la determinación del costo total de producción, ya que engloban aquellos gastos que, aunque no se asignan directamente a la elaboración del producto, son imprescindibles para el funcionamiento eficiente de la operación, como insumos auxiliares, personal administrativo y gastos generales.

En este análisis se identifican y detallan los principales costos de fabricación indirectos asociados al proyecto. El primero de ellos corresponde al costo de insumos, específicamente el nitrógeno, que se emplea para eliminar el oxígeno presente en el horno de pirólisis y garantizar un ambiente controlado durante el proceso. El costo de este insumo se calcula en función del precio unitario del nitrógeno y la cantidad necesaria para el funcionamiento mensual y anual del sistema, como se analiza en Tabla 7.21.

Costo de los Insumos					
Insumo	Unidad	Costo unitario	Consumo Mensual	Costo Mensual	Costo Anual
Nitrógeno	m ³	\$ 3.200	360	\$ 1.152.000	\$ 13.824.000

Tabla 7.21: Costos de insumos

Por otra parte, se considera la incorporación de un personal administrativo, cuyo rol incluye actividades esenciales vinculadas al área de producción, como la gestión de compras, la coordinación de trámites administrativos, la organización de documentación de proveedores, el manejo de reportes financieros del sector y el seguimiento de contratos. Este puesto resulta indispensable para garantizar un flujo eficiente de las operaciones y para mantener un control adecuado de los aspectos administrativos que impactan directamente en la gestión de recursos. Los costos asociados a esta posición se han detallado en la Tabla 6.22, que se presenta a continuación, proporcionando una visión clara de su impacto financiero.

Balance de Personal						
Cargo	Cantidad de Puestos	Horas por Mes	Costo por Hora	Costo Mensual	Costo Mensual + Carga Social	Costo Anual
Encargado de compras	1	160	\$ 4.500	\$ 720.000	\$ 1.080.000	\$ 14.040.000

Tabla 7.22: Balance de personal administrativo

Adicionalmente, como se observa en la Tabla 7.23, se ha realizado una proyección de los costos indirectos asociados al proyecto para los próximos 10 años. Esta estimación supone un incremento anual del 10% en cada uno de estos costos, basado en la premisa de que los gastos operativos suelen aumentar con el tiempo debido a factores como la inflación, el ajuste de salarios, y el incremento en el costo de servicios e insumos.

Es importante resaltar que todos los costos indirectos que se detallan a continuación en la Tabla 6.23, ya han sido explicados en secciones anteriores del proyecto, y ahora se presentan de manera consolidada para facilitar su análisis y comparación. A partir de este punto, se proporcionan algunas aclaraciones adicionales respecto a ciertos costos que requieren justificación, en particular el costo de mantenimiento y el costo de alquiler.

- El costo de mantenimiento de las maquinarias se ha estimado en un 5% de su costo inicial. Esta cifra, aunque basada en estándares generales, resulta lógica considerando que se trata de equipos especializados cuyo mantenimiento regular es necesario para preservar su eficiencia operativa y prevenir fallos.
- Por otro lado, se ha incluido un costo de alquiler para reflejar el posible escenario en el que la empresa deba adquirir un terreno para la planta de producción. En caso de que ya se disponga del terreno, este costo se justifica como el costo de oportunidad, es decir, lo que se deja de ganar por destinar dicho terreno al proyecto en lugar de otras actividades económicas, como el arrendamiento a terceros.

Costos de Fabricación Indirectos					
Concepto	Período				
	1	2	3	4	5
Insumos	\$ 13.824.000	\$ 15.206.400	\$ 16.727.040	\$ 18.399.744	\$ 20.239.718
Mano de obra	\$ 14.040.000	\$ 15.444.000	\$ 16.988.400	\$ 18.687.240	\$ 20.555.964
Mantenimiento	\$ 8.073.648	\$ 8.881.013	\$ 9.769.114	\$ 10.746.026	\$ 11.820.628
Alquiler	\$ 7.200.000	\$ 7.920.000	\$ 8.712.000	\$ 9.583.200	\$ 10.541.520
Energía eléctrica	\$ 11.593.301	\$ 12.752.632	\$ 14.027.895	\$ 15.430.684	\$ 16.973.753
Agua	\$ 3.629.515	\$ 3.992.467	\$ 4.391.713	\$ 4.830.885	\$ 5.313.973
Gas	\$ 7.716.415	\$ 8.488.057	\$ 9.336.863	\$ 10.270.549	\$ 11.297.604
Internet WIFI	\$ 240.000	\$ 264.000	\$ 290.400	\$ 319.440	\$ 351.384
Artículos de limpieza	\$ 360.000	\$ 396.000	\$ 435.600	\$ 479.160	\$ 527.076
Total	\$ 66.676.880	\$ 73.344.568	\$ 80.679.025	\$ 88.746.927	\$ 97.621.620

Costos de Fabricación Indirectos					
Concepto	Período				
	6	7	8	9	10
Insumos	\$ 22.263.690	\$ 24.490.059	\$ 26.939.065	\$ 29.632.972	\$ 32.596.269
Mano de obra	\$ 22.611.560	\$ 24.872.716	\$ 27.359.988	\$ 30.095.987	\$ 33.105.586
Mantenimiento	\$ 13.002.691	\$ 14.302.960	\$ 15.733.256	\$ 17.306.582	\$ 19.037.240
Alquiler	\$ 11.595.672	\$ 12.755.239	\$ 14.030.763	\$ 15.433.839	\$ 16.977.223
Energía eléctrica	\$ 18.671.128	\$ 20.538.241	\$ 22.592.065	\$ 24.851.271	\$ 27.336.398
Agua	\$ 5.845.370	\$ 6.429.907	\$ 7.072.898	\$ 7.780.188	\$ 8.558.207
Gas	\$ 12.427.364	\$ 13.670.100	\$ 15.037.110	\$ 16.540.822	\$ 18.194.904
Internet WIFI	\$ 386.522	\$ 425.175	\$ 467.692	\$ 514.461	\$ 565.907
Artículos de limpieza	\$ 579.784	\$ 637.762	\$ 701.538	\$ 771.692	\$ 848.861
Total	\$ 107.383.782	\$ 118.122.160	\$ 129.934.376	\$ 142.927.814	\$ 157.220.595

Tabla 7.23: Costos de fabricación indirectos

7.7 CAPITAL DE TRABAJO

En esta sección se analizará el capital de trabajo requerido para el proyecto, un concepto fundamental en la gestión financiera que se refiere a los recursos necesarios para cubrir las operaciones diarias de una empresa. El capital de trabajo asegura que el proyecto pueda financiar sus actividades operativas desde la adquisición de materia prima hasta la obtención del producto final, en este caso, el combustible generado por el proceso de pirólisis.

Aunque este proyecto no genera ingresos reales, se define un período o ciclo ficticio para estimar el capital de trabajo, considerando el tiempo transcurrido desde la compra de la materia prima hasta el momento en que el combustible obtenido se utilizaría, simulando la generación de beneficios o ingresos. Para garantizar la seguridad financiera del proyecto, este ciclo se sobredimensionó, estableciendo una duración de dos meses. Este enfoque permite contemplar posibles variaciones en los tiempos operativos y asegurarse de que los recursos financieros sean suficientes para sostener las actividades durante todo el período estimado. El detalle del cálculo del capital de trabajo se observa en Tabla 7.24.

