

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica



TESIS

“Diseño y simulación de una planta de pirólisis para producir petróleo sintético a partir de residuos plásticos”

Para obtener el Título Profesional de

Ingeniero Petroquímico

Elaborado por

Juan Luis Timaná Lanfranco

 0009-0002-0565-9712

Asesor

M.Sc. Víctor Hugo Pretell Huamán

 0000-0002-3564-5381

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Timaná Lanfranco [1]
Referencia/Reference	[1] J. Timaná Lanfranco. Diseño y simulación de una planta de pirólisis para producir petróleo sintético a partir de residuos plásticos” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Timaná, 2024)
Referencia/Reference	Timaná, J. (2024). Diseño y simulación de una planta de pirólisis para producir petróleo sintético a partir de residuos plásticos. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A Dios por las bendiciones que me otorga cada día.

A mis padres, Miriam y Luis, por todo su cariño, amor y comprensión, por enseñarme la importancia del estudio y a crecer en valores, sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

A mis hermanas, Liliam, Claudia y Lucía, por creer siempre en mí, estoy muy agradecido por su apoyo y por los momentos divertidos en familia.

Agradecimientos

Al ingeniero Víctor Pretell, por su apoyo en los distintos proyectos desde que inicié mi carrera universitaria y por sus sugerencias y recomendaciones a lo largo de mis trabajos de investigación.

A mis compañeros de mi grupo de Diseño del último ciclo: Gustavo, Cintia, William y Junior, por sus acertados consejos a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Resumen

Se plantea la implementación de una planta comercial para la producción de petróleo sintético mediante la pirólisis de residuos plásticos no reciclables recolectados de centros de acopio de la ciudad de Lima y Callao, lo cual supone una valorización energética y ambiental, ya que acaba con un porcentaje de los problemas de contaminación generados por residuos plásticos y aliviaría la balanza comercial desfavorable de importación de crudo generado por la baja producción nacional de este último.

Se diseña el proceso de pirólisis térmico de los residuos plásticos simulando los procesos separación, pretratamiento, derretimiento, pirólisis, vaporización y condensación selectiva, donde se obtienen una corriente gaseosa que sirve como fuente de calor en el proceso, y corriente líquida de petróleo sintético, donde este último podría alivianar la demanda energética del Perú.

En tal sentido se estableció la caracterización de la materia prima aceptando mezclas de residuos plásticos municipales, incluyendo tres tipos de resinas plásticas: polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS). Asimismo, el trabajo desarrolla el análisis de factibilidad del proyecto, donde se realiza el estudio de mercado, organizacional, análisis de oferta y demanda del petróleo, estudio técnico para la instalación y localización de la planta, estudio de impacto ambiental considerando el aspecto social. Finalmente se desarrolla el análisis económico y de sensibilidad, calculando la inversión mediante los indicadores económicos para el análisis de la viabilidad del proyecto.

Palabras clave – Petróleo sintético, residuos plásticos, simulación, pirólisis, análisis tecno-económico

Abstract

The implementation of a commercial plant to produce synthetic petroleum through the pyrolysis of non-recyclable plastic waste collected from collection centers in the cities of Lima and Callao is proposed. This approach represents an energy and environmental valorization, as it addresses a portion of the pollution issues stemming from plastic waste and would mitigate the unfavorable trade balance caused by the importation of crude oil due to the limited domestic production of the latter.

The thermal pyrolysis process of plastic waste is designed, simulating sequential stages of separation, pretreatment, melting, pyrolysis, vaporization, and selective condensation. This sequence yields a gaseous stream utilized as a heat source within the process, alongside a liquid stream of synthetic petroleum. The latter has the potential to alleviate Peru's energy demand.

In this regard, the characterization of the feedstock was established, encompassing blends of municipal plastic waste, including three variety of plastic resins: polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS). Moreover, the study undertakes a project feasibility analysis, encompassing a market study, organizational assessment, analysis of petroleum supply and demand, technical assessment for plant installation and siting, environmental impact assessment with due consideration of social aspects. Finally, an economic and sensitivity analysis is conducted, calculating investment using economic indicators to evaluate project viability.

Keywords – Synthetic oil, plastic waste, simulation, pyrolysis, techno economic analysis.

Tabla de Contenido

	Pág.
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Descripción del problema de investigación	2
1.2.1. Problema general	6
1.2.2. Problema específico	6
1.3. Objetivos del estudio	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. Antecedentes investigativos	7
1.5. Hipótesis	9
1.5.1. Hipótesis general	9
1.5.2. Hipótesis específicas	9
1.6. Matriz de consistencia	10
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	12
2.1. Marco Teórico	12
2.1.1. Plásticos	12
2.1.2. Tipos de Resinas Plásticas	13
2.1.3. Contenido energético de los plásticos	16
2.1.4. Reciclaje de plásticos	17
2.1.5. Pirólisis	18
2.1.6. Descomposición térmica	21
2.1.7. Factores que afectan el proceso de pirólisis	22

2.1.8.	Productos de la pirólisis	33
2.1.9.	Calidad de los productos de la pirólisis	35
2.2.	Marco conceptual	36
Capítulo III: Desarrollo del trabajo de investigación.....		39
3.1.	Estudio de mercado.....	39
3.1.1.	Mercado objetivo	39
3.1.2.	Análisis de competidores.....	39
3.1.3.	Definición del producto	41
3.1.4.	Estudio de la demanda	41
3.1.5.	Estudio de la oferta.....	43
3.1.6.	Estudio del precio	47
3.2.	Materia prima.....	49
3.2.1.	Disponibilidad de la materia prima para el proyecto.....	49
3.2.2.	Importación de resinas plásticas en el Perú.....	51
3.2.3.	Caracterización de la materia prima	52
3.2.4.	Compatibilidad de la materia prima al proceso de pirólisis.....	53
3.3.	Estudio técnico	55
3.3.1.	Disponibilidad de tecnologías	55
3.3.2.	Selección de tecnología.....	55
3.3.3.	Definición del tamaño del proyecto	57
3.3.4.	Descripción del proceso tecnológico seleccionado	59
3.3.5.	Descripción de equipos	61
3.3.6.	Cinética de las reacciones.....	63
3.3.7.	Simulación del proceso de pirólisis	65
3.3.8.	Calidad del producto.....	70
3.3.9.	Control e instrumentación del proceso.....	72
3.3.10.	Balance de masa y energía.....	75
3.3.11.	Límite de baterías	77
3.4.	Localización de la planta.....	81

3.4.1.	Macro localización	81
3.4.2.	Micro localización	81
3.4.3.	Metodología.....	81
3.4.4.	Límite de atmósfera explosiva	84
3.5.	Evaluación del Impacto Ambiental	85
3.5.1.	Actividades por etapas en el proceso	85
3.5.2.	Factores Ambientales	85
3.5.3.	Aspecto social	88
3.5.4.	Aspecto normativo	89
Capítulo IV.	Análisis Económico	93
4.1.	Metodología.....	93
4.2.	Resultados.....	96
4.2.1.	Costos de inversión	96
4.2.2.	Costos de producción	97
4.2.3.	Depreciación.....	97
4.2.4.	Costos unitarios.....	98
4.2.5.	Precio de Venta	99
4.2.6.	Proyección de ventas	99
4.2.7.	Financiamiento del proyecto	100
4.2.8.	Flujo de caja económico y financiero	100
4.2.9.	Indicadores de evaluación	100
4.2.10.	Análisis de escalamiento.....	102
4.2.11.	Análisis de Sensibilidad.....	102
Conclusiones		105
Recomendaciones		107
Glosario		109
Referencias bibliográficas		110
Anexos.....		123

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Matriz de consistencia.....	11
Tabla 2: Poder Calorífico de plásticos no reciclables	17
Tabla 3: Catalizadores usados en pirólisis de plásticos	20
Tabla 4: Resinas plásticas y sus principales productos.....	22
Tabla 5: Factores de influencia el proceso de pirólisis	23
Tabla 6: Tipos de Pirólisis según el tiempo de residencia	26
Tabla 7: Tipo de reactor y características	28
Tabla 8: Principales características de los crudos importados y procedencia	39
Tabla 9: Propiedades del crudo WTI y Brent vs Crudo de Pirólisis.....	41
Tabla 10: Importación de petróleo en Miles de Barriles por día (MBLS).....	42
Tabla 11: Porcentaje de carga de petróleo importado en refinerías	43
Tabla 12: Composición de mezcla de polímeros de centro de reciclaje en España	52
Tabla 13: Compatibilidad de resinas de plásticos al proceso de pirólisis.....	54
Tabla 14: Ventajas y desventajas de las tecnologías de craqueo y gasificación analizadas en el estudio	56
Tabla 15: Tecnologías disponibles de pirólisis y características principales de las plantas de proceso.....	58
Tabla 16: Modelos cinéticos utilizados para la descomposición térmica de un solo plástico	64
Tabla 17: Propiedades físicas del producto líquido obtenido a partir de la pirólisis de plásticos.....	71
Tabla 18: Rendimientos de destilados de la fracción líquida de la pirólisis.....	71
Tabla 19: Balance de energía y requerimientos de caloríficos de equipos.....	77
Tabla 20: Rango de valoración para la ubicación de la planta	81
Tabla 21: Cuadro de escala de asignación de valores.....	82
Tabla 22: Descripción del terreno	83

Tabla 23: Matriz de Leopold de valorización de impactos ambientales identificados para el proceso.	87
Tabla 24: Identificación de agentes contaminantes y medidas de control	88
Tabla 25: Cálculo de costos directos, indirectos y utilidades	94
Tabla 26: Cálculo de costos variables y fijos.....	95
Tabla 27: Resumen de montos de inversión para el proyecto.	96
Tabla 28: Costos de Producción	97
Tabla 29: Elementos considerados en la depreciación del proyecto	98
Tabla 30: Costos unitarios de producción y costo unitario de venta	99
Tabla 31: Proyección de ventas	99
Tabla 32: Financiamiento del proyecto.....	100
Tabla 33: Flujo de caja financiero	101
Tabla 34: Evaluación de los indicadores de rentabilidad del proyecto.....	102
Tabla 35: Indicadores de evaluación de escalamiento del proyecto.....	102
Tabla 36: Análisis de sensibilidad en función al VAN	104

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Composición de residuos sólidos de Lima Metropolitana 2018.	2
Figura 2: Producción mundial de plástico (millones de toneladas).	3
Figura 3: Consumo de plástico per cápita (kg/hab).	4
Figura 4: Residuos de plásticos generados en Lima y Callao.	5
Figura 5: Esquema de las estructuras de los tipos de plástico.	13
Figura 6: Estructura molecular del polietileno.....	14
Figura 7: Estructura molecular del polipropileno	15
Figura 8: Estructura molecular del poliestireno	16
Figura 9: Diagrama de métodos de reciclaje por clase de los residuos plásticos	17
Figura 10: Energías de disociación para moléculas de carbono según ramificación	21
Figura 11: Influencia de la temperatura en la distribución del producto	24
Figura 12: Efecto de la presión en la degradación térmica del PE	27
Figura 13: Esquema de pirólisis utilizando un reactor tipo extrusor tradicional.....	29
Figura 14: Diagrama de un esquema de pirólisis utilizando reactor tubular.....	29
Figura 15: Reactor continuo de tanque agitado.....	30
Figura 16: Reactor de lecho fijo	31
Figura 17: Planta de pirólisis de lecho fluidizado.....	32
Figura 18: Planta de pirólisis de horno rotatorio	33
Figura 19: Diagrama de flujo de metodología de investigación	38
Figura 20: Abastecimiento de crudo por orígenes.....	40
Figura 21: Principales países de los cuales Perú importó crudo en 2019.....	44
Figura 22: Producción promedio de crudo en el Perú en MBPD (2012-2021).	45
Figura 23: Zonas de principal extracción de crudo en el territorio peruano	46
Figura 24: Comportamiento histórico de la oferta.....	47
Figura 25: Precios del petróleo WTI y Brent desde el año 2000.....	48

Figura 26: Diagrama de Pareto de la cantidad de residuos plásticos generados en Lima y Callao	49
Figura 27: Asociaciones de recicladores por departamentos	50
Figura 28: Empresas operadoras de residuos sólidos en la provincia de Lima	51
Figura 29: Importaciones de la industria de plástico por producto en el Perú.....	52
Figura 30: Diagrama de bloques de proceso de producción de crudo sintético.....	59
Figura 31: Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de residuos plásticos	62
Figura 32: Simulación del proceso pirólisis de residuo plásticos	66
Figura 33: Sección de Craqueo Térmico.....	68
Figura 34: Sección de tren de enfriamiento.....	68
Figura 35: Sección de separación de condensados	69
Figura 36: Sección de almacenamiento y descarga del producto.....	69
Figura 37: Circuito de enfriamiento del agua.....	70
Figura 38: Condiciones de la corriente de producto final.....	70
Figura 39: Diagrama del Assay del petróleo sintético.....	72
Figura 40: Balance de materia del proceso de pirólisis	76
Figura 41: Plano de distribución física de la planta.	80
Figura 42: Localización definitiva de la planta industrial de pirólisis.	83
Figura 43: Posible zona afectada ante una explosión de tanque de petróleo sintético	84
Figura 44: Análisis de sensibilidad para el VAN	103

Introducción

En el contexto de una creciente conciencia ambiental y la necesidad de discutir la problemática del manejo de residuos sólidos y la transición hacia fuentes de energía sostenibles, la investigación relacionada con la transformación de residuos plásticos en petróleo sintético a través de procesos de pirólisis se ha vuelto de gran relevancia. Esta convergencia de la ingeniería química y la sostenibilidad promete abordar problemas clave, como la acumulación de residuos plásticos y la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles.

El aumento constante en la generación de residuos plásticos a nivel global ha generado una problemática ambiental significativa debido a su persistencia y al impacto negativo en los ecosistemas. La pirólisis se caracteriza por ser un proceso termoquímico que involucra la descomposición térmica de materiales orgánicos en condiciones de ausencia de oxígeno y ofrece una perspectiva prometedora al convertir estos residuos plásticos en petróleo sintético.

El proceso de pirólisis implica el calentamiento controlado de residuos plásticos a altas temperaturas, lo que conduce a la obtención de productos líquidos y gaseosos que pueden ser refinados para obtener petróleo sintético de alta calidad. Este producto puede servir como fuente de energía, materia prima para la industria química y como una alternativa más sostenible a los productos derivados del petróleo convencional.

El diseño de una planta de pirólisis eficiente y segura es esencial para maximizar el rendimiento y minimizar los impactos ambientales. Esto incluye la selección apropiada de equipos, la optimización de los parámetros de operación, la gestión eficiente de subproductos y la consideración de aspectos económicos y de sostenibilidad. La simulación de procesos desempeña un papel fundamental en la evaluación y mejora de la

planta, permitiendo la identificación de posibles problemas y la optimización de su funcionamiento antes de su implementación práctica.

Este proyecto se propone abordar el desafío de diseñar y simular una instalación de pirólisis para la transformación de residuos plásticos en petróleo sintético. A lo largo de esta investigación, se abordarán detalladamente las tecnologías y procesos asociados a la pirólisis, se analizarán exhaustivamente los factores económicos, ambientales, legales y sociales involucrados, y se llevará a cabo una simulación rigurosa de la planta propuesta. El objetivo principal es comprobar la factibilidad técnica y económica de esta solución innovadora para la gestión de residuos y la producción de energía sostenible.

Este estudio no solo representa un avance en la aplicación de la pirólisis como tecnología de vanguardia, sino que también contribuye de manera significativa a la mitigación de la contaminación plástica y a la transición hacia una economía más circular y sostenible. La conversión de residuos plásticos en petróleo sintético no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también cierra el ciclo de vida de los plásticos, transformándolos de un problema ambiental en una solución valiosa. A medida que avanzamos en esta investigación, exploraremos los desafíos técnicos y las oportunidades que esta tecnología presenta en nuestro camino hacia un futuro más limpio y sostenible.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1. Generalidades

A nivel mundial, la producción anual de plásticos se ha duplicado, pasando de 234 millones de toneladas (Mt) en 2000 a 460 Mt en 2019, la generación de residuos plásticos se ha duplicado, de 156 Mt en 2000 a 353 Mt en 2019 y solo el 9% de los residuos plásticos se recicló, mientras que el 19% se incineró y casi el 50% se destinó a rellenos sanitarios, el 22% restante se dispuso en botaderos no controlados, se quemó en pozos abiertos o se expulsó al medio ambiente (OECD, 2022).

Por otro lado, en las dos últimas décadas, el consumo global de productos derivados del crudo de petróleo se incrementó a ritmo de 1% anual (Enerdata, 2021). Según el reporte de energía del consorcio BP (BP Outlook, 2019), la demanda global de energía aumentará alrededor de un tercio para el año 2040 alcanzando valores de 715 mil PJ (IEA, 2021), en la cual los combustibles líquidos de origen de petróleo constituyen la tercera parte del consumo de energía global, siendo el petróleo un recurso no renovable, es por tal motivo que se desarrollan nuevas opciones sostenibles que permitan transformar los residuos plásticos mediante la degradación térmica para la producción de petróleo sintético como recurso sustitutivo para paliar la demanda de energía (Panda et al., 2010).

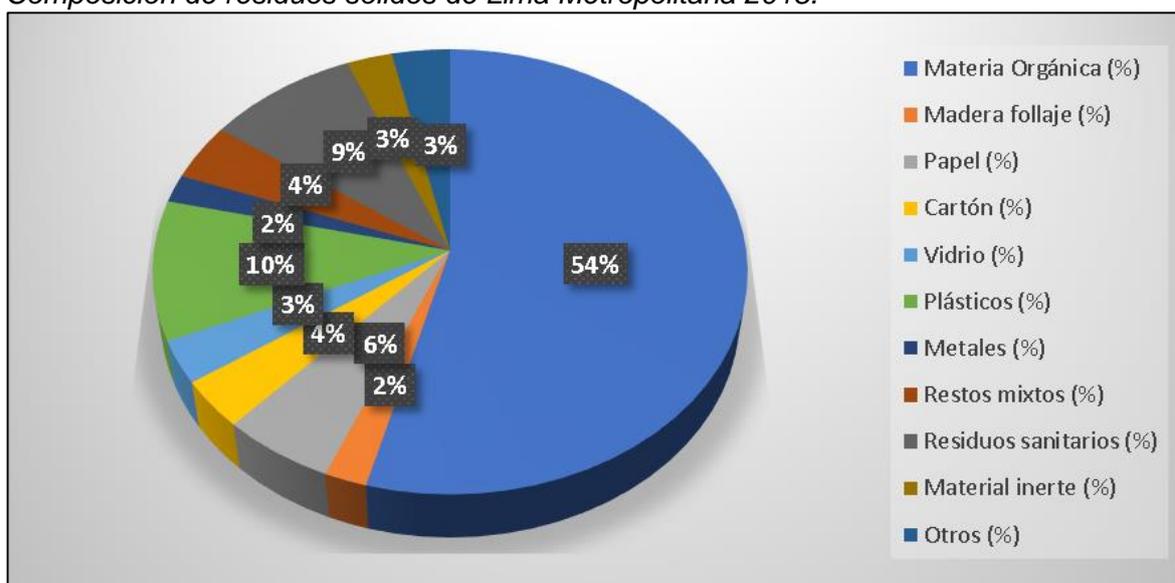
El Perú genera alrededor de 700 mil toneladas por año de residuos plásticos (MINAM, 2018), sin embargo, la disposición de estos residuos conllevan a un problema severo de contaminación ambiental que es cada vez mayor en los distritos de Lima y Callao. Por consiguiente, el actual proyecto de investigación tiene como objetivo el poder desarrollar un estudio que permita determinar la factibilidad técnico-económico de una planta que produce petróleo sintético mediante la pirólisis de residuos plásticos de Lima y Callao.