Capital de Trabajo	
Rubro	Costo anual
Materia Prima	\$ 1.461.600.000
Mano de Obra Directa	\$ 82.680.000
Insumos	\$ 13.824.000
Mantenimiento	\$ 8.073.648
Alquiler	\$ 7.200.000
Internet WI FI	\$ 240.000
Energía Eléctrica	\$ 11.593.301
Agua	\$ 3.629.515
Articulos de limpieza	\$ 360.000
Costo Total Anual	\$ 1.589.200.465
Costo Diario	\$ 4.353.974
Capital de Trabajo (60 dias)	\$ 261.238.433
Capital de Trabajo	\$ 261.238.433

Tabla 7.24: Capital de Trabajo

7.8 INGRESOS

En esta sección se analizarán los ingresos proyectados para el proyecto, basados en las unidades de combustible fabricadas. Se considera que la capacidad de producción será constante, ya que no se contemplan futuras ampliaciones que incrementen dicha capacidad.

El ingreso se estima utilizando un precio unitario equivalente al valor actual del diésel en el mercado, ya que, es el ahorro que genera la empresa por autoabastecerse de este producto. Si bien nuestro estudio de mercado y el análisis de los precios actuales, junto con las estimaciones de tendencias futuras, indican que el precio del diésel debería seguir incrementándose significativamente con altos porcentajes interanuales, para mantenernos en un enfoque conservador y realista, se decidió considerar únicamente una suba del 20% anual en el precio del combustible. El detalle de los números se muestra en Tabla 6.25.

Esta metodología asegura que el análisis económico se mantenga del lado de la seguridad, penalizando el proyecto al contemplar escenarios más adversos. Este enfoque es consistente con la estrategia aplicada a lo largo de todo el estudio económico, donde se prioriza la evaluación de los peores escenarios posibles para garantizar la viabilidad y resiliencia del proyecto ante condiciones menos favorables.

Ingresos					
Concepto	Períodos				
	1	2	3	4	5
Unidades producidas (l)	1.104.000	1.104.000	1.104.000	1.104.000	1.104.000
Ahorro por unidad (\$/l)	\$ 1.348	\$ 1.618	\$ 1.941	\$ 2.329	\$ 2.795
Total	\$ 1.488.192.000	\$ 1.785.830.400	\$ 2.142.996.480	\$ 2.571.595.776	\$ 3.085.914.931

Ingresos					
Concepto	Períodos				
	6	7	8	9	10
Unidades producidas (l)	1.104.000	1.104.000	1.104.000	1.104.000	1.104.000
Ahorro por unidad (\$/l)	\$ 3.354	\$ 4.025	\$ 4.830	\$ 5.796	\$ 6.955
Total	\$ 3.703.097.917	\$ 4.443.717.501	\$ 5.332.461.001	\$ 6.398.953.201	\$ 7.678.743.842

Tabla 7.25: Ingresos

7.9 FLUJO DE CAJA

En esta sección se presenta el análisis del flujo de fondos, un apartado fundamental en el estudio económico, ya que permite evaluar la viabilidad y rentabilidad del proyecto. Aquí se desarrollan dos flujos en paralelo: el flujo de fondos del proyecto y el flujo de fondos del inversionista. El flujo de fondos se construye a partir de todas las secciones previas, integrando los costos, ingresos, inversiones y capital de trabajo.

En el flujo de fondos del proyecto, detallado en Tabla 7.26, el análisis muestra que el flujo de caja comienza a ser positivo ya en el segundo año, mientras que el flujo de caja acumulado alcanza valores positivos en el quinto año. Esto es altamente alentador, ya que todo el estudio económico se realizó con un enfoque conservador, castigando lo más posible al proyecto y considerando los peores escenarios.

Por otro lado, en el flujo de fondos del inversionista, se observa que el flujo de caja se torna positivo en el tercer período, mientras que el flujo de caja acumulado es positivo en el cuarto período. Este resultado también es sumamente positivo, ya que indica que la inversión recupera su rentabilidad en un plazo relativamente corto, considerando las condiciones conservadoras aplicadas en el análisis. Esto se aprecia en Tabla 7.27.



Flujo de Fondo del Proyecto						
Concepto	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$ 1.488.192.000	\$ 1.785.830.400	\$ 2.142.996.480	\$ 2.571.595.776	\$ 3.085.914.931
Costos de fabricación indirectos		-\$ 1.544.280.000	-\$ 1.698.708.000	-\$ 1.868.578.800	-\$ 2.055.436.680	-\$ 2.260.980.348
Costos de fabricación directos		-\$ 66.676.880	-\$ 73.344.568	-\$ 80.679.025	-\$ 88.746.927	-\$ 97.621.620
Depreciación y amortización		-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785
Utilidad antes de impuestos		-\$ 142.169.666	-\$ 5.626.954	\$ 174.333.870	\$ 408.007.383	\$ 707.908.178
Impuesto 35%		\$ 49.759.383	\$ 1.969.434	-\$ 61.016.854	-\$ 142.802.584	-\$ 247.767.862
Utilidad neta		-\$ 92.410.283	-\$ 3.657.520	\$ 113.317.015	\$ 265.204.799	\$ 460.140.315
Depreciación y amortización		\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785
Inversión inicial	-\$ 332.573.351					
Capital de trabajo	-\$ 261.238.433					
Recupero de capital de trabajo						
Valor de desecho						
Flujo de Fondo	-\$ 593.811.783	-\$ 73.005.497	\$ 15.747.266	\$ 132.721.801	\$ 284.609.585	\$ 479.545.101
Flujo Acumulado	-\$ 593.811.783	-\$ 666.817.281	-\$ 651.070.015	-\$ 518.348.214	-\$ 233.738.630	\$ 245.806.471

Flujo de Fondo del Proyecto					
Concepto	6	7	8	9	10
Ingresos	\$ 3.703.097.917	\$ 4.443.717.501	\$ 5.332.461.001	\$ 6.398.953.201	\$ 7.678.743.842
Costos de fabricación indirectos	-\$ 2.487.078.383	-\$ 2.735.786.221	-\$ 3.009.364.843	-\$ 3.310.301.328	-\$ 3.641.331.460
Costos de fabricación directos	-\$ 107.383.782	-\$ 118.122.160	-\$ 129.934.376	-\$ 142.927.814	-\$ 157.220.595
Depreciación y amortización	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785
Utilidad antes de impuestos	\$ 1.089.230.967	\$ 1.570.404.334	\$ 2.173.756.996	\$ 2.926.319.274	\$ 3.860.787.000
Impuesto 35%	-\$ 381.230.838	-\$ 549.641.517	-\$ 760.814.949	-\$ 1.024.211.746	-\$ 1.351.275.450
Utilidad neta	\$ 708.000.129	\$ 1.020.762.817	\$ 1.412.942.047	\$ 1.902.107.528	\$ 2.509.511.550
Depreciación y amortización	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785
Inversión inicial					
Capital de trabajo					
Recupero de capital de trabajo					\$ 261.238.433
Valor de desecho					\$ 138.525.496
Flujo de Fondo	\$ 727.404.914	\$ 1.040.167.603	\$ 1.432.346.833	\$ 1.921.512.314	\$ 2.928.680.265
Flujo Acumulado	\$ 973.211.385	\$ 2.013.378.988	\$ 3.445.725.821	\$ 5.367.238.134	\$ 8.295.918.399

Tabla 7.26: Flujo de Fondo del Proyecto



Flujo de Fondo del Inversionista						
Concepto	Período					
	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$ 1.488.192.000	\$ 1.785.830.400	\$ 2.142.996.480	\$ 2.571.595.776	\$ 3.085.914.931
Costos de fabricación indirectos		-\$ 1.544.280.000	-\$ 1.698.708.000	-\$ 1.868.578.800	-\$ 2.055.436.680	-\$ 2.260.980.348
Costos de fabricación directos		-\$ 66.676.880	-\$ 73.344.568	-\$ 80.679.025	-\$ 88.746.927	-\$ 97.621.620
Gastos de administración y ventas		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Interés del crédito		-\$ 12.805.010	-\$ 11.416.424	-\$ 9.901.825	-\$ 8.249.775	-\$ 6.447.802
Depreciación y amortización		-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785
Utilidad antes de impuestos		-\$ 154.974.675	-\$ 17.043.378	\$ 164.432.045	\$ 399.757.608	\$ 701.460.376
Impuesto 35%		\$ 54.241.136	\$ 5.965.182	-\$ 57.551.216	-\$ 139.915.163	-\$ 245.511.132
Utilidad neta		-\$ 100.733.539	-\$ 11.078.196	\$ 106.880.829	\$ 259.842.445	\$ 455.949.244
Depreciación y amortización		\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785
Inversión inicial	-\$ 166.286.675					
Capital de trabajo	-\$ 261.238.433					
Recupero de capital de trabajo						
Crédito	\$ 166.286.675					
Amortización del crédito		-\$ 15.301.219	-\$ 16.689.804	-\$ 18.204.404	-\$ 19.856.454	-\$ 21.658.427
Valor de desecho						
Flujo de Fondo	-\$ 261.238.433	-\$ 96.629.972	-\$ 8.363.214	\$ 108.081.211	\$ 259.390.777	\$ 453.695.603
Flujo Acumulado	-\$ 261.238.433	-\$ 357.868.405	-\$ 366.231.619	-\$ 258.150.408	\$ 1.240.369	\$ 454.935.972



Flujo de Fondo del Inversionista					
Concepto	Período				
	6	7	8	9	10
Ingresos	\$ 3.703.097.917	\$ 4.443.717.501	\$ 5.332.461.001	\$ 6.398.953.201	\$ 7.678.743.842
Costos de fabricación indirectos	-\$ 2.487.078.383	-\$ 2.735.786.221	-\$ 3.009.364.843	-\$ 3.310.301.328	-\$ 3.641.331.460
Costos de fabricación directos	-\$ 107.383.782	-\$ 118.122.160	-\$ 129.934.376	-\$ 142.927.814	-\$ 157.220.595
Gastos de administración y ventas	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Interés del crédito	-\$ 4.482.299	-\$ 2.338.428			
Depreciación y amortización	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785	-\$ 19.404.785
Utilidad antes de impuestos	\$ 1.084.748.668	\$ 1.568.065.906	\$ 2.173.756.996	\$ 2.926.319.274	\$ 3.860.787.000
Impuesto 35%	-\$ 379.662.034	-\$ 548.823.067	-\$ 760.814.949	-\$ 1.024.211.746	-\$ 1.351.275.450
Utilidad neta	\$ 705.086.634	\$ 1.019.242.839	\$ 1.412.942.047	\$ 1.902.107.528	\$ 2.509.511.550
Depreciación y amortización	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785	\$ 19.404.785
Inversión inicial					
Capital de trabajo					
Recupero de capital de trabajo					\$ 261.238.433
Crédito					
Amortización del crédito	-\$ 23.623.929	-\$ 25.767.801			
Valor de desecho					\$ 138.525.496
Flujo de Fondo	\$ 700.867.490	\$ 1.012.879.824	\$ 1.432.346.833	\$ 1.921.512.314	\$ 2.928.680.265
Flujo Acumulado	\$ 1.155.803.462	\$ 2.168.683.286	\$ 3.601.030.119	\$ 5.522.542.433	\$ 8.451.222.697

Tabla 7.27: Flujo de Fondo del Inversionista

Los resultados obtenidos para los indicadores económicos principales también refuerzan la viabilidad del proyecto. En el caso del flujo de fondos del proyecto, la Valor Actual Neto (VAN) es aproximadamente \$140.000.000 y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es del 42%. Por otro lado, en el flujo de fondos del inversionista, la VAN se aproxima a \$102.000.000 y la TIR es del 56%. Cabe recalcar, que los indicadores fueron calculados a partir de los valores actualizados a diciembre de 2024, haciendo referencia al riesgo país, tasa de interés de plazo fijo, tasa BICE crédito, etc.

La VAN representa el valor actualizado de los flujos de caja futuros generados por el proyecto, descontados a una tasa determinada, y permite evaluar si el proyecto genera valor adicional por encima de los costos de inversión. En este caso, los valores positivos y elevados de la VAN para ambos flujos indican que el proyecto es altamente rentable y genera un valor significativo.

Por su parte, la TIR refleja la rentabilidad porcentual del proyecto, mostrando la tasa máxima que puede soportar la inversión sin generar pérdidas. Una TIR del 44% en el flujo de fondos del proyecto y del 56% en el flujo del inversionista son indicadores muy favorables, ya que superan ampliamente las tasas de descuento utilizadas en el análisis y las tasas de retorno promedio del mercado.

Estos resultados son fundamentales para justificar la implementación del proyecto, ya que demuestran su rentabilidad económica y financiera, incluso bajo escenarios conservadores y castigados. Los resultados explicados anteriormente, se detallan en Tabla 7.28 y Tabla 7.29.

Flujo del Proyecto	
Riesgo País	630
Equivale	0,06
Tasa de interés plazo fijo Banco Nación	0,315
TMAR	37,8%
VAN	\$ 140.195.638
TIR	42%

Tabla 7.28: VAN y TIR del FF del Proyecto

Flujo del Inversionista	
Tasa BICE crédito	0,61
Parte Inversor	0,50
TMAR	0,38
Parte propia	0,50
Tasa Corte Capital	49%
VAN	\$ 102.157.123
TIR	56%

Tabla 7.29: VAN y TIR del FF del Inversionista

7.10 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es una herramienta fundamental en la evaluación financiera de proyectos, ya que permite medir cómo variaciones en variables clave impactan en los resultados económicos y financieros. Este análisis es crucial para identificar posibles riesgos, evaluar la solidez del proyecto ante cambios en condiciones de mercado y tomar decisiones informadas que garanticen su viabilidad. Al analizar escenarios alternativos, se pueden anticipar ajustes estratégicos necesarios para mitigar los efectos de factores externos o internos adversos, fortaleciendo así la planificación y ejecución del proyecto.

En este apartado se llevará a cabo un análisis de sensibilidad enfocado en dos aspectos clave: el flujo de fondo del inversionista y el flujo de fondo del proyecto. Ambos representan indicadores críticos para determinar la rentabilidad y sostenibilidad financiera. El análisis se desarrollará bajo dos enfoques diferenciados: primero, manteniendo constante el costo de la materia prima y evaluando el impacto de las variaciones en el precio del diésel, que es el principal producto del proyecto y el que genera ahorros significativos para la empresa; y segundo, invirtiendo el enfoque, es decir, manteniendo constante el precio del diésel mientras se analiza el efecto de las fluctuaciones en el costo de la materia prima.

Este doble análisis permite entender de manera integral cómo las dinámicas de mercado, tanto del lado de los costos como de los ingresos, afectan el desempeño económico del proyecto. Además, en las tablas correspondientes, se presentarán de manera detallada los resultados de estos análisis, proporcionando una visualización clara y precisa que facilite la interpretación de los escenarios estudiados. Esto es esencial para fortalecer la toma de decisiones estratégicas y asegurar la sostenibilidad del proyecto ante posibles variaciones en su entorno operativo.