1.2. Descripción del problema de investigación

En las últimas décadas en el Perú, el crecimiento poblacional y el desarrollo de la vida contemporánea, ha provocado la necesidad del consumo diario de los productos derivados del petróleo. Este acontecimiento ha generado un crecimiento de los residuos sólidos, donde el plástico representa el 10% del total, siendo el mayor componente residual después de la materia orgánica como se muestra en la Figura 1. En Lima Metropolitana y el Callao se generan aproximadamente 800 toneladas de residuos plásticos al día, según estadísticas del MINAM (SIGERSOL, 2018), representando el 46% de dichos residuos a nivel nacional, los cuales en la actualidad aún utilizan los botaderos y rellenos sanitarios como zona de disposición final (MINAM & OPS, 2015).

Figura 1

Composición de residuos sólidos de Lima Metropolitana 2018.



Fuente: Elaboración propia con datos de (SIGERSOL, 2018).

La industria de plásticos ha mantenido un incremento constante de su producción desde los años 50, con un pronóstico de continuar con esta tendencia mostrada en la Figura 2 (IEES, 2019). En la actualidad, existe un consumo cada vez mayor de productos plásticos los cuales pasan a formar parte de los residuos sólidos generados en las municipalidades.

Figura 2

Producción mundial de plástico (millones de toneladas).

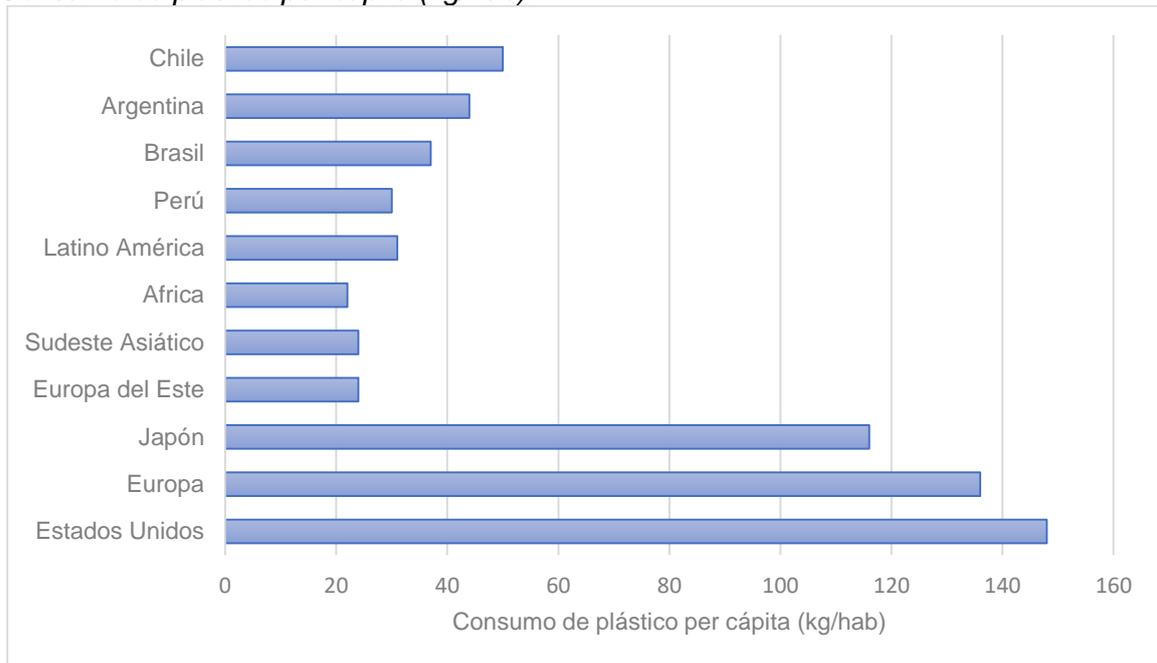


Fuente: Tomado de (IEES, 2019).

Con la llegada del coronavirus (COVID-19), la producción de plásticos aumentó significativamente, siendo aproximadamente el 75% generado por las medidas de salud y seguridad para reducir las infecciones por Covid-19, aumentando el consumo de mascarillas, guantes y botellas desinfectantes, que dará como resultado un impacto ambiental en daños por contaminación de ríos y lagos (UNEP, 2020). Debido a la presencia de estos residuos plásticos en los rellenos sanitarios y su lento ritmo de degradación, existe un problema de contaminación que proviene de la falta de sistemas de reciclaje y recuperación energética.

En la Figura 3, se muestra el consumo de plásticos per cápita a nivel global de acuerdo con (PlastPerú Digital News, 2016). En el Perú, el consumo promedio anual de plástico es de 30 kilos por habitante (kg/hab), lo que se considera dentro del consumo promedio de la región (Angel et al., 2018).

Figura 3
Consumo de plástico per cápita (kg/hab).

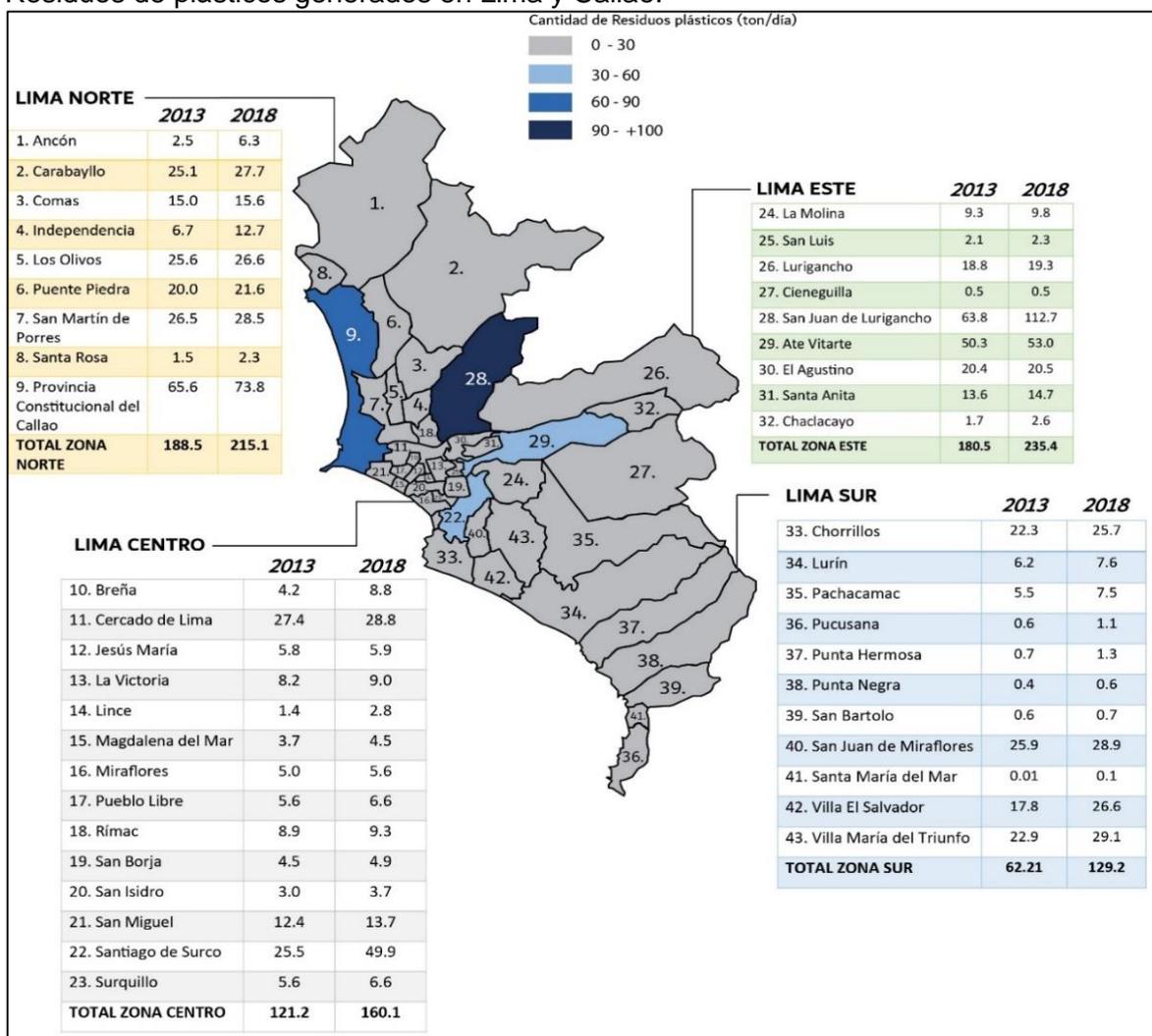


Fuente: Adaptado de (PlastPerú Digital News, 2016)

Es importante tomar en cuenta que los residuos generados en Lima varían dependiendo del distrito debido a la población involucrada, siendo su Plan de Gestión de Residuos Sólidos (PIGARS) y la segregación de los residuos, factor determinante dentro del aprovechamiento de residuos plásticos ya que favorecerá la separación de plásticos admisibles para su posterior reciclaje o reutilización (Luis & Moncayo, 2013).

De todos los residuos plásticos dentro de los residuos sólidos generados, en el Perú apenas se recicla el 4% de las 900 mil toneladas desechadas anualmente, lo que muestra un deficiente aprovechamiento de nuestros residuos (Hyatt, 2018). Dado que los plásticos no son biodegradables, no pueden retornar fácilmente a su estado natural dentro del ciclo del carbono; por lo tanto, el ciclo de vida de los materiales plásticos termina en instalaciones de disposición de residuos sólidos, o en la mayoría de los casos en cuerpos naturales como contaminante para el ambiente (MINAM & OPS, 2015). En la Figura 4, se presenta la cantidad de residuos plásticos generados en Lima Metropolitana y la provincia del Callao por distritos en los años 2013 y 2018.

Figura 4
Residuos de plásticos generados en Lima y Callao.



Fuente: Elaboración propia con datos de (Luis & Moncayo, 2013; SIGERSOL, 2018).

Se debe precisar que los residuos de los botaderos generan metano, CO₂, H₂S, humo y olores desagradables que alteran la calidad del aire, del suelo y del agua (Comercio, 2021). Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), las consecuencias más graves estarían perjudicando al mar, ya que para el año 2050, el océano puede contener más plástico que peces, y únicamente en el Perú el 46% de los desechos sólidos que se encuentran en el litoral están hechos completamente de resina plástica, y por otro lado, a nivel mundial, 13 millones de toneladas de plástico ingresan al océano cada año, matando a 100 000 especies marinas (MINAM, 2018).

Además, el crecimiento demográfico se ve reflejado en la demanda de petróleo y combustibles refinados, que, debido a la baja producción nacional, la demanda aumenta de manera asimétrica a la producción de combustibles líquidos. La balanza comercial de combustibles en el Perú es negativa desde hace años y la situación ha empeorado con el inicio de la pandemia. Esta situación es un indicador más de la crisis que afronta el sector petrolero nacional, la cual también muestra una reducción de 40% en la producción petrolera, al alcanzar a la fecha 42 mil barriles por día (MINEM, 2022).

1.2.1. Problema general

¿Es factible la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima y Callao para la obtención de petróleo sintético?

1.2.2. Problema específico

- ¿Cuáles serán las condiciones de presión y temperatura en el reactor de pirólisis para la obtención de petróleo sintético a partir de residuos plásticos no reciclables?
- ¿Cuál será la calidad de los productos líquidos obtenidos en la pirólisis de residuos plásticos no reciclables y estos podrán ser comercializados?
- ¿Cuáles son los índices de rentabilidad para un escenario financiero en la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima y Callao para la obtención de petróleo sintético?

1.3. Objetivos del estudio

1.3.1. Objetivo general

Determinar la factibilidad de la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos no reciclables en la ciudad de Lima-Callao para la obtención de petróleo sintético

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las condiciones de presión y temperatura en el reactor de pirólisis para la obtención de petróleo sintético a partir de residuos plásticos no reciclables.
- Determinar la calidad de los productos líquidos obtenidos en la pirólisis de residuos plásticos no reciclables y evaluar la comercialización de estos productos como petróleo sintético.
- Determinar los índices de rentabilidad del proyecto para un escenario financiero en la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima y Callao para la obtención de petróleo sintético.

1.4. Antecedentes investigativos

Investigaciones realizadas en estos últimos años han confirmado la existencia de grandes volúmenes de residuos plásticos en el mundo (UNEP, 2021), los cuales son una fuente potencial de materias primas para la producción de petróleo sintético mediante el proceso de pirólisis, por lo cual se tomó la iniciativa para realizar un estudio de viabilidad para la posible implementación de una instalación industrial de pirólisis en el Perú, tomando como referencia los siguientes trabajos:

En Argentina, se evaluó la factibilidad en el desarrollo de una planta de pirólisis catalítica en la provincia de San Luis, usando como materia prima plásticos a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) y biomasa generados en Villa Mercedes, procesando 36 toneladas de residuos sólidos logrando obtener una producción de 27 toneladas diarias de petróleo sintético, para ello se empleó un reactor de pirólisis que opera a 1 kg/cm² y 500 °C, permitiendo obtener una corriente gaseosa que posteriormente se enfría obteniendo 180 barriles de petróleo sintético al día, seguidamente se realizó el análisis económico obteniendo valores de TIR y VAN de 18.6% y \$ 1 251 313 respectivamente, donde los autores concluyen que el proyecto resulta factible y sostenible con el ambiente (Ríos & Calvo, 2011).

En Chile se realizó el estudio de factibilidad de una instalación de producción de diésel sintético a partir de residuos plásticos y neumáticos, donde se obtiene un combustible de similares características al diésel fósil realizando la pirólisis de Neumáticos Fuera de Uso (NFU). Se realizó un análisis comercial del diésel y de materia prima para estudiar su disponibilidad, costos, gestión y acopio. La planta se diseñó con una capacidad de 6 171 toneladas anuales de plástico para una producción de 7 900 m³ de diésel sintético al año. Como resultado de la evaluación económica se obtuvo que el VAN del proyecto es de \$ 12 millones con una TIR del 41% y un periodo de recuperación de inversión (PRI) de 3 años, en donde se invirtió aproximadamente 4,3 millones de dólares, para un horizonte de 10 años y valoraciones de costos y precios dados por el estudio de mercado. Se determina que el proyecto es altamente rentable y poco sensible a cambios significativos tanto en el precio del diésel como en el costo de materia prima (Escudero, 2011).

En el Perú, se planteó un proyecto que consistió en la evaluación de viabilidad para la obtención de petróleo industrial a partir de residuos plásticos mediante un proceso de pirólisis en Arequipa. La planta se diseñó para procesar 0.2 TM/día de residuos plásticos con una capacidad de producción de 1 441 gl/día de petróleo residual (Polanco, 2019).

De la misma manera existen estudios que proporcionaron información valiosa de recopilación de estudios realizados en diversas instituciones de prestigio de diferentes países como: *Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: A Review* (Miandad et al., 2016), desarrollado en Arabia Saudita que resume el progreso y los desafíos de la pirólisis catalítica de los residuos plásticos hasta la fecha, y muestra los parámetros a considerar en el desarrollo del proceso, principalmente el efecto del catalizador.

En España, a su vez es realizado el estudio: *Fuels from Waste Plastics by Thermal and Catalytic Processes: A Review*, que del mismo modo muestra el progreso en la producción de combustible diésel a partir de la pirólisis de residuos plásticos de una perspectiva técnica (Aguado et al., 2008).

La obtención de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos utilizando el proceso de pirólisis es una tecnología que ofrece un método adecuado para procesar la

gran cantidad de residuos plásticos que no pueden ser procesados por los métodos de reciclaje tradicionales, donde la disposición final de estos residuos consiste en enviarlos a rellenos sanitarios que son foco de contaminación odorífera por las emisiones, donde esta contaminación afecta directamente la calidad del aire y en consecuencia también tiene un impacto en la salud de las personas (Polanco, 2019), (Tansel & Inanloo, 2019).

Por otro lado, el aspecto legal del proyecto tiene un gran incentivo por el Decreto Legislativo N°1278 que aprueba la Nueva Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (MINAM, 2016), que destaca en el artículo 9 la utilización de material de desecho resultante de actividades productivas en las que dicho material de desecho genera ingresos directos utilizables para otras actividades económicas. Finalmente el proyecto permite impulsar la economía circular de las empresas dentro del marco normativo correspondiente en la “Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industrial” (El Peruano, 2020), esto forma parte de la transición energética dentro de las industrias, promoviendo también el consumo responsable de los plásticos, concientizando que las actividades y operaciones desarrolladas en el proyecto contribuyan a los objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015).

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

La evaluación técnico-económica permitirá la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima para la obtención de petróleo sintético.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Las condiciones operativas de presión y temperatura en el reactor permitirán la obtención de petróleo sintético a partir de la pirólisis de residuos plásticos no reciclables.

- Es posible determinar la calidad de los productos líquidos obtenidos en la pirólisis de residuos plásticos no reciclables y evaluar la comercialización de estos productos como combustibles.
- La evaluación técnico-económica de la planta de pirólisis de residuos plásticos no reciclables permitirá determinar los índices de rentabilidad del proyecto para un escenario financiero.

1.6. Matriz de consistencia

En la Tabla 1 se muestra la matriz de consistencia de la investigación.

Tabla 1
Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Tipo de Investigación	Población
¿Es factible la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima y Callao para la obtención de petróleo sintético?	Determinar la factibilidad de la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima y Callao para la obtención de petróleo sintético	La evaluación técnico-económica permitirá la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima para la obtención de petróleo sintético.	Aplicada	La población para la presente investigación consiste en los residuos plásticos no reciclables generados en los distritos de Lima.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Diseño experimental	Muestra
¿Cuáles serán las condiciones de presión y temperatura en el reactor de pirólisis para la obtención de petróleo sintético a partir de residuos plásticos?	Determinar las condiciones de presión y temperatura en el reactor de pirólisis para la obtención de petróleo sintético a partir de residuos plásticos.	Las condiciones operativas de presión y temperatura en el reactor permitirán la obtención de petróleo sintético a partir de la pirólisis de residuos plásticos.	Aplicada	Se trabaja con los residuos plásticos no reciclables que contienen las siguientes resinas plásticas: polietileno, polipropileno y poliestireno, las cuales son recopilados de centros de acopio de residuos sólidos en los distritos de Lima.
¿Cuál será la calidad de los productos líquidos obtenidos en la pirólisis de residuos plásticos y estos podrán ser comercializados?	Determinar la calidad de los productos líquidos obtenidos en la pirólisis de residuos plásticos y evaluar la comercialización de estos productos como petróleo sintético.	Es posible determinar la calidad de los productos líquidos obtenidos en la pirólisis de residuos plásticos y evaluar la comercialización de estos productos como combustibles.		
¿Cuáles son los índices de rentabilidad para un escenario financiero en la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima y Callao para la obtención de petróleo sintético?	Determinar los índices de rentabilidad del proyecto para un escenario financiero en la implementación de una planta de pirólisis de residuos plásticos en la ciudad de Lima y Callao para la obtención de petróleo sintético.	La evaluación técnico-económica de la planta de pirólisis de residuos plásticos permitirá determinar los índices de rentabilidad del proyecto para un escenario financiero.		