7.10.1 Flujo de Fondo del Proyecto

7.10.1.1 Variación del precio del diésel

El análisis de sensibilidad del flujo de fondo del proyecto, basado en la variación del precio unitario del diésel mientras se mantiene constante el costo del polietileno (\$700 por unidad), muestra que el Valor Actual Neto (VAN) es altamente sensible al precio del diésel, que representa la principal fuente de ingresos. A precios altos, como \$2.795, el VAN alcanza niveles elevados, garantizando una alta rentabilidad, mientras que, a precios bajos, como \$1.123, el proyecto genera pérdidas significativas, evidenciando su dependencia de esta variable. El punto crítico se encuentra cerca de \$1.348, donde el VAN es marginalmente positivo, marcando el umbral mínimo de viabilidad económica. Esto subraya la importancia de monitorear el mercado del diésel y considerar estrategias de mitigación ante posibles caídas de precio, como diversificación de ingresos o mejora en la eficiencia operativa, para asegurar la sostenibilidad financiera del proyecto. Esto se puede observar en la Tabla 7.30 y la Ilustración 7.2 que se detallan a continuación.

Precio Unitario del Diésel	VAN del Inversionista
\$ 2.795	\$ 3.236.954.678
\$ 2.329	\$ 2.225.726.760
\$ 1.941	\$ 1.387.728.464
\$ 1.618	\$ 686.148.496
\$ 1.348	\$ 102.157.123
\$ 1.123	\$ -385.709.790
\$ 936	\$ -790.634.031

Tabla 7.30: Sensibilidad variando precio del diésel

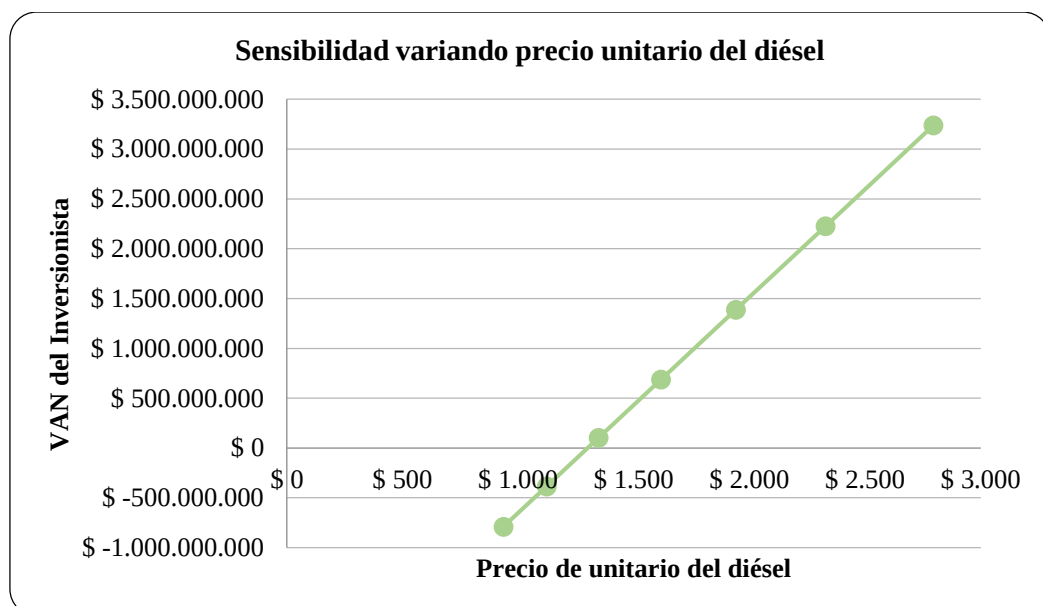


Ilustración 7.2: Sensibilidad variando precio del diésel

7.10.1.2 Variación del precio del plástico

El análisis de sensibilidad del flujo de fondo del proyecto revela que el VAN es significativamente impactado por el precio unitario del polietileno, principal insumo del proceso. A precios elevados, como \$1.452, el proyecto presenta un VAN negativo considerable, indicando una pérdida importante, mientras que, a precios bajos, como \$486, el VAN alcanza valores positivos significativos, evidenciando la rentabilidad potencial. El umbral de viabilidad se encuentra en \$728,22, donde el VAN es igual a cero. Esto demuestra la importancia de asegurar un suministro estable y a bajo costo del polietileno, ya sea mediante contratos de largo plazo, negociación con proveedores o estrategias de reducción de costos, para mantener la viabilidad económica del proyecto.

Cabe destacar que, en la sección correspondiente al análisis del flujo de fondo del inversionista, se presentará una argumentación más detallada sobre por qué no es necesariamente negativo que el umbral de viabilidad del polietileno esté tan cerca del precio utilizado en los cálculos. Esto se refleja claramente en la Tabla 7.31 y la Ilustración 7.3 presentadas a continuación.

Precio Unitario del Plástico	VAN del Inversionista
\$ 1.452	\$ -2.621.066.187
\$ 1.210	\$ -1.744.921.693
\$ 1.008	\$ -1.013.594.471
\$ 840	\$ -405.361.929
\$ 700	\$ 102.157.123
\$ 583	\$ 525.089.042
\$ 486	\$ 876.270.926

Tabla 7.31: Sensibilidad variando precio del plástico

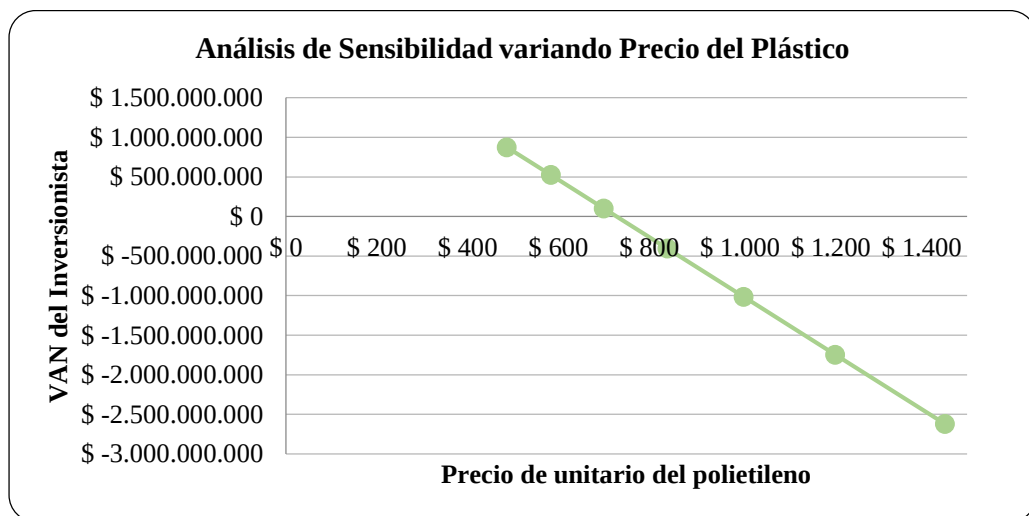


Ilustración 7.3: Sensibilidad variando precio del plástico

7.10.2 Flujo de Fondo del Inversionista

7.10.2.1 Variación del precio del diésel

El análisis del flujo de fondo del inversionista, en el que se varía el precio del diésel y se mantiene constante el precio del polietileno en \$700, muestra una clara relación entre la variación del precio del diésel y el Valor Actual Neto (VAN) del inversionista. A medida que el precio del diésel disminuye, el VAN también presenta una caída significativa, pasando de un valor positivo cuando el precio del diésel es de \$2.795 a un VAN negativo cuando el precio del diésel se reduce a \$936. Esto refleja la importancia del precio del diésel en la rentabilidad del proyecto, dado que un costo mayor de este insumo genera mayores ahorros, lo que se traduce en un mayor retorno para el inversionista. Sin embargo, con precios más bajos del diésel, los ahorros se ven reducidos, lo que provoca una disminución del VAN. Esta relación es crítica para evaluar la viabilidad financiera del proyecto bajo diferentes escenarios del mercado de combustibles. Esto se refleja claramente en la Tabla 7.32 y la Ilustración 7.4 que se presentan a continuación, las cuales ilustran de manera visual cómo los cambios en el precio del diésel impactan en el VAN del inversionista.

Precio Unitario del Diésel	VAN del Proyecto
\$ 2.795	\$ 4.557.359.298
\$ 2.329	\$ 3.148.561.139
\$ 1.941	\$ 1.981.098.853
\$ 1.618	\$ 1.003.688.568
\$ 1.348	\$ 140.195.638
\$ 1.123	\$ -489.577.147
\$ 936	\$ -1.053.699.750

Tabla 7.32: Sensibilidad variando precio del diésel

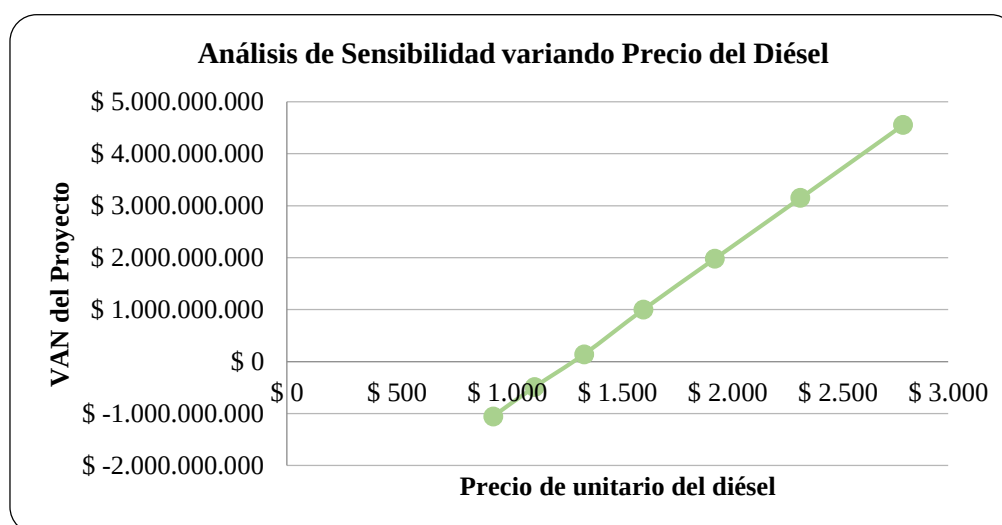


Ilustración 7.4: Sensibilidad variando precio del diésel

7.10.2.2 Variando precio del plástico

Como se puede apreciar en la Tabla 7.33 y la Ilustración 7.5, el análisis del flujo de fondo del inversionista, donde se mantiene constante el precio del diésel en \$1.348 y se modifica el precio unitario del polietileno, muestra una tendencia positiva a medida que disminuye el precio del polietileno. Al iniciar con un precio unitario de \$1.452, el VAN del inversionista es negativo. Sin embargo, a medida que el precio del polietileno disminuye, el VAN se va acercando a valores positivos, cuando el precio de la materia prima es de \$700.

El umbral de viabilidad para el inversionista se encuentra en \$729,83, donde el VAN es igual a cero. Es importante destacar que este valor es bastante cercano al umbral identificado en la sección de flujo de fondo del proyecto (\$728,22). Sin embargo, esto no es necesariamente negativo. Este criterio fue establecido con el objetivo de evaluar la solidez financiera del proyecto bajo un escenario conservador, castigando intencionalmente el análisis. En una situación real, al implementar el proyecto, se podrían conseguir mejores precios mediante la negociación con proveedores, contratos de suministro a largo plazo o estrategias de optimización en la compra de materias primas.

Además, resulta alentador observar que, incluso con un precio de polietileno de \$700, tanto el VAN como la TIR siguen siendo sumamente positivos. Esto evidencia que, aun considerando un precio cercano al máximo crítico, la rentabilidad del proyecto sigue siendo sólida y sostenible. Estos resultados refuerzan la viabilidad del modelo de negocio y su capacidad de generar beneficios incluso en escenarios menos favorables.

Precio Unitario del plástico	VAN del Proyecto
\$ 1.452	\$ -3.344.049.459
\$ 1.210	\$ -2.207.026.150
\$ 1.008	\$ -1.257.940.579
\$ 840	\$ -468.602.083
\$ 700	\$ 140.195.638
\$ 583	\$ 738.897.877
\$ 486	\$ 876.270.926

Tabla 7.33: Sensibilidad variando precio del plástico

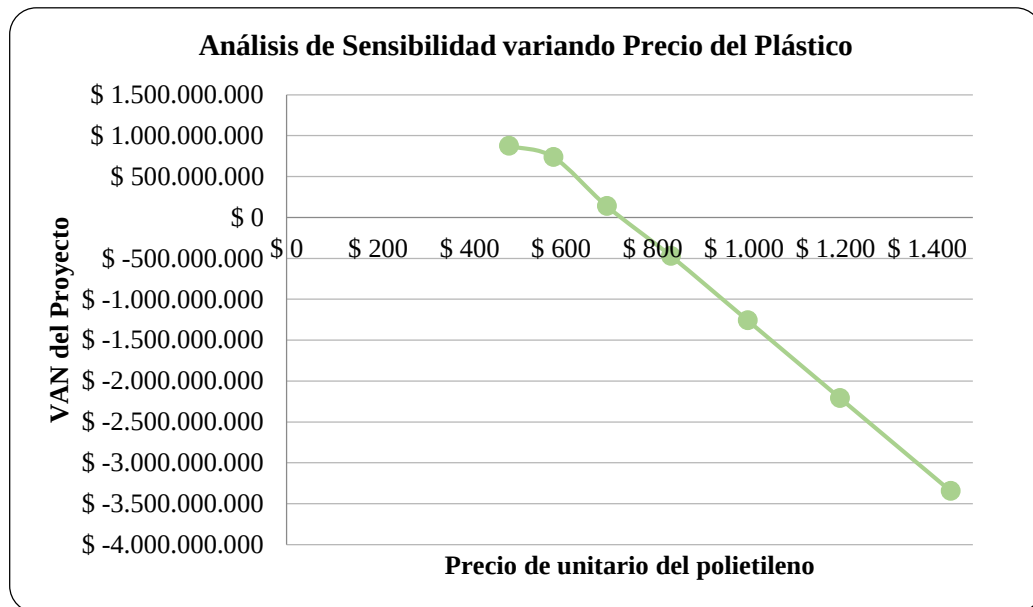


Ilustración 7.5: Sensibilidad variando precio del plástico

7.11 CONCLUSIÓN

El análisis económico desarrollado en este capítulo permitió evaluar la viabilidad financiera del proyecto y comprender cómo las principales variables, como el precio del diésel y el costo del polietileno, afectan la rentabilidad del emprendimiento. A través del análisis de sensibilidad, se consideran que el Valor Actual Neto (VAN) es altamente sensible a las fluctuaciones de estas variables, lo que destaca tanto las oportunidades como los desafíos asociados con la implementación del proyecto.

En primer lugar, se evidencia que el precio del diésel es el factor más influyente en la rentabilidad. A precios altos, como \$2.795 por unidad, el proyecto presenta un VAN elevado, lo que garantiza una alta rentabilidad y un retorno atractivo para los inversionistas. Sin embargo, a precios bajos, como \$1.123, el VAN se torna negativo, reflejando pérdidas significativas. El umbral de viabilidad se encuentra cerca de \$1.348, precio actual del diésel, donde la VAN es positiva. Este hallazgo subraya la importancia de mantener un monitoreo constante del mercado de combustibles.