Fuente: Elaboración propia

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Plásticos

Los plásticos se utilizan ampliamente en todas partes de nuestra vida. Día a día, las personas dependen cada vez más del uso de plásticos por sus características como durabilidad, flexibilidad, versatilidad, entre otros. A continuación, se mencionan las propiedades principales de los plásticos: Resistencia química y térmica, no absorben mucha humedad, bajo contenido de agua, mayor disponibilidad en el mercado y precio competitivo (Oviedo, 2014).

Plástico es un término general de cualquier polímero orgánico sintético o semisintético que consiste en la repetición de largas cadenas de carbono y otros elementos químicos. En el proceso de polimerización, los enlaces de los monómeros se rompen y luego se crea un enlace abierto en el monómero. Entonces, el monómero se une con otro o la misma unidad repetida y crean una cadena larga del monómero (Sohel, 2012). Existen tres tipos de plásticos según su estructura molecular mencionados a continuación:

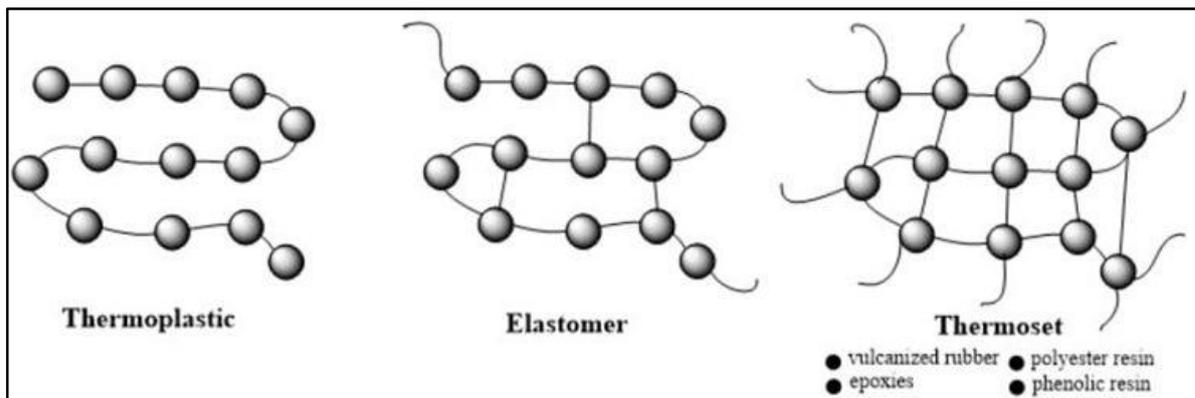
2.1.1.1. Termoplástico. Formado por largas cadenas laterales. La unión entre las moléculas de termoplásticos es débil, por lo que pueden ablandarse y endurecerse mediante el proceso de calentamiento y enfriamiento repetidamente. Y estos cambios no producen ningún tipo de cambio en su estructura química. El termoplástico se puede reciclar después de su uso. La mayoría de los productos plásticos están hechos de termoplásticos (Industriales, 2014).

2.1.1.2. Termo estables. Los plásticos termoendurecidos forman una estructura reticulada durante el procesamiento, por lo que no se pueden remodelar ni reciclar. El vínculo entre las moléculas es muy fuerte (Industriales, 2014).

2.1.1.3. Elastómeros. Según la ASTM D1566 el término elastómero describe a un material que exhibe una recuperación rápida y forzada de la mayoría de sus dimensiones originales después de la extensión o compresión y puede vulcanizarse (White & De, 2001).

En la Figura 5, se muestra la representación gráfica de las estructuras de los plásticos y el esquema de enlaces entre moléculas.

Figura 5
Esquema de las estructuras de los tipos de plástico.



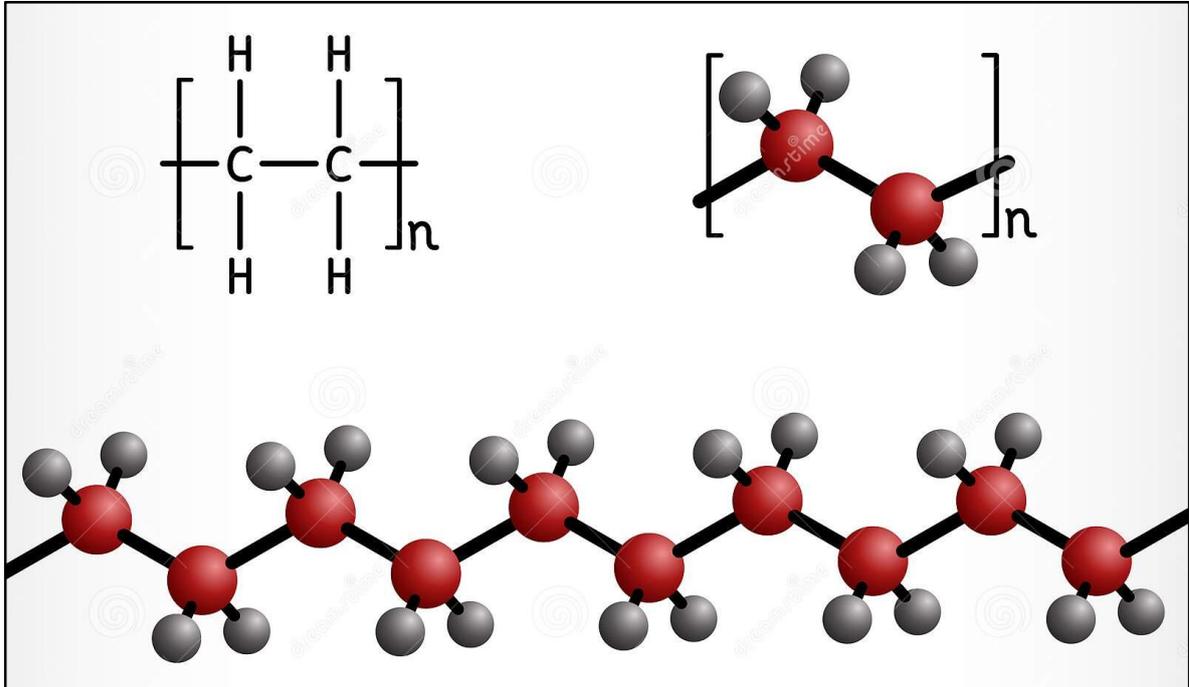
Fuente: (Vashchuk et al., 2018)

2.1.2. Tipos de Resinas Plásticas

2.1.2.1. Polietileno (PE). El polietileno (C_2H_4)_n, es la resina plástica que se produce en todo el mundo a razón de más de 100 millones de toneladas al año, es el polímero termoplástico sintético más económico y productivo (Schneiderman & Hillmyer, 2017). El PE lineal se llama polietileno de alta densidad (HDPE), que es uno de los plásticos más versátiles y muy utilizado, tanto en su forma rígida y forma flexible. El HDPE es característico por su mayor relación densidad/resistencia y tolerancia a numerosos solventes. Es idéntico al polietileno de baja densidad (LDPE) químicamente, pero tiene mayor resistencia a la tracción y fuerzas intermoleculares, es decir, menos ramificado (Andrady, 2011). El PE más ramificado tiene una densidad relativamente más baja que se conoce como polietileno de baja densidad (LDPE) que se usa en envases de alimentos y bolsas de supermercado y es impermeable a ácidos, bases, alcoholes y ésteres mientras que se vuelve inestable debido a oxidantes activos, hidrocarburos aromáticos, alifáticos y

halo alcanos en particular (Scalenghe, 2018). En la Figura 6 se muestra la estructura molecular del polietileno.

Figura 6
Estructura molecular del polietileno

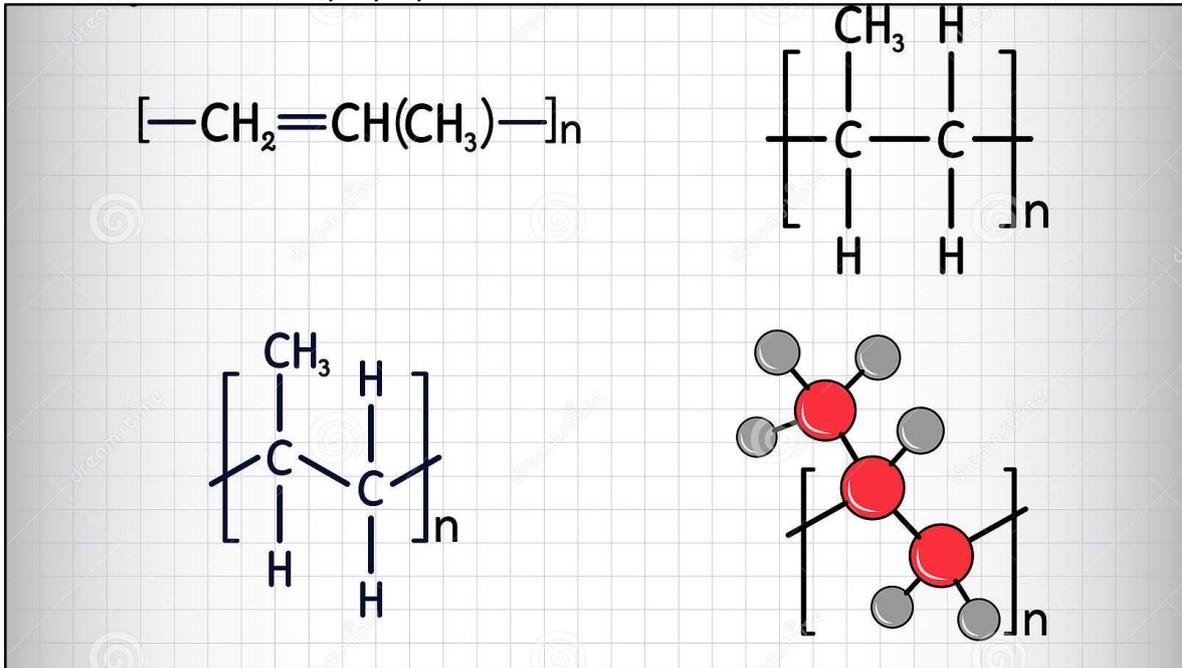


Fuente: (Dreamstime, 2022)

2.1.2.2. Polipropileno (PP). El polipropileno (C_3H_6)_n tiene similares características al polietileno, aunque existen algunas diferencias específicas, como un punto de ablandamiento más alto, una densidad más baja (el punto de fusión del PP a 160 °C y la suavidad del PE a 100 °C), una mayor rigidez, tenacidad, mayor propiedades mecánicas y menor resistencia química a oxidantes activos y solventes no polares (Hussein et al., 2021). Sin embargo, el PP resiste la acción de ácidos y bases no oxidantes, grasas y disolventes orgánicos. En la Figura 7 se muestra la estructura molecular del polipropileno.

Figura 7

Estructura molecular del polipropileno



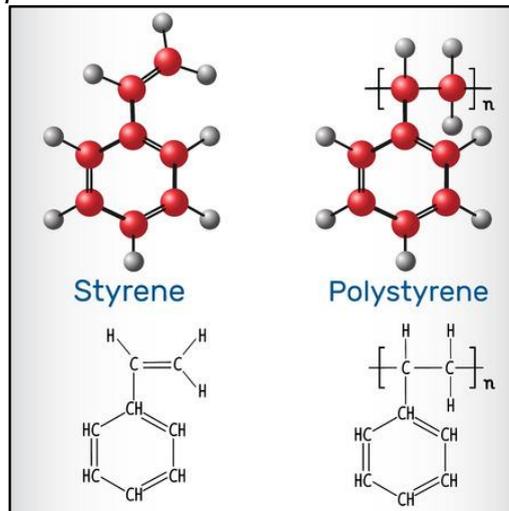
Fuente: (Dreamstime, 2022)

En términos de biodegradación, el PP es un plástico sintético que contiene principalmente aromáticos, alquenos y alcanos (Mangesh et al., 2020); y proporciona resistencia química y excelente conductividad a temperaturas más altas, sin embargo, no presenta agrietamiento por tensión. Además, el PP se usa ampliamente en productos de embalaje, molduras de plástico, recipientes de plástico, carpetas estacionarias, suturas no absorbibles, pañales, etc. (Cacciari et al., 1993).

2.1.2.3. Poliestireno (PS). Poliestireno (C_8H_8)_n, también conocido como "polivinilbenceno", que podría ser considerado como un polímero hidrofóbico fabricado con un alto peso atómico. El PS es aromático, no polar, resistente al agua, químicamente inerte y fácil de procesar y puede ser translúcido de forma natural, pero se puede rociar con colorantes (Hussein et al., 2021). Se muestra a continuación la estructura del poliestireno en la Figura 8.

Figura 8

Estructura molecular del poliestireno



Fuente: (Dreamstime, 2022)

Se usa comúnmente como bandejas y recipientes rígidos, platos desechables, vasos de espuma y tazones en la industria de servicio de alimentos. El PS también se polimeriza o se mezcla con otros polímeros que producen una variedad de artículos esenciales de plástico y caucho con dureza y rigidez (Almukhtar, 2018). El PS es reciclable pero no se ve afectado por la biodegradación.

2.1.3. Contenido energético de los plásticos

Los plásticos están compuestos principalmente por carbono e hidrógeno, el mismo que contiene la mayoría de los hidrocarburos, lo que resulta en un gran poder calorífico que es desperdiciado al ser retirados en un relleno sanitario como disposición final. El valor energético de los residuos plásticos estudiados se acerca a valores superiores a 40 MJ/kg, equiparable con el poder calorífico del aceite combustible. Por tanto, la recuperación energética se convierte en una alternativa importante sobre todo cuando limitaciones técnicas o económicas no hacen viable el reciclaje mecánico de los mismos (Uriarte Cáceres, 2018).

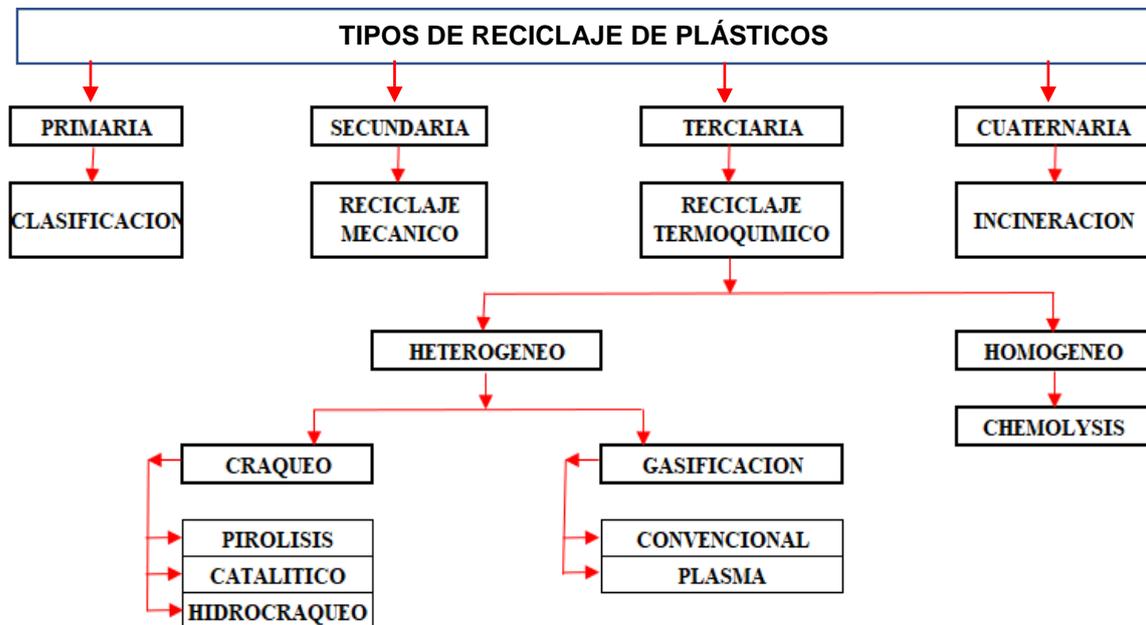
Tabla 2*Poder Calorífico de plásticos no reciclables*

Plásticos no reciclables	Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	Combustibles convencionales	Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)
Tereftalato de Polietileno (PET)	24	Gas Natural	47
Polietileno de alta densidad (HDPE)	44	Petróleo crudo	42
Policloruro de vinilo (PVC)	19	Carbón mineral	26
Polietileno de baja densidad (LDPE)	28	Madera	14
Polipropileno (PP)	44		
Poliestireno (PS)	41		

Fuente: Tomado de (Uriarte Cáceres, 2018)

2.1.4. Reciclaje de plásticos

Existen cuatro enfoques principales para el reciclaje de desechos plásticos; estos son reciclaje primario, secundario, terciario y cuaternario, según el estándar internacional ASTM D5033 (ASTM, 2000). Se muestra a continuación los tipos de reciclaje plásticos.

Figura 9*Diagrama de métodos de reciclaje por clase de los residuos plásticos*

Fuente: Tomado de (Kumar et al., 2011).

El reciclaje primario se caracteriza por reutilizar resinas plásticas limpias sin contaminación, que se conserva con las propiedades similares a las originales. El reciclaje primario es el más sencillo y económico, sin más precauciones que una adecuada y limpia recogida de residuos plásticos en planta (Kumar et al., 2011).

El reciclaje secundario consiste en la conversión de residuos plásticos en productos con rendimientos menos exigentes que los materiales vírgenes. El orden real y el número de operaciones en un sistema de tratamiento de reciclaje particular depende de los residuos que se procesan y de la calidad deseada del producto final (Horvat & Ng, 1999). Solo el 20 % de los plásticos se pueden reciclar ahora de esta manera, según la tecnología más utilizada en este momento, que es particularmente frecuente en la industria automotriz. (Arandes et al., 2004).

El reciclaje terciario implica la descomposición del polímero conocido como reciclaje químico. En este proceso, los materiales plásticos sólidos se convierten en moléculas como intermediarios químicos mediante el uso de calor y/o tratamiento químico. Estos productos químicos intermedios, generalmente líquidos o gases, pero a veces sólidos o ceras, son adecuados para su uso como materias primas para la producción de nuevos productos petroquímicos y plásticos (Wastecare Corp., 2013).

El reciclaje cuaternario consiste en la incineración para recuperación energética. Actualmente es una tecnología con un poco aceptación social por los problemas medioambientales que están involucrados en su proceso productivo (Arandes et al., 2004).

2.1.5. Pirólisis

La pirólisis es una técnica de reciclaje terciario en la cual los polímeros orgánicos son convertidos en líquidos, sólidos y gases mediante descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno (Chen et al., 2014). En todos los procesos de combustión y gasificación, lo primero es la pirólisis, seguida de la oxidación total o parcial de los productos principales. Tres pasos componen el proceso de pirólisis: alimentación y repartición de la materia prima, conversión de materia orgánica y, por último, obtención y separación de los productos terminados (carbón, líquido y producto gaseoso). Se

encuentran numerosas variedades de pirólisis. Cada uno de ellos tiene condiciones de proceso únicas que fomentan la producción de varios productos (Klug, 2012).

2.1.5.1. Pirólisis de residuos plásticos. La pirólisis es un proceso termoquímico que consiste en la aplicación controlada de calor en ausencia de oxígeno para descomponer las moléculas contaminantes de cadena larga en moléculas más pequeñas y sencillas, este proceso normalmente tiene lugar a temperaturas en el rango de 350 a 900 °C, y como resultado de este proceso se pueden obtener productos como sólidos, líquidos y gases (Panda et al., 2010). El proceso de pirólisis brinda nuevas oportunidades para aminorar los riesgos a la salud asociados con los plásticos, la biomasa y otros materiales orgánicos a través del reciclaje, la gestión de residuos con eficiencia energética, el control de la contaminación y la gestión de energía limpia y renovable (Kumar et al., 2011).

2.1.5.1.1. Pirólisis térmica. Radica en la descomposición térmica de residuos plásticos en ausencia de oxígeno. En el curso de la pirólisis, los materiales poliméricos se calientan a elevadas temperaturas y, por lo tanto, sus macromoléculas se rompen en moléculas más pequeñas, lo que resulta en la formación de un amplio rango de hidrocarburos. Los productos obtenidos de la pirólisis se pueden dividir en fracción de gas no condensables, fracción líquida (consistente en parafinas, olefinas, naftenos y aromáticos) y residuos sólidos (Almeida & Marque, 2015).

La descomposición térmica generalmente produce una mezcla de hidrocarburos de bajo valor que tiene una amplia variedad de productos incluyendo hidrógeno a coque. Usualmente, cuando la temperatura de la reacción de pirólisis es alta, se evidencia una mayor producción de fracción gaseosa y una menor producción de producto líquido (Scheirs & Kaminsky, 2006). La temperatura no es la única variable que afecta el rendimiento y la composición de los productos; también influyen otros factores que se detallarán más adelante.

2.1.5.1.2. Pirólisis catalítica. Esta se lleva a cabo utilizando un catalizador. El proceso catalítico presenta un elevado potencial para convertir los desechos plásticos en producto líquido con una calidad superior del aceite a temperaturas y tiempos de reacción

inferiores comparados con la pirólisis térmica. Estos factores pueden reducir la demanda energética del proceso y así optimizar el proceso de pirólisis general (Miandad et al., 2016).

La pirólisis catalítica se muestra como una alternativa en el reciclaje de mezclas de residuos plásticos debido a los siguientes puntos: Reacciones de descomposición a menores temperaturas, con esto, menores requerimientos de energía, reducción de costos, favorece el rendimiento de líquidos de mayor valor comercial, aumenta la selectividad del proceso, menores tiempos de residencia conllevan a menores tamaños de reactor e inhibe la formación de productos no deseados (Almeida & Marque, 2015).

Como se ha visto, la pirólisis catalítica ofrece una serie de ventajas frente a la pirólisis térmica, sin embargo, para el presente estudio no se considera la utilización de catalizador debido al hecho que la cinética de la reacción no se ha estudiado con tal profundidad en la bibliografía. En la siguiente Tabla 3 se muestran los principales catalizadores utilizados en la pirólisis de residuos plásticos, de la cual se resume que las zeolitas son las más utilizadas y de las que se tiene mayor registro bibliográfico (Aguado et al., 2008).

Tabla 3
Catalizadores usados en pirólisis de plásticos

Catalizadores usados en el proceso de pirólisis	
Homogéneos	AlCl ₃
	AlCl ₄
	Líquidos orgánicos iónicos
Heterogéneos	Zeolitas
	Sílica-alúmina
	Alúminas
	Catalizador de FCC nuevo y usado
	Meso estructurados
	Arcillas con pilares de aluminio
	Zeolitas nano cristalinas
	Sólidos superácidos
	Metales soportados en carbón
	Óxidos básicos

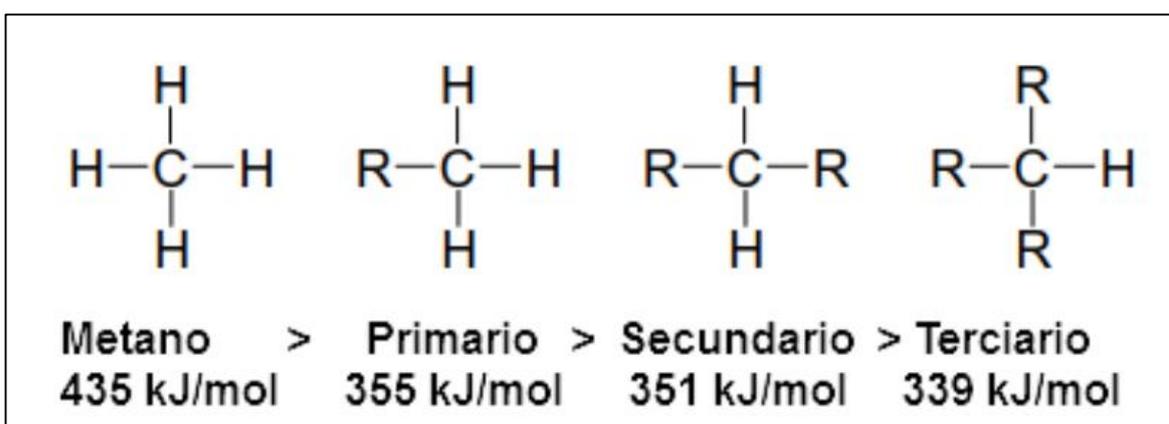
Fuente: Tomado de (Scheirs & Kaminsky, 2006)

2.1.6. Descomposición térmica

El proceso de ruptura por medio de energía térmica ocurre en los enlaces más débiles de la estructura del polímero. Esta energía requerida para romper el enlace es denominada energía de disociación y es menor en cuanto más ramificada esté la molécula. De esta forma, la estabilidad de los enlaces de carbono en un polímero varía según los grupos funcionales que tenga, y esto determinará los mecanismos de ruptura (Uriarte Cáceres, 2018).

Figura 10

Energías de disociación para moléculas de carbono según ramificación



Fuente: Tomado de (Uriarte Cáceres, 2018)

La pirólisis de los plásticos se desarrolla a lo largo de vías complejas que no es posible que puedan ser descritas mediante una o más reacciones químicas, por lo que se representan mediante fórmulas empíricas que representan coeficientes estequiométricos fraccionarios o sistemas integrales de reacciones elementales. Además, la composición y estructura de estos sistemas de reacción pueden variar según los detalles de la estructura molecular, como la inclusión de catalizadores, etc. Como consecuencia, los mecanismos exactos son de interés científico solamente, el enfoque industrial se limita a consideraciones generales como la influencia del calor y la distribución del producto resultante en condiciones de reacción específicas (Scheirs & Kaminsky, 2006).

Las resinas poliméricas estudiadas y sus principales productos posibles se muestran en la Tabla 4, donde se aprecian que las resinas que proporcionan los productos con mayor valor comercial son el PE y PP.

Tabla 4
Resinas plásticas y sus principales productos

Plástico	Método de descomposición térmica	Productos a baja temperatura	Productos a alta temperatura
PE	Ruptura de cadena aleatoria	Ceras, aceites parafínicos, olefinas α	Gases y aceites ligeros
PP	Ruptura de cadena aleatoria	Vaselina, olefinas	Gases y aceites ligeros
PS	Despolimerización, ruptura de cadena aleatoria y formación de oligómeros	Estireno y sus oligómeros	Estireno y sus oligómeros
PET	Transferencia de Hidrógeno β , reordenamiento y descarboxilación	Ácido benzoico y tereftalato de vinilo	-
PVC	Eliminación de HCl de la cadena, deshidrogenación y ciclación de la cadena	HCl y benceno (<300°C)	Tolueno (>300°C)

Fuente: Tomado de (Morales, 2018)

2.1.7. Factores que afectan el proceso de pirólisis

Existen una serie de condiciones que afectan la obtención de líquidos de pirólisis. Estos parámetros tienen efecto en el proceso de pirólisis y determinan la distribución de los productos que se obtienen de la pirólisis de plásticos estudiada. Se detallan los factores más importantes en la Tabla 5, como el efecto de la temperatura, la presión, el tiempo de residencia, así como el tipo de reactor. Otros factores solo se harán mención, sin embargo, no se hará mayor detalle dado que no tienen un efecto mayor.

Tabla 5*Factores de influencia el proceso de pirólisis*

Factor de Influencia	Efecto en el proceso de pirólisis
Composición química de la resina plástica	Los productos primarios de pirólisis se relacionan directamente con la estructura química y la composición de los plásticos, y también con el mecanismo de su descomposición (térmica o catalítica)
Temperatura y velocidad de calentamiento	Las temperaturas de operación altas y las velocidades de calentamiento mejoran la ruptura de enlaces y favorecen la producción de moléculas pequeñas.
Tiempo de residencia	Los tiempos de residencia más largos fomentan una conversión secundaria de los productos primarios, produciendo más coque, alquitrán y productos térmicamente estables, opacando así gradualmente el efecto de la estructura original del polímero.
Tipo de reactor	Determina principalmente la calidad de la transferencia de calor, la mezcla, los tiempos de residencia de la fase gaseosa y líquida, y el escape de productos primarios.
Presión de operación	Las bajas presiones de operación reducen la condensación de fragmentos reactivos formando coque y pesados.
Presencia de gases de reacción	Tal presencia genera internamente calor, diluye los productos e influye en los equilibrios, cinéticas y mecanismos.
Uso de catalizador	Su uso influye sobre la cinética y los mecanismos, y por lo tanto, la distribución del producto.
Fase líquida y gas	La pirólisis en fase líquida retarda el escape de los productos en evolución, mejorando así las interacciones

Fuente: Tomado de (Morales, 2018)

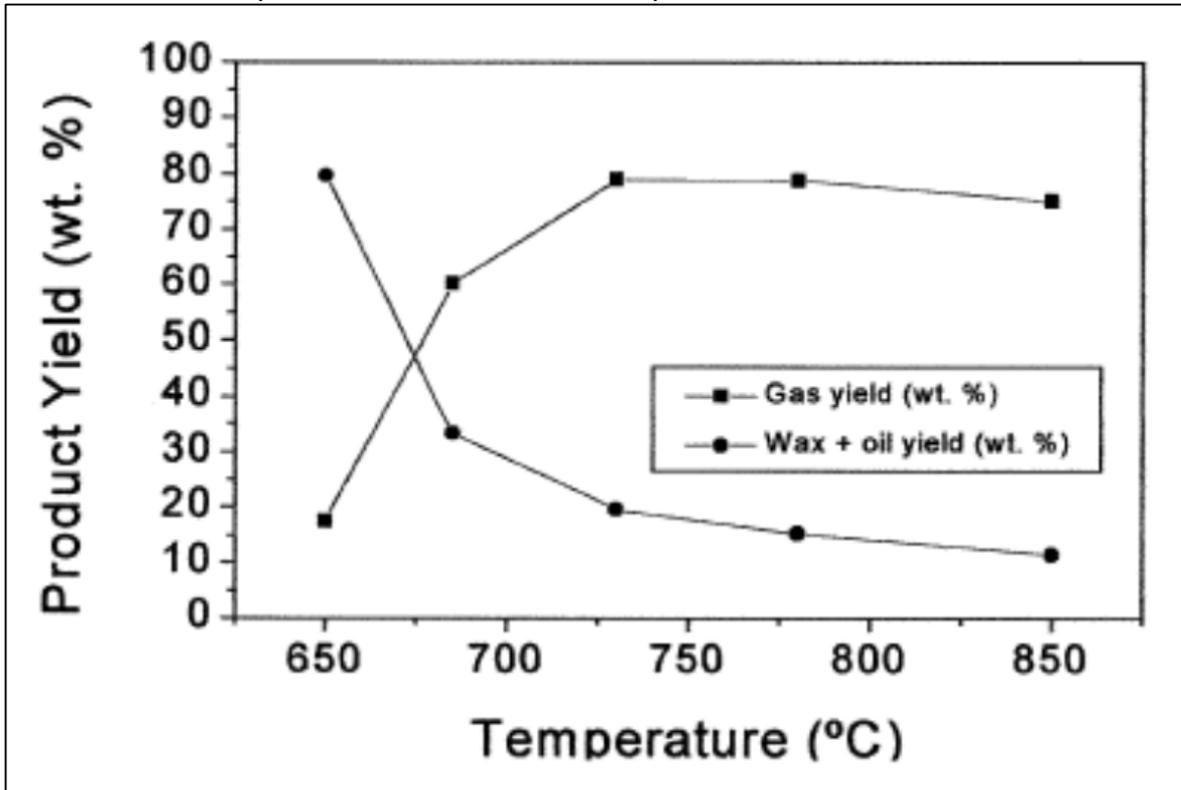
2.1.7.1. Efecto de la Temperatura. La temperatura es la variable operativa más importante ya que determina la velocidad de la descomposición térmica y la estabilidad de la reacción de la materia prima en productos, sin embargo, no todos los materiales poliméricos se pueden romper al aumentar la temperatura (Scheirs & Kaminsky, 2006).

Cuando la vibración de las moléculas, generado por el incremento de temperatura, es lo suficientemente grande, las moléculas se evaporarán de la superficie del objeto, de modo que, una elevada temperatura (>600°C) favorece la producción de moléculas gaseosas simples y pequeñas; mientras que una temperatura baja (<400°C) y el aumento de presión origina un producto líquido más viscoso, mayores tasas de pirólisis, una mayor tendencia a la formación de coque y el incremento de productos secundarios (Sobko, 2008). En la mayoría de los procesos se opta por una temperatura media (400–500°C) donde los plásticos se encuentran en estado fundido. Los procesos de 'fase gaseosa' presentan películas de polímero líquido, distribuidas sobre los granos de los reactores de pirólisis de lecho fluidizado (Scheirs & Kaminsky, 2006).

En la siguiente Figura 11 se muestra la relación del rendimiento de productos líquidos y gaseosos frente al incremento de la temperatura del reactor de pirólisis.

Figura 11

Influencia de la temperatura en la distribución del producto



Fuente: Tomado de (Gao, 2010).

2.1.7.2. Efecto de la velocidad de calentamiento. “Velocidad de calentamiento” en las investigaciones sobre pirólisis se refiere al incremento de la temperatura por unidad de tiempo. La influencia de la velocidad de calentamiento en el proceso de pirólisis y en la distribución de productos cambia según los estudios revisados debido a las diferencias en el reactor de pirólisis, las condiciones de operación (temperatura y presión) y la ubicación del sensor de medición de temperatura (Scheirs & Kaminsky, 2006). Normalmente, en la pirólisis rápida o flash, la tasa de calentamiento se refiere al cambio de temperatura del plástico desde que cae sobre la superficie caliente hasta que se descompone y vaporiza. La superficie caliente mantiene la temperatura mientras que la cantidad de plástico que cae sobre ella es relativamente pequeña. En esta situación, la velocidad de calentamiento es muy alta, hasta 10 000 K/s (Williams, 2006).

Esto es difícil de medir con precisión. Por lo tanto, la temperatura de la superficie se aplica normalmente como indicador de la temperatura de reacción en lugar de la velocidad de calentamiento en el proceso de pirólisis instantánea y rápida. En un proceso por lotes, el plástico normalmente se calienta a partir de la temperatura ambiental hasta la temperatura de craqueo en varios minutos ya que es un proceso de pirólisis lenta (Kaminsky, 1992). Una vez que la materia prima de plástico se calienta a la temperatura de craqueo, la temperatura permanece relativamente constante hasta que toda la materia prima se ha pirolizado. Por lo tanto, la velocidad de calentamiento se aplica normalmente como indicador de temperatura en lugar de la temperatura de reacción en un proceso de pirólisis lenta (Gao, 2010).

2.1.7.3. Tiempo de residencia. La temperatura de reacción influye en el tiempo de reacción requerido. Un tiempo de residencia corto favorece la formación de productos primarios como los monómeros, y un tiempo de residencia largo favorece la formación de productos más estables en su termodinámica (H_2 , CH_4 , aromáticos, carbono). La baja presión (vacío o en presencia de un disolvente inerte) favorece la producción de productos primarios, incluidos los monómeros; por otro lado, la alta presión favorece la formación de fracciones líquidas complejas (Gao, 2010).

El tiempo de residencia también va a depender del tipo de reactor que es utilizado para la reacción de pirólisis. En un reactor continuo, es el tiempo que permanece la resina plástica dentro del reactor, normalmente debido a la velocidad de calentamiento alcanzada, los reactores continuos se consideran reactores de pirólisis flash. En el proceso por lotes, el tiempo de residencia es la diferencia entre el momento en que comienza el calentamiento y el momento en que comienza la agitación del producto. En el proceso semi-continuo, el tiempo de residencia está determinado por el tamaño físico del reactor y la velocidad de salida, que generalmente es asistida por un vacío o una corriente gaseosa (generalmente nitrógeno) (Uriarte Cáceres, 2018).

La carbonización se logra mediante un tiempo de reacción muy largo y un rendimiento máximo de sólidos. La pirólisis flash se realiza a altas velocidades de

calentamiento (100-1 000 K/s) en reactores de lecho fluidizado, en los que se precalienta antes de la alimentación. Por el contrario, la pirólisis lenta requiere una temperatura más baja que la pirólisis rápida y un tiempo de residencia más largo (Jung & Fontana, 2006).

En la siguiente Tabla 6 se clasifica el tipo de pirólisis por el tiempo de residencia y la distribución de productos a determinadas temperaturas.