Por otro lado, el análisis del costo del polietileno, materia principal prima del proceso, reveló una relación igualmente crítica con la rentabilidad del proyecto. A precios elevados, como \$1.452 por unidad, el proyecto muestra un VAN negativo considerable, mientras que, a precios bajos, como \$486, el VAN alcanza valores positivos significativos. El umbral de viabilidad para el polietileno se encuentra en \$700, costo actual del mismo, donde el VAN es positivo. Esto resalta la importancia de asegurar un suministro estable y bajo costo de la materia

prima mediante la negociación de contratos a largo plazo, la búsqueda de proveedores confiables o la implementación de estrategias para optimizar el uso de recursos.

El análisis del flujo de fondo del inversionista refuerza estas conclusiones. Cuando el precio del diésel disminuye, el retorno para el inversionista también se ve severamente afectado, pasando de valores positivos a negativos. Asimismo, la reducción del costo del polietileno mejora de manera significativa el VAN del inversionista, lo que indica que la viabilidad financiera del proyecto depende de un equilibrio entre costos de insumos y precios de venta del producto final.

Un aspecto crucial que añade valor al proyecto, pero que no fue incluido en este análisis económico, es la obtención de ingresos adicionales a partir de subproductos y beneficios ambientales. Por un lado, aunque los ingresos contemplados en el estudio provienen exclusivamente de las fracciones diésel obtenidas, el proceso también genera una proporción significativa de gasolina, un combustible de alto valor comercial, que podría representar una importante fuente de ingresos adicionales si se incorpora en análisis futuros. Por otro lado, el proyecto tiene un enorme potencial para beneficiarse de los bonos de carbono. Estos bonos, otorgados a empresas que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, permiten su comercialización en mercados internacionales. El proceso de pirólisis contribuye a la gestión sostenible de residuos plásticos y a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, cumpliendo con los requisitos esenciales para acceder a estos beneficios. Aunque actualmente no se incluyeron en el análisis debido a la falta de definiciones claras en la legislación vigente, en el futuro podrían representar una ventaja económica y ambiental significativa.

En resumen, el proyecto presenta un considerable potencial de rentabilidad bajo las condiciones actuales del mercado, pero también enfrenta riesgos asociados a la volatilidad de los precios del polietileno y del diésel. A pesar de esto, la posibilidad de ingresos adicionales por subproductos, como la gasolina, y los beneficios futuros de los bonos de carbono fortalecen su viabilidad a largo plazo. Aunque el enfoque conservador adoptado en este estudio permite prever escenarios pesimistas, es fundamental implementar estrategias que mitiguen estos riesgos, como la optimización de medidas de costos y la adaptación a cambios en el entorno operativo. Con una planificación adecuada y un monitoreo constante de las dinámicas de mercado, el proyecto tiene el potencial de consolidarse como una alternativa rentable, sostenible y atractiva para los inversionistas.

8 CONCLUSIÓN FINAL

8.1 ANÁLISIS FODA

El análisis FODA del proyecto de producción de diésel a partir de plásticos reciclados mediante pirólisis permite evaluar de forma integral tanto los factores internos como las variables externas que inciden en la viabilidad, sustentabilidad y proyección del sistema propuesto.

Análisis FODA	
Fortaleza	Oportunidades
- Alta disponibilidad local de materia prima (174 t/mes de HDPE y LDPE) a un costo competitivo. - Autonomía energética para industrias, reduciendo la dependencia de proveedores externos de combustible. - Ahorro económico significativo frente al uso de diésel convencional a largo plazo. - Viabilidad técnica confirmada con tecnologías disponibles y adaptadas al contexto industrial local. - Cumplimiento legal y ambiental garantizado, con análisis normativo integral ya realizado. - Integración posible con infraestructuras industriales ya existentes, reduciendo inversión inicial.	- Tendencia global creciente hacia la economía circular, la sostenibilidad y la transición energética. - Acceso potencial a subsidios, líneas de financiamiento y programas de fomento para tecnologías limpias. - Posibilidad de generar ingresos adicionales mediante la comercialización de bonos de carbono por reducción de emisiones de GEI. - Replicabilidad del modelo en otras industrias o regiones con características similares. - Fortalecimiento de la imagen corporativa ante clientes, inversores y comunidad por prácticas sostenibles. - Posicionamiento estratégico en sectores con alta demanda energética o dificultades de acceso a combustibles tradicionales.
Debilidades	Amenazas
- Elevada inversión inicial requerida para la adquisición de equipos e instalación. - Necesidad de personal técnico capacitado y especializado para operar y mantener el sistema. - Dependencia del correcto funcionamiento del sistema de pirólisis para asegurar la calidad del producto. - Requiere controles de calidad constantes para asegurar que el diésel obtenido cumpla con normas vigentes. - Complejidad técnica del proceso puede generar tiempos de aprendizaje y ajuste más prolongados.	- Posibles cambios en la normativa ambiental o energética que impacten sobre el proceso o sus costos. - Aumento del precio del plástico reciclado o escasez del insumo debido a cambios en el mercado o en políticas de reciclaje. - Avances tecnológicos disruptivos que puedan volver obsoleto el sistema actual si no se actualiza con innovación continua. - Competencia con nuevas fuentes de energía renovable emergentes, como el hidrógeno verde o la electrificación en sectores clave. - Factores macroeconómicos (inflación, devaluación) que afecten los costos operativos o la rentabilidad del proyecto.

Tabla 8.1: Análisis FODA

8.1.1 Fortalezas

El proyecto presenta una base sólida sustentada en la alta disponibilidad local de materia prima, con 174 toneladas mensuales de HDPE y LDPE obtenibles a un costo competitivo, lo

cual asegura la estabilidad operativa sin depender de cadenas de suministro complejas. Esta condición logística representa una ventaja estratégica para garantizar la continuidad de la producción. A su vez, la autonomía energética que ofrece el modelo fortalece la competitividad de las industrias locales, al reducir su dependencia de terceros proveedores de combustible y al disminuir la exposición a la volatilidad del mercado de hidrocarburos.

Desde el punto de vista técnico, se ha verificado la factibilidad del proceso de pirólisis, empleando equipos disponibles en el mercado adaptados al contexto industrial local, priorizando la eficiencia energética, la seguridad operativa y la escalabilidad. Además, el proyecto se inserta dentro de un marco legal y ambiental sólido, con cumplimiento normativo garantizado, lo que reduce riesgos regulatorios y refuerza la legitimidad de su implementación. La posibilidad de incorporar la planta en estructuras industriales preexistentes añade una ventaja adicional al reducir inversiones en infraestructura y acelerar los plazos de ejecución.

8.1.2 Oportunidades

El contexto actual tanto a nivel nacional como internacional es sumamente favorable para iniciativas de economía circular y transición energética. Existen políticas públicas, subsidios e incentivos fiscales que buscan impulsar proyectos sostenibles y tecnologías limpias, lo cual podría traducirse en apoyo institucional y financiero. Además, el proyecto podría acceder al mercado de bonos de carbono, generando un ingreso adicional por la reducción certificada de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta posibilidad no solo mejora el retorno económico, sino que también fortalece la reputación ambiental del proyecto.

Asimismo, el modelo es altamente replicable en industrias con consumo intensivo de diésel, lo que habilita su expansión a otros sectores o regiones del país. La mejora en la imagen institucional de las empresas que adopten esta tecnología también es una ventaja competitiva creciente, especialmente en mercados que valoran el compromiso ambiental. Por último, el posicionamiento en sectores con restricciones energéticas o con alta demanda de combustibles líquidos puede otorgar una posición estratégica relevante a las empresas pioneras en adoptar este tipo de soluciones.