Tabla 6

Tipos de Pirólisis según el tiempo de residencia

Pirólisis	Tiempo de residencia	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Producto principal
Carbonización	Horas-días	1	400	Carbón
Convencional	10 s - 10 min	1	< 600	Gas, líquido y carbón
Flash-Líquido	< 1 s	1	< 600	Líquido
Flash-Gas	< 1 s	1	>700	Gas
Ultra	< 0.5 s	1	1 000	Gas, químicos
Vacío	2 - 30 s	< 0.1	400	Líquido

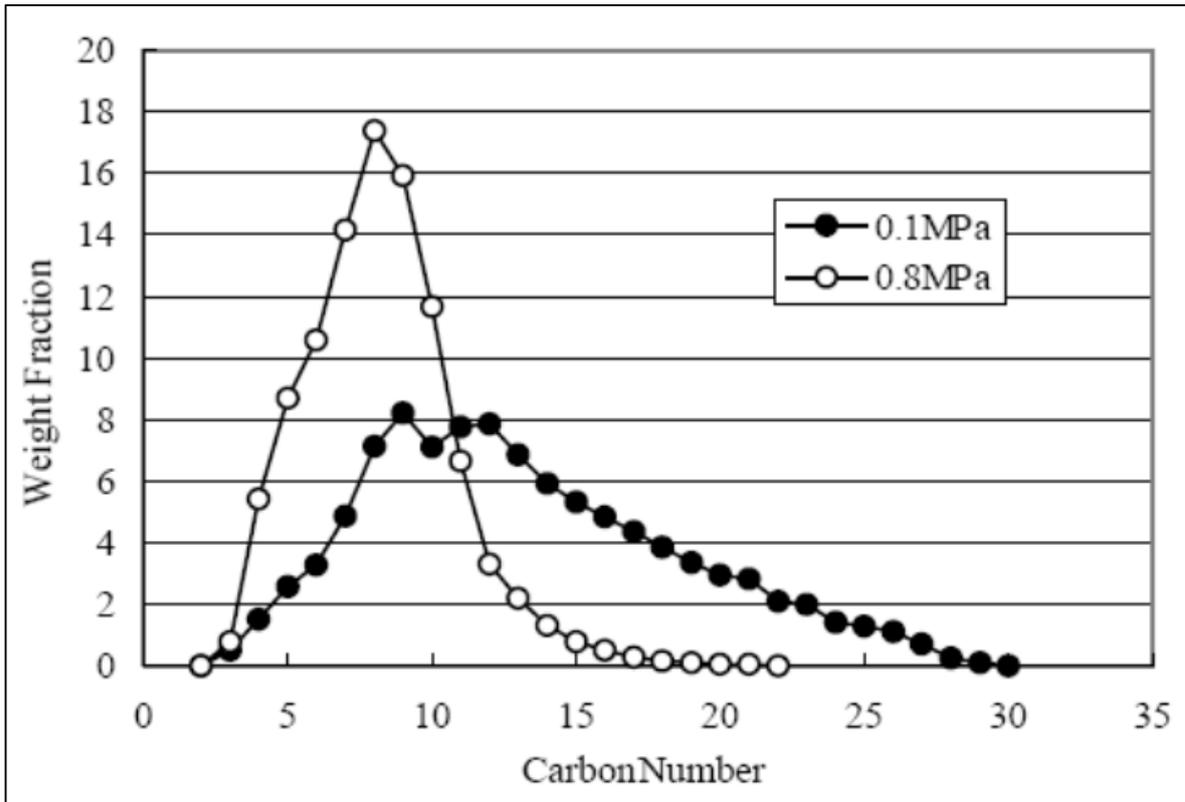
Fuente: Tomado de (Bridgwater & Grassi, 2012)

2.1.7.4. Efecto de la presión. El efecto de la presión de operación influye significativamente en el proceso de pirólisis, así como también en los productos. Los puntos de ebullición de los productos de pirólisis aumentan a mayor presión, por lo tanto, en un entorno presurizado, los hidrocarburos pesados favorecen la pirólisis líquida en lugar de vaporizarse a la temperatura de operación dada (Miranda et al., 2001).

La Figura 12 muestra el efecto de la presión sobre el número de hidrocarburos y sus fracciones en los productos de pirólisis del PE. De hecho, en la pirólisis a presión, se necesita más energía para poder craquear los hidrocarburos. También se encontró que la alta presión aumentaba el rendimiento de gas no condensable y disminuía el rendimiento de producto líquido (Intriago & Rodríguez, 2017).

Figura 12

Efecto de la presión en la degradación térmica del PE



Fuente: Tomado de (Murata et al., 2004)

2.1.7.5. Tipo de reactor. El tipo de reactor empleado para la termólisis de plásticos influye significativamente en la transferencia de calor, la mezcla de plásticos, el tiempo de residencia y el nivel de reflujo del producto primario (Scheirs & Kaminsky, 2006). Los reactores se pueden clasificar en discontinuos, semicontinuo y continuos.

Mientras se usa un reactor continuo, los materiales se agregan al reactor en lotes, ya sea al comienzo del proceso o después de que se hayan procesado todos los materiales. Los materiales para la alimentación entran por un lado del reactor y los productos salen por el otro. Los subproductos de la pirólisis se eliminan continuamente en un reactor semicontinuo, pero los materiales para la alimentación se agregan inicialmente antes de que comience el proceso de pirólisis. (Scheirs & Kaminsky, 2006).

Jung & Fontana (2006) clasificaron las principales rutas de los procesos de pirólisis, estudiando sus balances de masa y energía, así como las condiciones de funcionamiento, prediciendo el comportamiento de los plásticos mixtos durante la pirólisis, para evaluar la

producción de combustibles. Su modelo fue validado por experimentos a escala de laboratorio y se evaluó la calidad de los combustibles resultantes, para elegir el mejor proceso térmico para plantas industriales según las propiedades de los residuos disponibles, que se muestran en la Tabla 7 en función de las principales características del reactor estudiado.

Tabla 7
Tipo de reactor y características

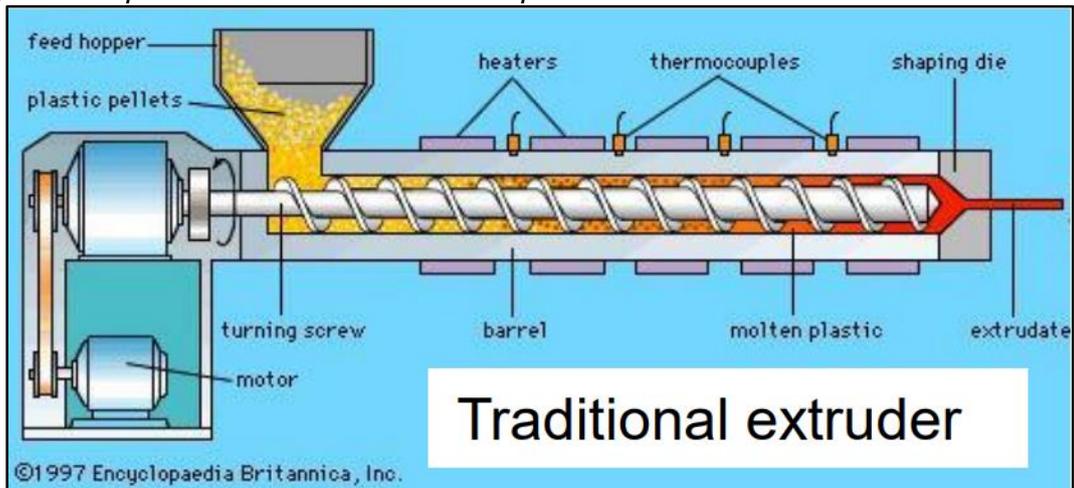
Tipo de reactor	Principales características	Aplicación
Extrusor	La temperatura de funcionamiento es limitada.	Producción de Waxes a partir del PE
Reactor Tubular	Simplicidad	Poliiolefinas trituradas
Reactor de Tanque Agitado	Reactor de fase líquida convencional. La agitación mejora la transferencia de calor. Debe evitarse la obstrucción de los conductos aguas abajo.	Mezcla de Plásticos: BASF, Ludwigshafen Chiyoda Engineering, Niigata
Reactor vertical	Flujo gravitacional	Pirólisis de caucho Foster Wheeler
Reactor de Lecho Fijo	Principalmente para reacciones con catalizador.	Aplicación experimental
Reactor de Lecho Fluidizado	El lecho fluidizado actúa como un agente de transferencia de calor, dispersando el plástico fundido en capas delgadas.	Usado en la mayoría de las plantas comerciales
Horno Rotatorio	Unidades simples, con acción de volteo y flujo por gravedad. El sellado es delicado	Proceso NKK para pirólisis de PVC

Fuente: Tomado de (Morales, 2018)

2.1.7.5.1. Reactor extrusor. Las extrusoras tienen generalmente una capacidad superior a 1 ton/h, para mezclar y fundir plásticos y proporcionar tubos, láminas, etc. La mayoría de ellos se calientan eléctricamente o con circulación de aceite caliente, y se pueden utilizar en sistemas de alimentación de resinas plásticas, filtrando el material alimentado para eliminar el HCl del PVC a temperaturas de hasta 400 °C (Buekens, 1977). Se muestra un reactor tipo extrusor común utilizado a escala industrial en la Figura 13.

Figura 13

Esquema de pirólisis utilizando un reactor tipo extrusor tradicional

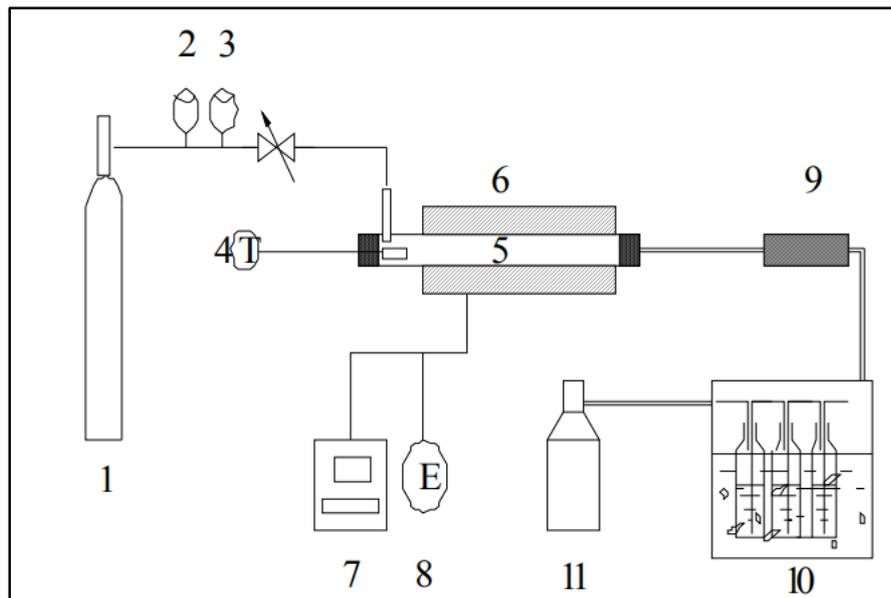


Fuente: Tomado de (Qureshi et al., 2019)

2.1.7.5.2. Reactor tubular. Los reactores tubulares son una tecnología convencional en ingeniería química y proporcionan flujo pistón, pero carecen del efecto de desplazamiento positivo, mezcla y plastificación de las extrusoras de tornillo simple o doble. Se utilizaron de forma limitada por Japanese Gasoline y Sanyo Electric Co., esta última con calefacción dieléctrica (Scheirs & Kaminsky, 2006). En la siguiente Figura 14 se muestra un esquema de pirólisis utilizando un reactor tubular a escala experimental.

Figura 14

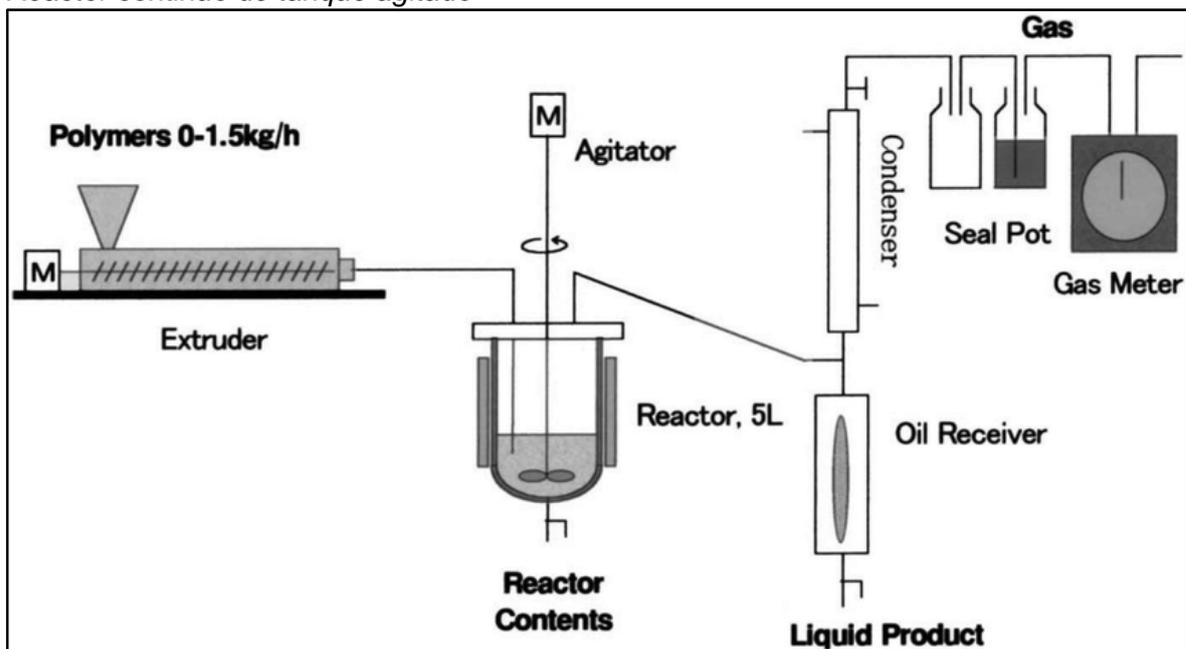
Diagrama de un esquema de pirólisis utilizando reactor tubular



Fuente: Tomado de (Lv et al., 2010)

2.1.7.5.3. Reactor Tanque Agitado. El reactor de tanque agitado se propone frecuentemente como un reactor de polimerización de plásticos en fase líquida, quizás con un circuito de calentamiento externo (Morales, 2018). Tanto BASF (Tukker et al., 1999) como (Bockhorn et al., 1999) han utilizado reactores agitados en cascada para producir una pirólisis paso a paso de mezclas de resinas plásticas. El calor de reacción requerido se suministra mediante calentamiento externo del recipiente de reacción o, para unidades piloto o a escala de laboratorio, mediante calentamiento eléctrico. La planta a gran escala se calienta mediante la circulación de líquidos reaccionantes a través de un alambique de tubería externa. Algunos procesos proponen un portador de calor circulante, vapor sobrecalentado, sales fundidas, arenas o guijarros, para calentar la carga (Scheirs & Kaminsky, 2006).

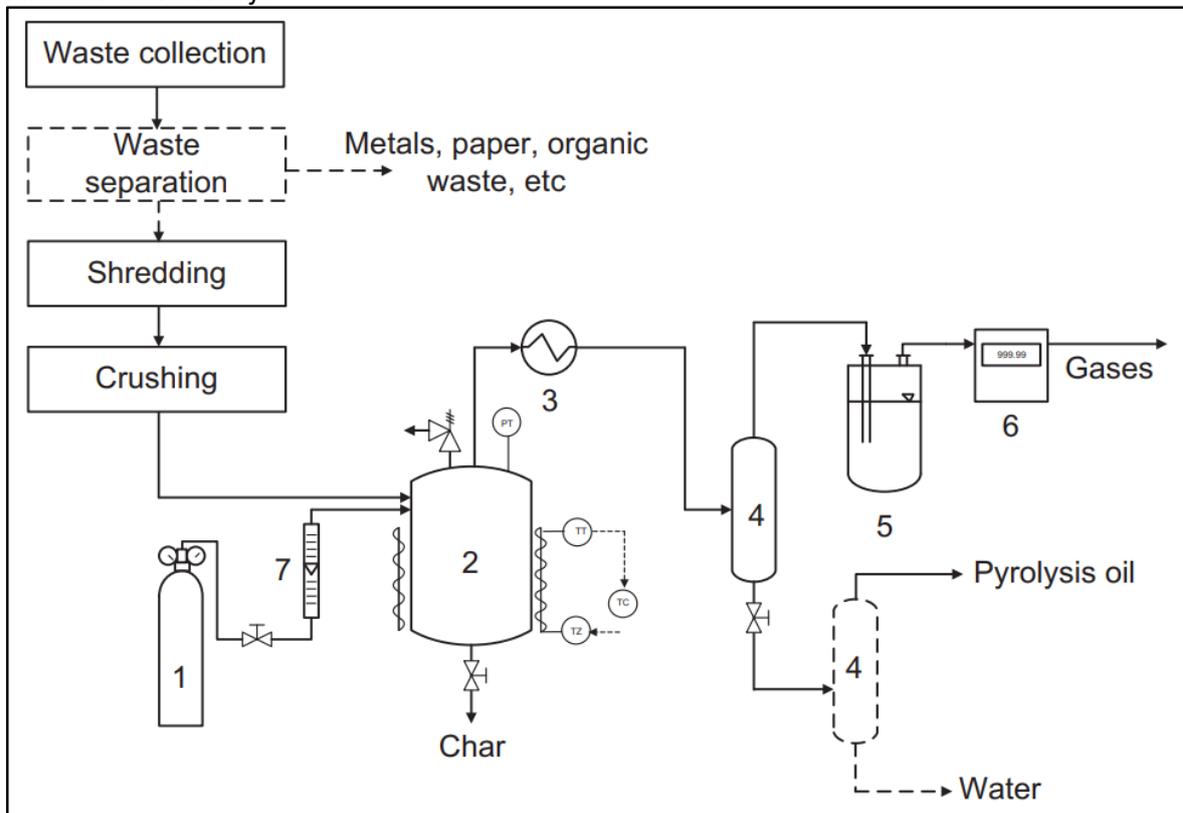
Figura 15
Reactor continuo de tanque agitado



Fuente: Tomado de (Kumagai et al., 2020)

2.1.7.5.4. Reactor Lecho Fijo. El reactor de lecho fijo se caracteriza por una mínima velocidad de calentamiento, como consecuencia de su bajo coeficiente de transferencia de calor, por este motivo, cuando se prueba una muestra de mayor masa, la temperatura dentro de la exhibición no es constante y la materia prima se descompone simultáneamente a varias temperaturas (Chen et al., 2014). Los reactores de lecho fijo se han utilizado principalmente para identificar los parámetros que rigen los productos de pirólisis, pero se han reportado pocas comparaciones con cambios masas de muestra, por lo que este reactor rara vez se adopta en instalaciones a escala comercial (Chen et al., 2014).

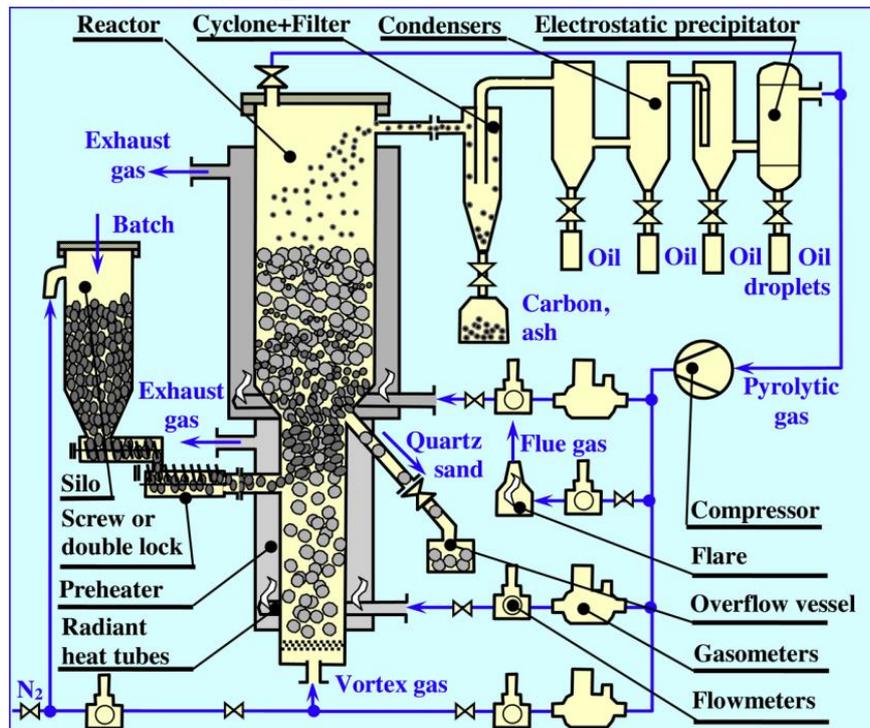
Figura 16
Reactor de lecho fijo



Fuente: Tomado de (Ateş et al., 2013)

2.1.7.5.5. Reactor Lecho fluidizado. El reactor de lecho fluidizado ha sido utilizado en una gran cantidad de plantas comerciales donde las burbujas o remolinos se crean cuando los productos gaseosos o el gas inerte fluyen a través de un tamiz de materia prima (Lewandowski et al., 2019). Las ventajas del reactor de lecho fluidizado son la homogeneidad tanto de la temperatura como de la composición, ya que sus parámetros claves que afectan la pirólisis y los productos vienen a ser las dimensiones del reactor y el material del lecho (Gao, 2010). Las tasas de transferencia de calor y masa en el reactor de lecho fluidizado son mucho más altas que las del lecho fijo, por lo que la baja conductividad térmica en los reactores de lecho fluidizado ya no es un problema (Gao, 2010)

Figura 17
Planta de pirólisis de lecho fluidizado



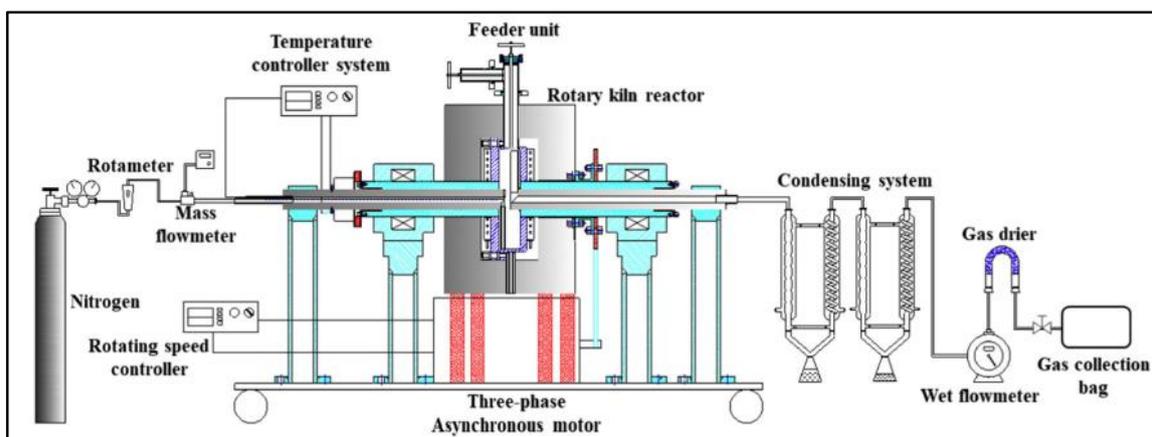
Fuente: Tomado de (Lewandowski et al., 2019)

Los reactores de lecho fluidizado son ampliamente adoptados como reactores de pirólisis para residuos plásticos municipales (MPW), como, por ejemplo, en el proceso de Hamburgo desarrollado por (Kaminsky, 1992) y el proceso de craqueo de polímeros de BP (Tukker et al., 1999). Arena & Mastellone, (2006) resumieron estos procesos para la

pirólisis de MPW, concluyendo que la tecnología de lecho fluidizado parece una tecnología madura y particularmente atractiva para la pirólisis de residuos plásticos.

2.1.7.5.6. Reactor Rotatorio. Los hornos rotatorios son una tecnología empleada en el ámbito de los procesos termoquímicos, y utilizadas con éxito en el proceso de pirólisis y mostraron varias ventajas, incluidas la construcción simple, control operativo fácil y alta flexibilidad de tipos y tamaños de materias primas (Zhang et al., 2020). El proceso de horno rotatorio es atractivo debido a su menor costo de capital. Hasta donde se sabe, no existe mucha información sobre la pirólisis de desechos plásticos en horno rotatorio. En la Figura 18 se muestra un diagrama de un sistema de pirólisis semi-batch con reactor tipo horno rotatorio.

Figura 18
Planta de pirólisis de horno rotatorio



Fuente: Tomado de (Zhang et al., 2020)

2.1.8. Productos de la pirólisis

La distribución química de los componentes de los productos está determinada por una serie de variables de proceso estudiadas en el presente trabajo de investigación. En la pirólisis de los residuos plásticos se obtienen un amplio rango de hidrocarburos que van desde el C_1 hasta el C_{50} , donde para una mezcla de plásticos se esperan productos gaseosos, líquidos y sólidos con alto poder calorífico (Morales, 2018).

2.1.8.1. Gases de pirólisis. Según Prabir, (2010), las deseables condiciones para maximizar la producción de gas en el proceso de pirólisis son altas temperaturas y tiempo de residencia prolongado. Los productos gaseosos están compuestos principalmente por hidrógeno, y compuestos orgánicos que van desde C1 hasta C5, con mayor porcentaje de metano (Roy, 2013). Se reportó que el gas producido a partir de la pirólisis de PE y PP tenía un poder calorífico entre 42 y 50 MJ/kg, por tal motivo, el gas de pirólisis tendría un alto potencial para ser utilizado como fuente de calor en plantas industriales de pirólisis (Jung et al., 2010).

2.1.8.2. Líquidos de pirólisis. De acuerdo con la bibliografía se sostiene que los productos de pirólisis de PE, PP y PS son principalmente hidrocarburos con pesos moleculares similares al rango de gasolina y diésel (Gao, 2010). Además, se encontró que los productos líquidos derivados de la pirólisis de plásticos tienen un mayor contenido de hidrocarburos insaturados y una menor estabilidad que los combustibles comerciales, es así que se considera que los productos pirolíticos son adecuados para una posterior refinación y poder ser utilizados por consumidores finales (Gao, 2010).

La composición de los aceites se determina mediante espectrometría infrarroja por transformada de Fourier y cromatografía de exclusión por tamaño. El análisis muestra la presencia principalmente de compuestos alifáticos con pequeñas cantidades de compuestos aromáticos (Scheirs & Kaminsky, 2006).

2.1.8.3. Sólidos. En general, una lenta velocidad de calentamiento a bajas temperaturas y el tiempo de residencia alargado favorecen la formación de coque en el proceso de pirólisis. Aunque la formación de carbón en el proceso de pirólisis rápida suele ser baja, es preciso tener en cuenta las propiedades y el uso del carbón para maximizar completamente el potencial de la pirólisis de residuos plásticos. Según experimentos realizados por (Jamradloedluk & Lertsatitthanakorn, 2014), el poder calorífico del carbón es de aproximadamente 18,84 MJ/kg para la pirólisis rápida del HDPE. Además, el bajo contenido de azufre lo hacía adecuado para ser utilizado como combustible, por ejemplo, en la combustión con carbón u otros desechos.

2.1.9. Calidad de los productos de la pirólisis

De la literatura es posible considerar que las propiedades fisicoquímicas de los productos líquidos de la pirólisis de las resinas plásticas son comparables con los combustibles comercializados en la industria energética, las cuales se asemejan en muchos parámetros. El poder calorífico de las resinas plásticas es estudiado, donde el PE, PP y PS mostraron valores por encima de 40 MJ/kg, mientras que el PET y PVC tuvieron valores debajo de 30 MJ/kg.

2.1.9.1. Propiedades Fisicoquímicas de los combustibles de pirólisis. La gravedad API es un método utilizado para medir la densidad del hidrocarburo en relación al agua y fue establecido por el American Petroleum Institute (API). Estos valores para los líquidos de pirólisis usualmente se encuentran entre 30 y 50, los cuales los ubican entre los valores comerciales de gasolina y diésel.

Otros valores como la viscosidad, así como el punto de fluidez y el punto de inflamación son propiedades propias de los hidrocarburos que indican su calidad en el transporte y las condiciones típica de fluidez y su inflamabilidad a determinadas temperatura.

También se indica los números de octano y cetano, como la calidad antidetonante de las gasolinas y el diésel respectivamente en sistemas de combustión en donde los valores fueron altos para los líquidos de pirólisis.

Por lo expuesto, Ahmad (Ahmad et al., 2015) concluyó que el producto líquido producido por HDPE y PP cumplía con el grado de combustible comercial y sugirió que sea destinado una mezcla del blending de hidrocarburos de gasolina y diésel.

2.2. Marco conceptual

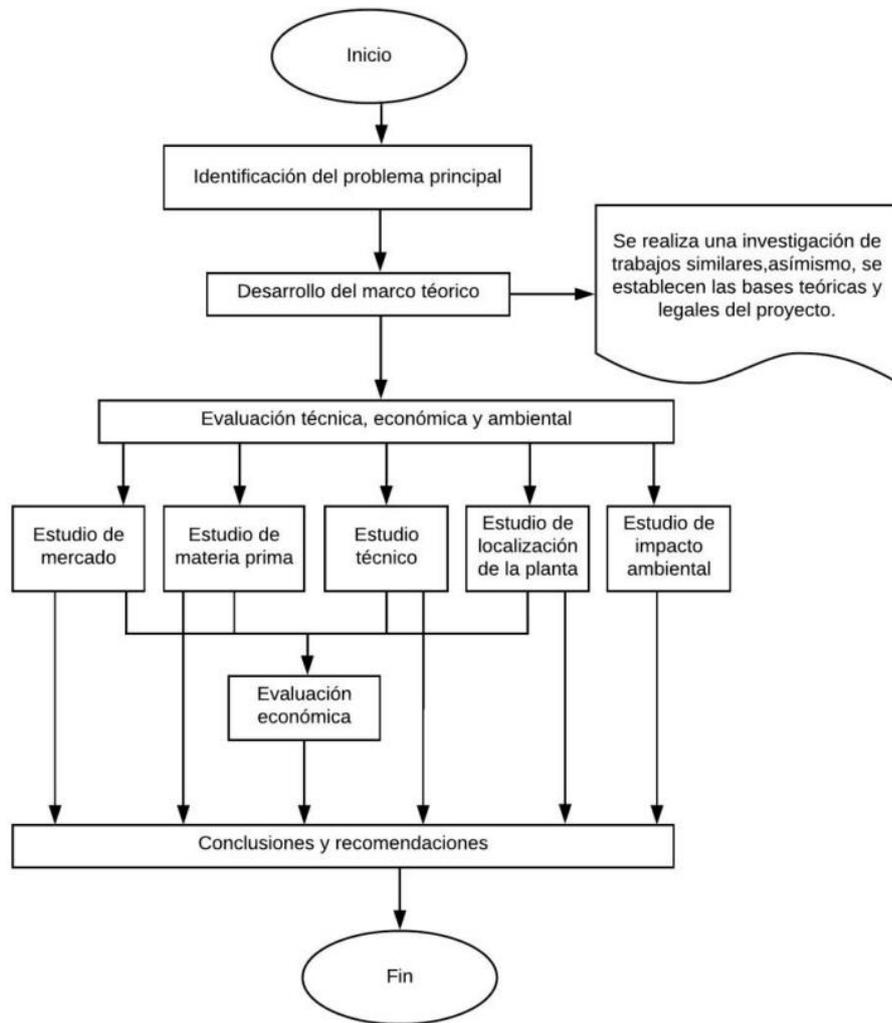
Para poder desarrollar un análisis técnico, económico y ambiental que permita determinar la viabilidad de implementar una instalación de pirólisis para producir petróleo sintético a partir de desechos plásticos se siguió la metodología empleada por (Cordova, 2021) que se muestra en la Figura 19 y que generó el siguiente procedimiento en esta investigación:

1. Se identificaron que los principales problemas del proyecto son la contaminación causada por los residuos plásticos en Lima y la balanza comercial negativa de hidrocarburos líquidos en el Perú, lo que implica diseñar una planta que brinde un sustituto del petróleo a partir de los residuos plásticos de la ciudad.
2. Se realizó un estudio teórico de las principales características de los plásticos y las condiciones operativas del proceso de pirólisis de plásticos, así como las principales variables que afectan el proceso. Además, se describen los principales sistemas de la planta y los equipos necesarios para la selección de la tecnología.
3. Se realizó un estudio de mercado sobre la disponibilidad de materia prima en la ciudad de Lima y Callao, la cual va a determinar la capacidad de la planta, así como la importación de estas resinas plásticas para evaluar su tendencia. También se realiza el estudio comercial del producto que se piensa sustituir el cual es el petróleo crudo, la producción nacional y reservas totales, que determinan la proyección en un horizonte de 10 años, así como la cantidad importada de este producto y el precio del petróleo actualmente.
4. Se evalúa la disponibilidad de materia prima, factor fundamental para la realización del proyecto donde se analiza la viabilidad en función a la cantidad de plástico importado, producido, residuos plásticos generados y recolectados.
5. En el estudio técnico se determinará la composición, la selección de la tecnología, la cual determinará la simulación del proceso usando el simulador

Aspen Hysys, que nos brindará los resultados de la calidad del producto, así como el balance de materia y energía. Se tomaron en cuenta la elección del reactor, los datos de conversión obtenidos por bibliografía y la selección de costos y gastos de operación de las tecnologías disponibles.

6. La localización del proyecto se determinó considerando factores como cercanía a la materia prima y también al mercado consumidor, en este caso una refinería. Entre otros factores como cercanía al puerto y rutas de transporte cercanas. Según estos factores se eligieron tres posibles ubicaciones y mediante un análisis cualitativo se eligió la más conveniente.
7. El estudio del impacto ambiental del proyecto se realiza utilizando la metodología de la matriz de Leopold, el cual consiste en desarrollar una matriz que valore de acuerdo con los posibles efectos en relación a determinados factores ambientales. Mediante este método se pudo establecer de manera cualitativa el impacto de las acciones de cada una de las etapas del proyecto.
8. La evaluación económica de esta investigación se realizó usando la información obtenida en los estudios de mercado, de materia prima, técnico y de localización de la Planta. En base a estos resultados primero se calcularon los ingresos y egresos del proyecto para luego realizar el flujo de caja y proceder a determinar los indicadores de rentabilidad. Finalmente, se desarrolló un estudio de sensibilidad con respecto al precio de venta del producto y la cantidad producida.
9. En base a los estudios realizados anteriormente se pudo obtener las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

Figura 19
Diagrama de flujo de metodología de investigación



Fuente: Tomado de (Cordova, 2021)

Capítulo III: Desarrollo del trabajo de investigación

3.1. Estudio de mercado

3.1.1. Mercado objetivo

3.1.1.1. Fuente de información para estudio de mercado objetivo. De acuerdo con Osinermin, no existen compañías que produzcan petróleo sintético de pirólisis en el Perú. Existen otras doce compañías tales como CNPC, Petrotal y Savia que producen petróleo en el Perú, un producto similar que también es adquirido del exterior como importaciones que será analizado como parte de la oferta.

3.1.1.2. Mercado objetivo involucrado. El producto que se ofrece está destinado a ser utilizado por la industria de refinación de hidrocarburos, por lo que las empresas que conforman el objeto de estudio son las que se concentran a estas actividades en la ciudad de Lima, de las cuales son: Refinería La Pampilla y Refinería Conchán.

3.1.2. Análisis de competidores

El análisis se realizó en base a proveedores internacionales que brindan crudo al país, ya que no existe una compañía nacional o internacional que produzca petróleo sintético.

Se recogió información del petróleo crudo importado del portal de Aduanet entre 2010 al 2019, de los cuales los principales proveedores de esta materia prima son mostrados en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8

Principales características de los crudos importados y procedencia

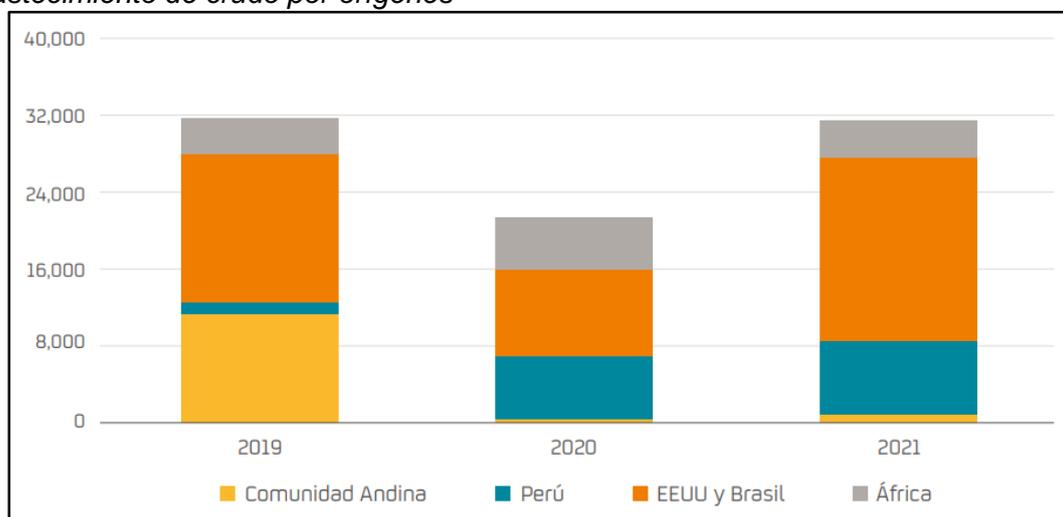
Origen	API	Azufre total, %wt
US - WTI	39.6	0.24
Ecuador	24.0	
Colombia	29.1	0.504
Nigeria - Bonny Light	33.4	0.16
Brasil - Buzios	28.4	0.31

Fuente: Tomado de (Morales et al., 2012)

En las memorias anuales de las principales refinerías del país, se encuentra la procedencia de los crudos importados.

3.1.2.1. Repsol. En 2021, Refinería La Pampilla compró un total de 31 153 mil barriles de crudo, de los cuales se percibió un incremento del 46% por resultado de la recuperación de la demanda por la pandemia del Covid, destacándose la adquisición de 7 381 mil barriles de crudo nacional Talara. Del total de crudo comprado, 18 947 miles de barriles provinieron de Estados Unidos y Brasil, 1 078 miles de barriles de la Comunidad Andina y 3 747 miles de barriles de África (Repsol Perú, 2021).

Figura 20
Abastecimiento de crudo por orígenes



Fuente: Tomado a partir de (Repsol Perú, 2021)

3.1.2.2. Petroperú. A causa de la proximidad del inicio de las operaciones de la nueva refinería de Talara, sus unidades de proceso se encuentran desocupadas al comienzo del año 2020. Por lo tanto, la adquisición de crudo ONO, al encontrarse desocupadas las unidades de proceso de la Refinería de Talara, se comercializa en los mercados nacionales e internacionales y se procesa en la refinería Conchán para satisfacer la demanda de solventes, asfaltos, IFO-380 y residuales. El principal proveedor de crudo para el 2020 fue Ecuador, seguido de Estados Unidos y Colombia; estos crudos fueron procesados en las refinerías de Talara y Conchán (PETROPERÚ S.A, 2021).