8.1.3 Debilidades

Uno de los principales desafíos internos radica en la alta inversión inicial requerida para la adquisición de equipos e instalación del sistema de pirólisis, lo cual podría limitar su adopción por parte de empresas pequeñas o con escasa capacidad de financiamiento. Además,

se requiere personal capacitado técnicamente para operar los sistemas de forma segura y eficiente, lo que implica una inversión adicional en formación y adaptación.

Otra debilidad está vinculada a la necesidad de mantener estándares de calidad constantes en el diésel obtenido. Esto demanda un sistema de control riguroso para asegurar que el producto final cumpla con las normativas vigentes y que la operación se mantenga estable en el tiempo. Asimismo, la complejidad técnica del proceso implica tiempos de ajuste y aprendizaje, especialmente en la etapa de implementación, lo que puede generar ineficiencias iniciales.

8.1.4 Amenazas

Entre las amenazas externas más relevantes se encuentran los cambios regulatorios inesperados en materia ambiental o energética que puedan afectar las condiciones de operación, los requisitos legales o la rentabilidad del proyecto. También existe el riesgo de una variación significativa en el precio o la disponibilidad del plástico reciclado, lo que podría generar tensiones en la cadena de abastecimiento.

Desde el punto de vista tecnológico, los avances disruptivos en energías limpias, como el hidrógeno verde o la electrificación masiva del transporte, podrían desplazar este tipo de soluciones si no se acompañan con una estrategia de innovación constante. Finalmente, el contexto macroeconómico inestable, caracterizado por inflación, variación del tipo de cambio o dificultades de acceso al crédito, puede incidir negativamente en los costos operativos y en la previsibilidad financiera del proyecto.

8.2 CONCLUSIÓN FINAL

El desarrollo integral del presente proyecto ha permitido establecer, de forma sólida, fundamentada y multidimensional, la viabilidad técnica, económica, legal y ambiental de implementar un sistema de producción de diésel a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis en estructuras industriales existentes dentro de la provincia de Salta. Lejos de limitarse a una propuesta conceptual, el estudio ha sido concebido como un instrumento práctico de análisis y planificación estratégica, orientado a determinar si esta tecnología puede constituirse efectivamente en una alternativa energética eficiente, rentable y sustentable para el sector industrial regional.

Desde una perspectiva económica y de mercado, se ha evidenciado una demanda creciente y sostenida de combustibles (especialmente diésel) tanto a nivel nacional como

provincial. Esta necesidad estructural se ve agravada por la volatilidad de precios de los combustibles fósiles convencionales, derivados de factores internacionales y políticos que escapan al control de los actores locales. En este contexto, el modelo propuesto de autoabastecimiento energético, mediante la valorización de residuos plásticos, permite a las empresas reducir su dependencia de proveedores externos, optimizar sus costos operativos y garantizar la continuidad y autonomía de sus procesos productivos. La disponibilidad confirmada de materia prima local, cuantificada en 174 toneladas mensuales de HDPE y LDPE, a un valor accesible de \$700 por tonelada, fortalece la propuesta, no solo desde el punto de vista de la rentabilidad, sino también de la eficiencia logística, al reducir las necesidades de transporte y almacenamiento de insumos.

En cuanto al análisis técnico, se ha diseñado un sistema que opera bajo un régimen de tres ciclos batch diarios, lo que permite alcanzar una producción promedio de 5 m³ de diésel por día, alcanzando un volumen anual estimado de 1.200 m³, suficiente para abastecer parcialmente o totalmente la demanda interna de muchas pymes industriales locales. Se ha realizado una selección detallada de los equipos y tecnologías necesarias, teniendo en cuenta la eficiencia energética, la compatibilidad con la infraestructura existente, la escalabilidad del sistema a futuro y la seguridad operativa. Además, se contemplan instalaciones auxiliares como sistemas de enfriamiento, filtrado de gases, almacenamiento seguro de productos obtenidos y control de emisiones. Todo esto demuestra la factibilidad operativa del proyecto en condiciones reales y adaptadas al contexto industrial de la región.

Desde el punto de vista ambiental, este proyecto se inscribe en el marco conceptual de la economía circular, al proponer la transformación de un residuo altamente contaminante (el plástico, especialmente polietileno de alta y baja densidad) en una fuente energética útil y de alto valor agregado. Este proceso no solo reduce significativamente la cantidad de residuos plásticos destinados a rellenos sanitarios o vertederos, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la combustión directa de combustibles fósiles tradicionales. Se han identificado posibles impactos ambientales negativos (como emisiones gaseosas o generación de residuos sólidos secundarios) y se han propuesto medidas concretas de mitigación, incluyendo sistemas de post-tratamiento de gases, encapsulamiento de residuos, monitoreo ambiental continuo y gestión segura de subproductos. Estas acciones aseguran no solo el cumplimiento normativo, sino también una gestión ambiental responsable y proactiva.

En cuanto al marco legal y normativo, se ha corroborado que el proyecto puede implementarse respetando íntegramente la legislación nacional y provincial vigente, incluyendo normativas sobre seguridad e higiene industrial, salud ocupacional, gestión integral de residuos peligrosos y condiciones operativas de instalaciones industriales. Se han identificado y analizado los requerimientos específicos de habilitación ambiental, autorizaciones de operación, seguros, capacitaciones obligatorias y licencias técnicas, proponiendo un plan de cumplimiento normativo que garantiza un entorno de trabajo seguro, eficiente y respetuoso del entorno y las comunidades aledañas. La anticipación en este aspecto fortalece la viabilidad legal del proyecto y minimiza riesgos de paralización o sanciones en el futuro.

A nivel estratégico, el modelo planteado se presenta como una solución transformadora y replicable, ideal para ser incorporada a estructuras industriales preexistentes, lo que permite reducir significativamente la inversión inicial en infraestructura, aprovechar recursos instalados y acelerar los plazos de implementación. Esta adaptabilidad constituye una ventaja competitiva en contextos donde el acceso al financiamiento puede ser limitado o donde el tiempo de retorno del capital invertido es un factor crítico para la toma de decisiones.

Por otra parte, el proyecto responde directamente a las tendencias globales y nacionales en materia de transición energética, reducción del uso de plásticos de un solo uso, desarrollo de tecnologías limpias e implementación de sistemas industriales resilientes y autosuficientes. Así, su implementación puede contribuir también a mejorar la imagen institucional de las empresas participantes, acceder a beneficios fiscales o incentivos gubernamentales para proyectos verdes, y responder a las exigencias crecientes de los consumidores y mercados respecto a la responsabilidad ambiental corporativa.

Finalmente, puede afirmarse que el presente proyecto no solo es técnicamente viable y ambientalmente sustentable, sino que además es económicamente rentable, legalmente factible y estratégicamente oportuno. La posibilidad de replicarlo en otras regiones del país con características similares aumenta su impacto potencial y su valor como modelo de desarrollo productivo sostenible. En definitiva, se trata de una propuesta que combina innovación tecnológica, responsabilidad ambiental, eficiencia operativa y visión estratégica, consolidándose como una herramienta concreta al servicio del desarrollo industrial sustentable y autosuficiente de la provincia de Salta.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Akkouche, N., Balistrrou, M., & Loubar, K. (2017). Heating rate effects on pyrolytic vapors from scrap truck tires. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 123, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.10.005>
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984.
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Autoridad Reguladora Nuclear (ARN). (2024). Normas sobre seguridad y control de emisiones industriales. Recuperado de www.arn.gob.ar
- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principios de Finanzas Corporativas* (13ª ed.). McGraw-Hill.
- Brydson, J. A. (1999). *Plastics materials* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Cámara Argentina de la Construcción. (2023). Residuos sólidos urbanos (RSU): Informe. <https://www.camarco.org.ar/wp-content/uploads/2023/07/07-RSU.pdf>
- CEAMSE. (2015). Estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos (ECRSU). FIUBA. <https://www.ceamse.gov.ar/wp-content/uploads/2017/05/I.Final-ECRSU-CABA-FIUBA-2015-NOV-16.pdf>
- Chatfield, C. (2000). *El análisis de series temporales: una introducción* (6ª ed.). Chapman & Hall/CRC.
- Cheung, K.-Y., Lee, K.-L., & Lam, K.-L. (2011). Integrated kinetics and heat flow modelling to optimise waste tyre pyrolysis at different heating rates. *Fuel Processing Technology*, 92(5), 1035–1040. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.028>
- Combustibles Ítalo Argentino SA. (s. f.). Wico Combustibles - Ítalo Argentino SA. <https://www.wico.com.ar/>
- Congreso de la Nación Argentina. (1960). Decreto N.º 10877/1960, Reglamentación de la Ley N.º 13.660. <https://www.boletinoficial.gob.ar>