3.1.3. Definición del producto

El producto de pirólisis a comercializar consiste en la fracción líquida obtenida del procesamiento de residuos plásticos en un reactor. Este producto líquido será catalogado como petróleo sintético debido a las propiedades fisicoquímicas más relevantes comparadas con los tipos de petróleo que son comercializados e importados por las refinerías nacionales, las cuales poseen especificaciones requeridas que indican la calidad del producto a mercantilizar. En la Tabla 9 se muestran las propiedades mencionadas obtenidas por literatura (Chen et al., 2014; Khatha et al., 2020; Williams, 2006).

Tabla 9

Propiedades del crudo WTI y Brent vs Crudo de Pirólisis

Propiedad del combustible	Método (ASTM)	WTI	Brent	Crudo Sintético
Gravedad API a 60°F	D1298	40.8	38.6	40.2
Azufre total, %wt	D4294	0.34	0.391	0.0137
Agua y sedimentos, %V	D1796 o D95 y D473	<1	<1	0.1

Fuente: Tomado de (Khatha et al., 2020)

3.1.4. Estudio de la demanda

3.1.4.1. Comportamiento histórico de la demanda. Las refinerías del Perú procesan crudo nacional e importado, entonces para efectos del presente estudio es importante analizar la importación de crudo, el cual es el producto objetivo para reemplazar en parte con el producto fabricado en nuestra planta (petróleo sintético). En la Tabla 10 se tiene la cantidad de crudo importado procesado en las refinerías del Perú en Miles de Barriles Por Día desde el año 2008 hasta el 2020.

Tabla 10*Importación de petróleo en Miles de Barriles por día (MBLS)*

Año	Importación (MBLS)
2009	36 328
2010	34 741
2011	34 341
2012	33 065
2013	30 991
2014	30 453
2015	31 326
2016	34 489
2017	45 736
2018	41 117
2019	38 411
2020	14 891
2021	24 824

Fuente: Elaborado a partir de (MINEM, 2020)

El año 2020 fue inusual particularmente debido a la pandemia de coronavirus (COVID-19) y los cambios resultantes en los precios del petróleo y gas en los mercados internacionales. En marzo del 2020 se encontraron los primeros casos de coronavirus en el país y en cuestión de días el número de contagios aumentó exponencialmente, lo que generó graves complicaciones de salud a la población. Una profunda crisis en el sector energético, restringiendo la inversión de varias empresas, así como un desplome del precio de los hidrocarburos (en el mercado bursátil el WTI y el Brent alcanzaron valores negativos en abril 2020). Las actividades empezaron a reestablecerse gradualmente hacia finales del 2020, cuando se implementaron mejor los protocolos de salud y se redujo la curva de contagios. Para diciembre del 2020, el precio promedio por barril de WTI fue de 47 \$/bl y el Brent de 50 \$/bl (MINEM, 2020).

3.1.4.2. Procesamiento de petróleo importado en principales refinerías. Para el estudio se analizaron las refinerías de la costa del Perú, entre las cuales se encuentran: Refinería La Pampilla, Refinería Talara y Refinería Conchán.

Como se observa en la Tabla 11, la Refinería La Pampilla es la refinería que procesa en su mayoría carga importada, llegando a alcanzar en el año 2019, 96% de su crudo procesado proveniente de importación. El año 2020 esa cifra disminuyó, tanto en la refinería La Pampilla como en Refinería Conchán, debido a que las unidades de Refinería Talara se mantuvieron fuera de servicio y el crudo antes procesado en Talara fue transportado a estas refinerías como carga (MINEM, 2020).

3.1.4.3. Proyección de la demanda. Se elaboró la proyección de la demanda hasta el año 2033, donde se realizó una línea de tendencia de forma lineal que muestre una previsión de la demanda conforme su comportamiento histórico en los últimos años.

Tabla 11

Porcentaje de carga de petróleo importado en refinerías

Año	Talara (%)	La Pampilla (%)	Conchán (%)
2009	22	95	25
2010	25	79	25
2011	24	77	27
2012	23	79	27
2013	22	79	26
2014	19	78	21
2015	28	73	16
2016	35	73	17
2017	27	84	12
2018	23	80	12
2019	34	96	90
2020	-	70	41

Fuente: Tomado de (MINEM, 2020)

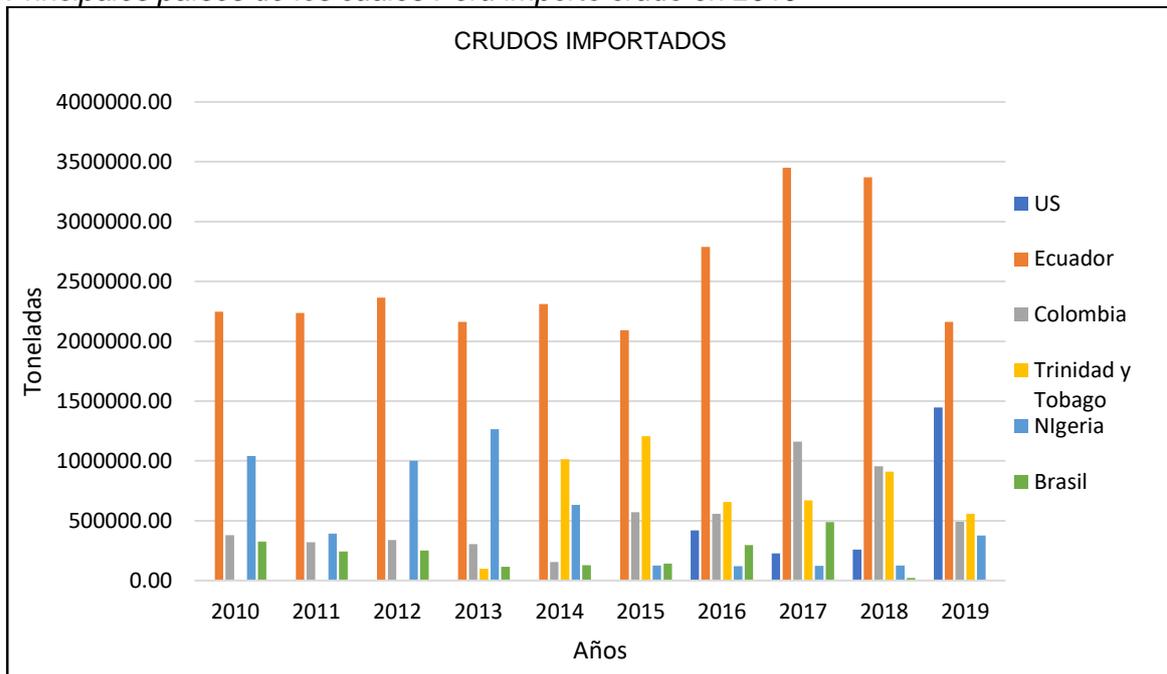
3.1.5. Estudio de la oferta

3.1.5.1. Clasificación de la oferta. La oferta del producto se distingue debido a la falta de productores de este bien. Debido a las características del crudo sintético, el cual servirá como materia prima para seguir con su proceso de destilación y obtener productos de mayor valor agregado, tendrá que competir contra la oferta de las otras materias primas similares, en este caso, el petróleo crudo.

3.1.5.2. Factores principales que afectan la oferta. Como se indicó anteriormente se analizará principalmente la oferta de crudo en nuestro territorio. El Perú es un país que consume su propio crudo y a su vez importa una gran cantidad de este para su procesamiento por lo que la oferta principalmente se verá afectada por la producción de crudo nacional y exportación de crudo de los principales países que venden este producto a nuestro país.

Figura 21

Principales países de los cuales Perú importó crudo en 2019

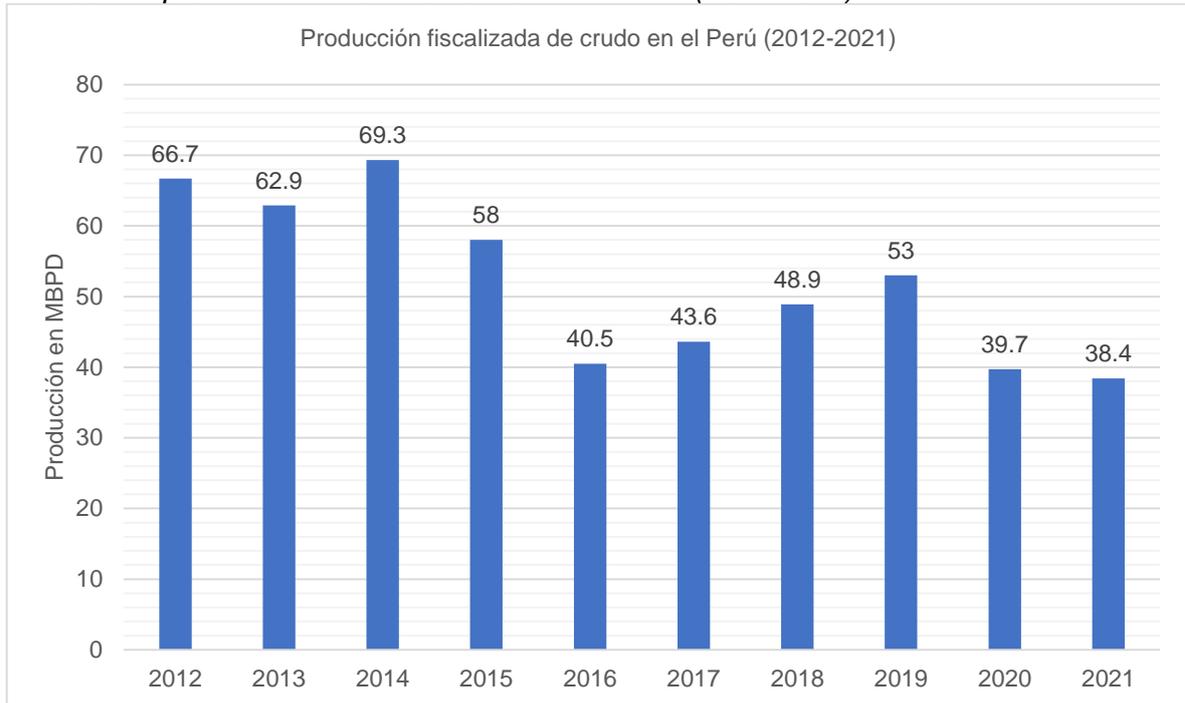


Fuente: Tomado de (SUNAT, 2020)

3.1.5.3. Comportamiento de la producción de petróleo crudo en el Perú. A partir del 2015 la producción nacional de hidrocarburos líquidos fue bajando hasta el año 2019, sin embargo, pareciera que tiende a haber una tendencia creciente en la producción hasta el 16 de marzo, día en que inició la inmovilización por el estado de emergencia en el Perú. Aun así, se puede considerar que la producción de Hidrocarburos continuará en aumento, aunque de igual forma depende de los contratos de exploración y explotación de lotes en nuestro país.

Figura 22

Producción promedio de crudo en el Perú en MBPD (2012-2021)



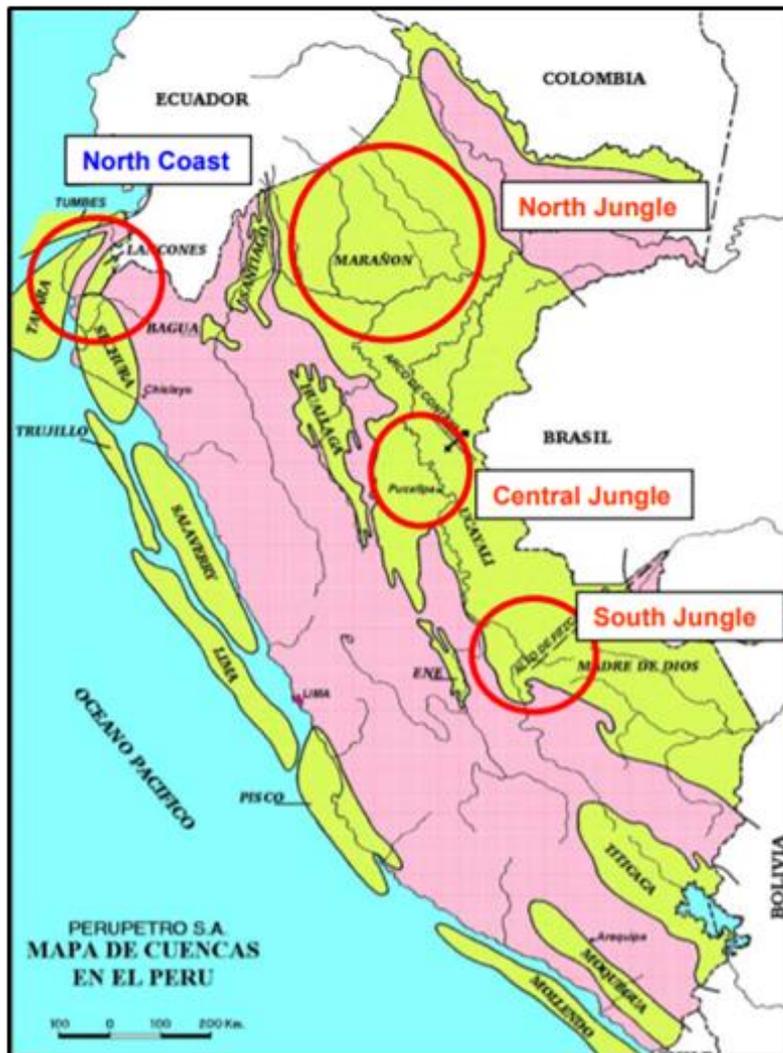
Fuente: Elaboración Propia con datos del MINEM

3.1.5.4. Contratos de exploración y explotación vigentes. Como podemos ver en el Anexo 2 en el Perú están en vigencia 58 contratos de exploración. Los principales yacimientos petrolíferos están ubicados en la selva peruana con un potencial alto de obtener crudo pesado.

Del mismo modo, en el Anexo 3, podemos ver que actualmente existen 104 contratos de explotación vigentes los cuales, en el territorio peruano se concentran 4 principales zonas como se puede apreciar en la Figura 23.

Figura 23

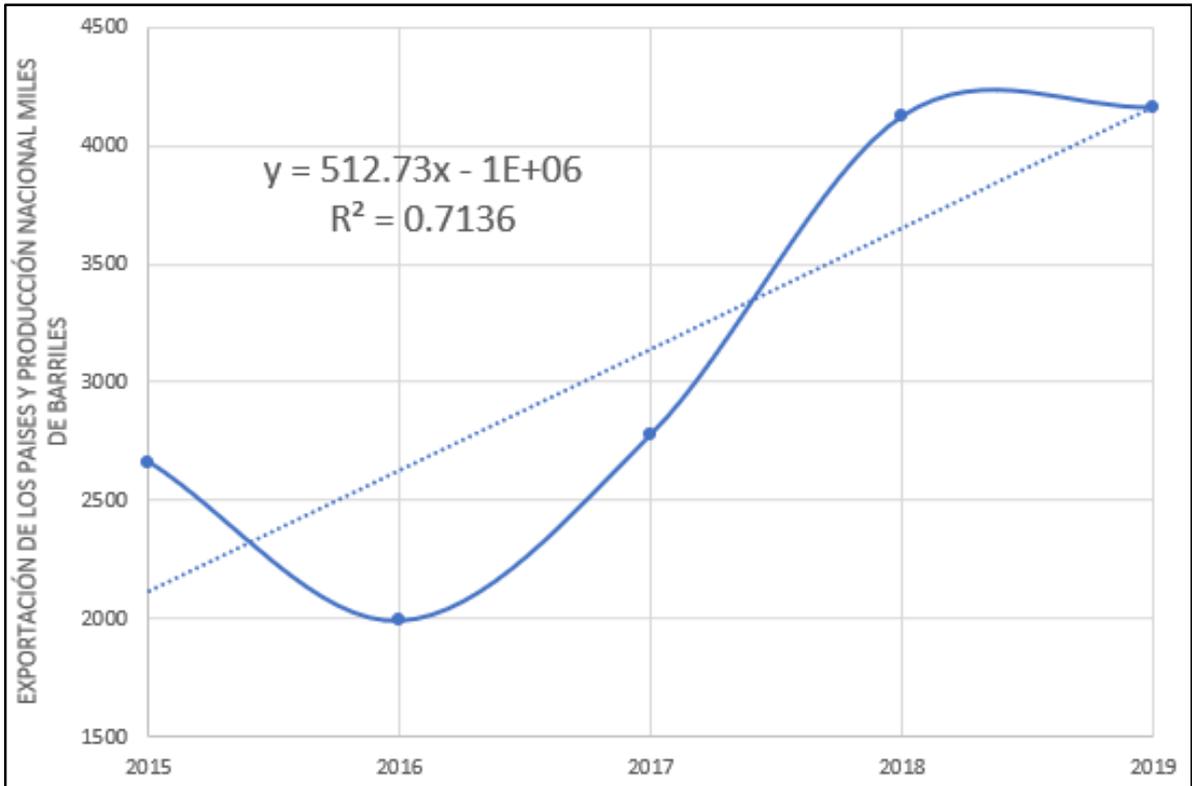
Zonas de principal extracción de crudo en el territorio peruano



Fuente: Tomado de (PERUPETRO, 2010)

3.1.5.5. Comportamiento de la oferta nacional de crudo. Según las Tablas del Anexo I donde se tienen las exportaciones de crudo de los principales países a los cuales importa Perú y juntando con el valor en dólares de la producción de crudo no exportados de nuestro país, se tiene el siguiente comportamiento de la oferta en los últimos años que se muestra en la Figura 24.

Figura 24
Comportamiento histórico de la oferta



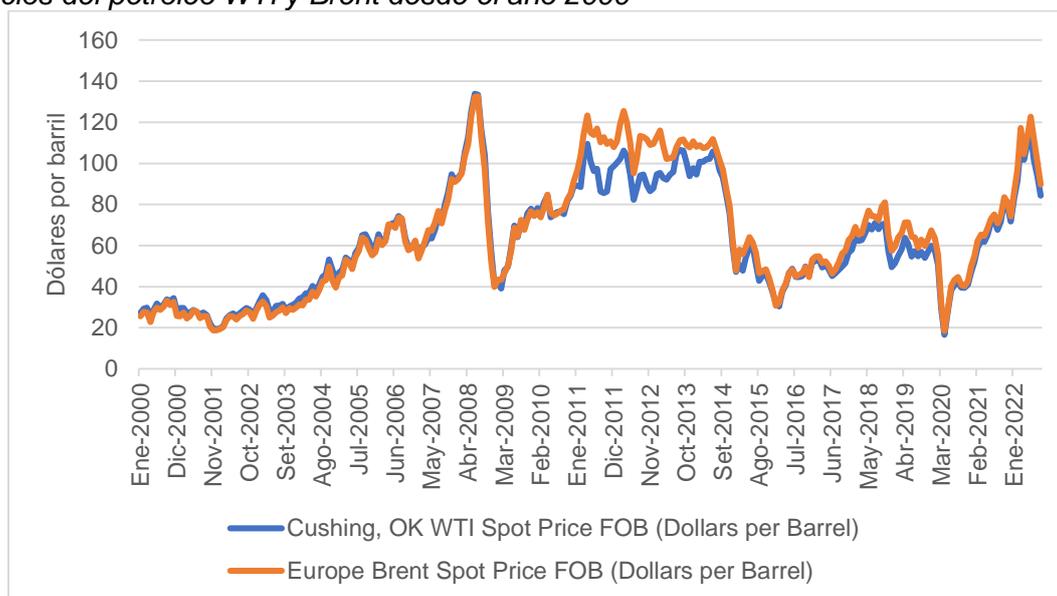
Fuente: Elaboración propia a partir de (MINEM, 2019)

3.1.6. Estudio del precio

El costo de los productos comparables se tendrá en cuenta al determinar los precios. Se tomará como producto estándar al Petróleo WTI ya que cumple con propiedades físicas y químicas similares, de acuerdo con la Tabla 9.