Congreso de la Nación Argentina. (1972). Ley N.º 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo. <https://www.argentina.gob.ar>

Congreso de la Nación Argentina. (1991). Ley N.º 24.051 de Residuos Peligrosos. <https://www.argentina.gob.ar>

Congreso de la Nación Argentina. (1995). Ley N.º 24.557 de Riesgos del Trabajo. <https://www.argentina.gob.ar>

Congreso de la Nación Argentina. (2002). Ley N.º 25.675, Ley General del Ambiente. <https://www.argentina.gob.ar>

Damodaran, A. (2012). Valoración de inversiones: Herramientas y técnicas para determinar el valor de cualquier activo (3ª ed.). Wiley.

Demirbas, A. (2016). Combustibles fósiles: Usos, consumo y desarrollo. Springer.

Econorte Reciclado. (s. f.). Econorte-Gestión de residuos y reciclado. <https://econortereciclado.com.ar/>

Fakhrhoseini, S. M., & Dastanian, M. (2013). Predicting pyrolysis products of PE, PP, and PET using NRTL activity coefficient model. *Journal of Chemistry*, 2013, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2013/487676>

Fox Energía Pura. (s. f.). Fox Energía Pura. <https://www.foxenergiapura.com/>

Gitman, L. J., & Zutter, C. J. (2012). Principios de Administración Financiera (13ª ed.). Pearson Educación.

Gobierno de Argentina. (2009). Provincia de Salta. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/provincia_de_salta.pdf

Gobierno de Argentina. (2020). Residuos. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/residuos.pdf>

Gobierno de la Provincia de Salta. (2024). Decreto N.º 3.091/2000, Reglamento de la Evaluación de Impacto Ambiental. <https://www.salta.gob.ar>

Gobierno de la Provincia de Salta. (2024). Ley N.º 6.070, Código de Procedimientos Administrativos de la Provincia de Salta. <https://www.salta.gob.ar>

Gobierno de la Provincia de Salta. (2024). Ley N.º 6.177, Ley Provincial de Higiene y Seguridad Industrial. <https://www.salta.gob.ar>



Gobierno de la Provincia de Salta. (2024). Ley N.º 7.070, Régimen de Protección del Medio Ambiente. <https://www.salta.gob.ar>

IEA (International Energy Agency). (2019). World Energy Outlook 2019. IEA Publications.

InfoLEG. (2002). Ley 25.745: Regulación de la comercialización de combustibles líquidos y gas natural. <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/115000-119999/119840/texact.htm>

INTREC. (s. f.). INTREC-Ingeniería y tecnología en recuperación energética. <https://www.intrec.com.ar/>

Intedya. (s. f.). Organización Petit Plast SA Intedya. <https://www.intedya.com/internacional/1049/organizacion-petit-plast-sa.html>

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (2024). Regulaciones para habilitaciones industriales en Argentina. Recuperado de www.inti.gob.ar

Kumar, S. (2020). Plásticos y pirólisis: soluciones para la gestión de residuos. Springer.

Lah, B., Klinar, D., & Likozar, B. (2013). Pyrolysis of natural, butadiene, styrene–butadiene rubber and tyre components: Modelling kinetics and transport phenomena at different heating rates and formulations. *Chemical Engineering Science*, 87, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.10.003>

Martínez, J. R., & Gómez, P. A. (2019). Química Industrial: Procesos y Reactores. Editorial Científica.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. (2024). Guía para la gestión de residuos peligrosos en Argentina. Recuperado de www.ambiente.gob.ar

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. (2024). Normativa sobre emisiones de gases de efecto invernadero y calidad del aire en Argentina. Recuperado de www.ambiente.gob.ar

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. (2024). Regulaciones sobre plásticos y reciclaje en el contexto nacional. Recuperado de www.ambiente.gob.ar

Ministerio de Economía de la Nación Argentina. (2024). Refinación y comercialización de petróleo, gas y derivados - Tablas dinámicas. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/refinacion-y-comercializacion-de-petroleo-gas-y-derivados-tablas-dinamicas>

Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social de la Nación. (2024). Normativa sobre contratos y condiciones laborales en Argentina. Recuperado de www.trabajo.gob.ar

Miskolczi, N., Bartha, L., Deák, G., & Jóver, B. (2009). Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. *Polymer Degradation and Stability*, 94(2), 277–281. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.10.028>

Municipalidad de Salta. (2024). Requisitos para habilitaciones municipales en zonas industriales. Recuperado de www.municipalidadesalta.gob.ar

NAO Combustibles. (s. f.). NAO Combustibles - Energía en movimiento. <https://www.naocombustibles.com/>

Nueva Energía SA. (s. f.). Nueva Energía-Soluciones energéticas. <https://nuevaenergiasa.com.ar/>

Pampa Energía SA. (s. f.). Pampa Energía - Energía para el futuro. <https://www.pan-energy.com/>

Pan Energy. (s. f.). Pan Energy-Soluciones energéticas. <https://www.pan-energy.com/>

Pindyck, R. S., & Rubinfeld, D. L. (2017). *Microeconomía* (9ª ed.). Pearson.

Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). Bonos de carbono: Guía para proyectos sostenibles en América Latina. Recuperado de www.unep.org

Refinor. (s. f.). Refinor-Refinación y comercialización de petróleo. <https://www.refinor.com/>

Refipampa. (s. f.). Refipampa-Refinación de petróleo y productos derivados. <https://www.refipampa.com.ar/>

Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *Fossil Fuels. Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>

Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jaffe, J. (2019). *Finanzas Corporativas* (12ª ed.). McGraw-Hill.

Saltaplast. (s. f.). Saltaplast - Fábrica de envases plásticos. <https://saltaplast.com.ar/>

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Salta. (2024). Normas específicas sobre residuos y emisiones en la provincia de Salta. Recuperado de www.ambientesalta.gob.ar



Secretaría de Energía de la Nación Argentina. (2024). Conjunto de datos sobre consumo de combustibles líquidos en la Argentina. <http://datos.energia.gob.ar/dataset/1c181390-5045-475e-94dc-410429be4b17/archivo/f8dda0d5-2a9f-4d34-b79b-4e63de3995df>

Shell. (s. f.). Shell Argentina - Energía para la vida. <https://www.shell.com.ar/>

Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2021). Introducción a la termodinámica de la ingeniería química (9ª ed.). McGraw-Hill Education.

Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT). (2011). Resolución SRT N.º 299/2011. Normas sobre provisión y uso de Equipos de Protección Personal. <https://www.srt.gob.ar>

Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166.

Trafigura. (s. f.). Trafigura - Comercio y logística en el sector de las materias primas. <https://www.trafigura.com/>

YPF. (s. f.). YPF-Energía para el desarrollo. <https://www.ypf.com/>