3.1.6.1. Comportamiento histórico del precio. Los datos extraídos de las bases de datos de la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (EIA, 2020) muestran como se ha comportado la demanda nacional durante los últimos 20 años en la Figura 25.

Figura 25
Precios del petróleo WTI y Brent desde el año 2000



Fuente: Tomado de (EIA, 2022)

La Figura 25 permite observar claramente el comportamiento que tuvo el precio del petróleo de acuerdo con los acontecimientos históricos como la crisis del 2008 y también en el 2014 por el shale oil. Finalmente se muestra la última caída del precio del petróleo en el 2020, que coincide con la pandemia desatada por el coronavirus y la crisis del precio del crudo, para luego tener un incremento en los años posteriores.

3.1.6.2. Precio actual. Según la EIA, (2022), el crudo WTI cerró la semana del 14.11.2022 al 18.11.2022, con un precio promedio de 85.85 \$/bl. Por otro lado, el crudo Brent cerró la semana del 14.11.2022 al 18.11.2022, con un precio promedio de 93.59 \$/bl.

También se considerará que el costo de producción tiene un impacto significativo en el precio; este análisis se realizará luego de enumerar los costos directos e indirectos.

3.1.6.3. Proyección del precio. Según el pronóstico de la (EIA, 2022), el precio nominal del crudo Brent caerá a \$ 66 por barril para 2025. Para el año 2030, se estima que la demanda global lleve los precios del Brent a \$ 89 por barril. Para el año 2040, se pronostica que los precios sean de \$ 132 por barril. En ese momento, las fuentes de petróleo barato habrán disminuido, lo que dificultará la extracción. Para el año 2050, los precios del petróleo podrían ser de \$ 185 por barril.

Se espera que el precio del WTI por barril caiga a \$64 por barril para el año 2025, con un incremento al 2030 de \$ 86 por barril, \$ 128 el barril para el 2040 y \$ 178 por barril para el 2050.

La EIA predice que la demanda de petróleo se estabilizará a medida que las empresas del sector público se vuelvan más dependientes del gas natural y las fuentes de energía renovable. También asume que la economía crece aproximadamente un 1.9% anual, mientras que el uso anual de energía se reduce en un 0.4% (IEA, 2021).

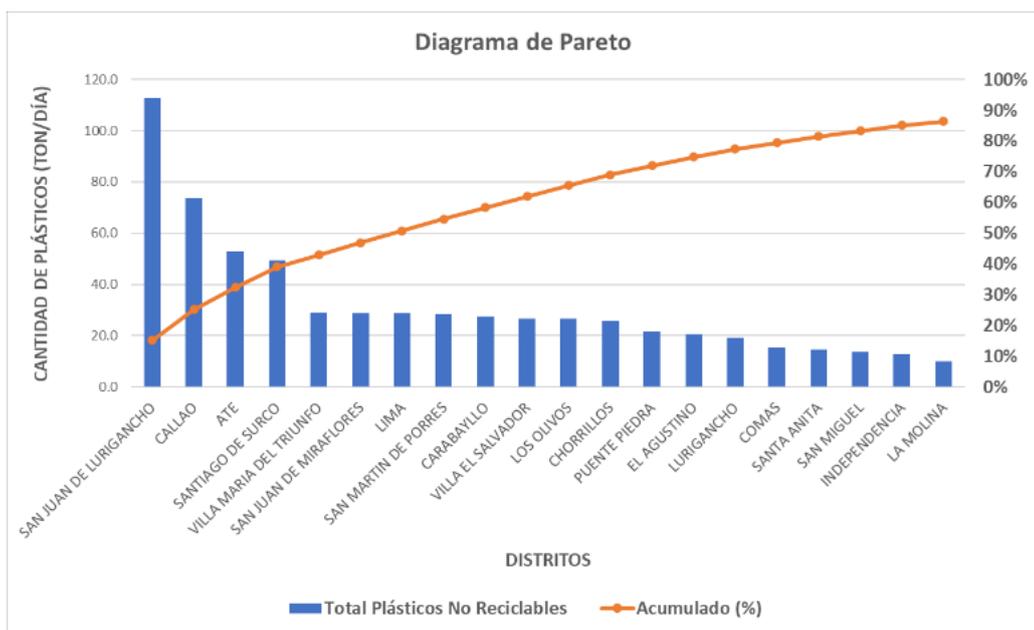
3.2. Materia prima

3.2.1. Disponibilidad de la materia prima para el proyecto

De todos los residuos plásticos dentro de los residuos sólidos generados, en el Perú se recicla el 4% de las 900 mil toneladas desechadas anualmente, según el MINAM (MINAM & OPS, 2015). Por lo tanto, de las 740 toneladas generadas diariamente en Lima, se dispondría de 710 toneladas de residuos plásticos no reciclables. Se seleccionará una zona de Lima que disponga de grandes cantidades de residuos plásticos de los distritos aledaños para la localización de la planta. En la Figura 26 se muestra el diagrama de Pareto de la generación de residuos plásticos de los distritos de Lima.

Figura 26

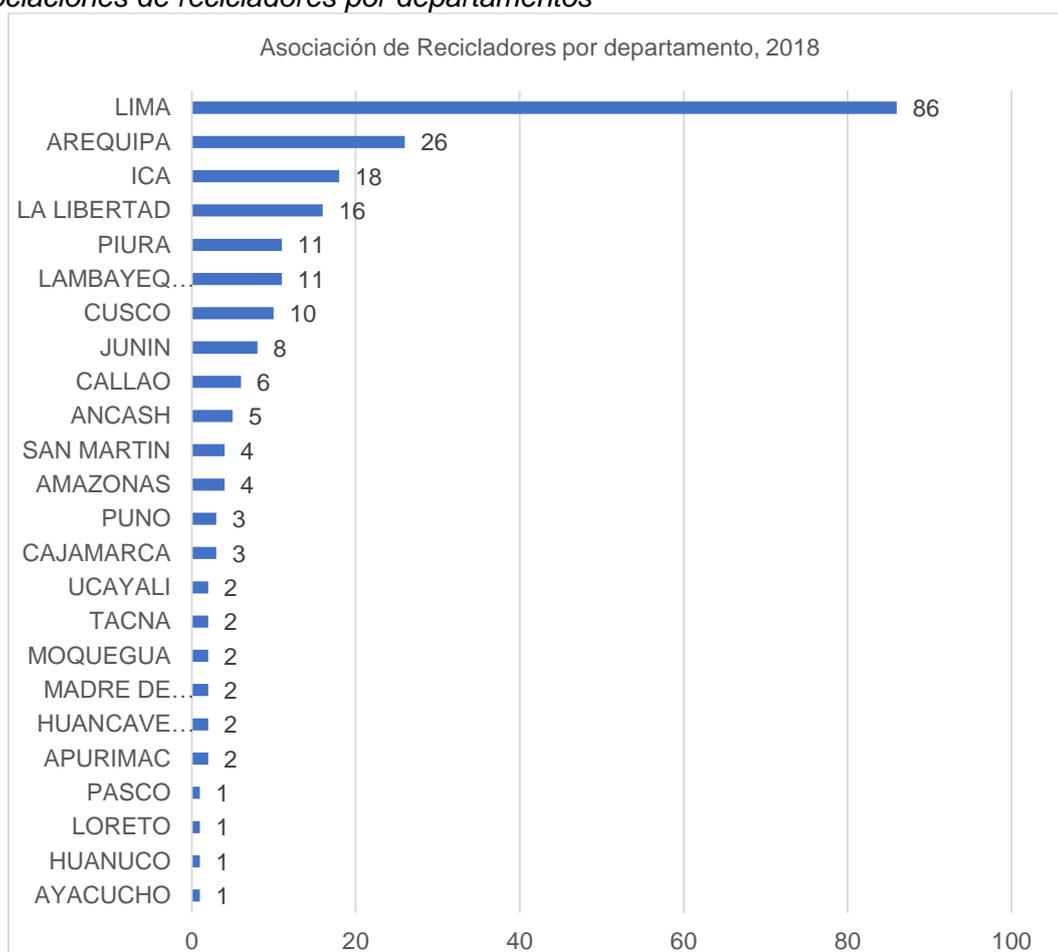
Diagrama de Pareto de la cantidad de residuos plásticos generados en Lima y Callao



Fuente: Elaboración propia a partir de (SIGERSOL, 2018)

3.2.1.1. Reciclaje de residuos sólidos en el Perú. Se tiene la cantidad de asociaciones de recicladores por departamentos en la cual Lima destaca con 86 asociaciones según el MINAM (MINAM, 2019). Se muestran además el registro de asociaciones en los departamentos del Perú hasta el año 2018.

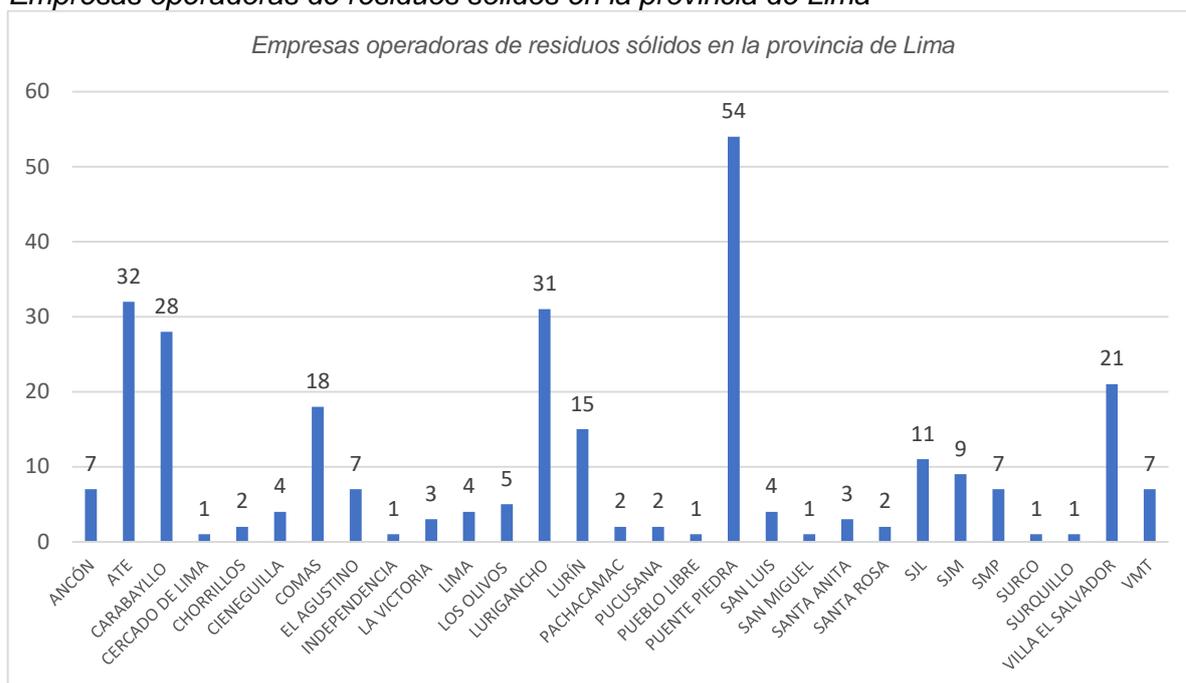
Figura 27
Asociaciones de recicladores por departamentos



Fuente: Tomado de (MINAM, 2019)

3.2.1.2. Empresas Operadoras de residuos sólidos. Según el registro de empresas operadoras de residuos sólidos en la provincia de Lima publicados por el MINAM (MINAM, 2019) en el año 2019 existen 284 empresas operadoras autorizadas que concentran sus actividades principalmente en la recolección y transporte de los residuos sólidos.

Figura 28
Empresas operadoras de residuos sólidos en la provincia de Lima



Fuente: Tomado de (MINAM, 2019)

Como se puede apreciar en la Figura 28 una importante concentración de empresas operadoras realizan sus actividades en distritos de Lima Norte, factor a tomar en cuenta en la valorización de la ubicación del desarrollo del proyecto.

3.2.2. Importación de resinas plásticas en el Perú

En el Perú, dado el inexistente desarrollo de la industria petroquímica, el sector de productos plásticos se encarga de transformar las resinas plásticas importadas en productos plásticos finales. En la siguiente figura se muestran las resinas plásticas importadas y su respectivo precio CIF (Millones de \$ CIF).

Figura 29*Importaciones de la industria de plástico por producto en el Perú*

Partida	Descripción	2018	2019	2020
3902100000	Polímeros de polipropileno	280.4	215.5	196.8
3901200000	Polietileno de densidad mayor o igual a 0.94	226.8	176.9	168.9
3926909090	Demás manufacturas de plásticos	128.2	139.3	150.9
3901100000	Polietileno de densidad menor a 0.94	205.7	153.2	150.8
3904102000	Policloruro de vinilo por polimerización en suspensión	129.5	127.8	107.5
3907619000	Demás productos de Politereftalato de etileno	160.1	152.6	97.4
3902300000	Copolímeros de propileno	103.2	87.5	75.1
3906909000	Demás polímeros acrílicos	42.1	43.0	40.4
3919909000	Demás placas, láminas, hojas y tiras de formas planas	45.0	47.7	38.8
3907699000	Demás productos de Politereftalato de etileno	42.8	40.0	36.2
3901400000	Copolímeros de etileno y alfa-olefina densidad menor a 0,94	20.7	22.8	34.3
3920100000	Demás placas, láminas, hojas y tiras de polímeros de etileno	33.9	32.1	33.0
3924109000	Demás vajillas y artículos para el servicio de mesa o cocina	32.0	32.0	28.4
3907203000	Poliéteres polioles derivados del óxido de propileno	24.4	23.1	28.4
3923509000	Demás tapones, tapas, cápsulas y dispositivos de cierre	27.5	29.2	27.9
Resto de partidas		746.7	766.2	711.1
Total		2249	2089	1926

Fuente: Tomado de (INEI, 2020)

3.2.3. Caracterización de la materia prima

La materia prima en la alimentación del proceso implica una mezcla de residuos plásticos, para lo cual se estima la caracterización de la materia prima en base a un estudio de la composición de los residuos plásticos municipales de la resina plástica en España (Urionabarrenechea, 2011) y se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12*Composición de mezcla de polímeros de centro de reciclaje en España*

Resina de Plástico	Composición molecular (%)
Polietileno (PE)	39.5
Polipropileno (PP)	34.2
Poliestireno (PS)	16.2
Policloruro de vinilo (PVC)	4.2
Tereftalato de polietileno (PET)	2.9
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	2.2
Otros	0.8

Fuente: Tomado de (Urionabarrenechea, 2011)

3.2.4. *Compatibilidad de la materia prima al proceso de pirólisis*

La pirólisis de polietileno y polipropileno pueden producir un combustible de manera limpia y eficiente, mientras que la pirólisis del PVC puede ser problemática (Akenji & Bengtsson, 2019). El cloro en el PVC se encuentra principalmente en forma de cloro orgánico, y en la atmósfera de pirólisis, los compuestos de cloro, como el HCl, se liberan durante la conversión térmica del PVC a 350°C, con riesgos para el equipo de proceso, el medio ambiente y salud humana. La pirólisis de PET también es problemática, ya que libera oxígeno, lo que afecta la velocidad del proceso (Akenji & Bengtsson, 2019). El reciclaje del PET se realiza mejor a través del reciclaje secundario con métodos tradicionales. Los tipos de materias primas plásticas y sus correspondientes características que son consideradas en el proceso de pirólisis se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Compatibilidad de resinas de plásticos al proceso de pirólisis

Resina plástica	Aplicaciones	Punto de Fusión (°C)	Densidad (g/cm ³)	Compatibilidad para Pirólisis	Comentarios
Poliestireno 	Envases para productos lácteos, vasos descartables, bandejas de mercado, máquinas para afeitar descartables, platos descartables, menaje, juguetes, cassettes.	70 – 115	1.04 – 1.09	Muy buena y de excelentes propiedades	Temperaturas bajas requeridas comparadas con el PP y PE. Producción menor de aceite comparado con el PE y PP.
Polietileno 	HDPE: Envases detergentes, aceites para motores, envases lácteos, bolsas, menaje, cajas de gaseosas, cervezas, baldes de pintura, helados, cañerías de gas, agua, drenaje y uso sanitario. LDPE: Bolsas de todo tipo, láminas para invernaderos, pañales descartables, bolsas de suero, contenedores herméticos.	HDPE 125 – 135 LDPE 110 – 120	HDPE 0.95 – 0.97 LDPE 0.91 – 0.94	Muy buena	La temperatura que se requiere es alta (> 500°C) en virtud a su estructura de cadena ramificada. En la pirólisis térmica se convierte en wax en lugar de aceite líquido. En la pirólisis catalítica la formación de cera se produce en el exterior del catalizador, mientras que la formación de gases y líquidos ocurre en el interior del catalizador.
Polipropileno 	Láminas para alimentos, dulces e indumentaria, rafia tejida, envases plásticos, tapas de botellas, envases, cajas de bebidas, baldes de pintura, fibras de tapicería, cajas para baterías.	160 – 170	0.90 – 0.91	Excelente	Requiere alta temperatura Después de PE es difícil lograr la pirólisis térmica del PP En pirólisis catalítica produce un rendimiento líquido con altos compuestos aromáticos.
Policloruro de Vinilo 	Botellas de aceites, agua de mesa, etc. Tuberías de agua, desagüe, suelas de zapato, sandalias, botas de PVC, capas, tapas para libros, artículos de oficina, etc.	150 – 200	1.16 – 1.45	No es adecuada. Pocos estudios se realizaron por científicos	Produce gas ácido clorhídrico. Declaración por baja temperatura (250–320 °C) o por adsorción física o química. En pirólisis catalítica la presencia de cloro y la deposición de coque afectan la actividad catalítica del catalizador.
Tereftalato de Polietileno 	Envases de bebidas, agua, aceites de vinagre, cosméticos, fibras sintéticas textiles, láminas barrera, productos alimenticios, bandejas de microondas, geotextiles (para pavimentos y caminos), láminas radiográficas	250 – 270	1.37 – 1.40	No es adecuada	Tiene heteroátomos

Fuente: Tomado de (Urionabarrenechea, 2011)

3.3. Estudio técnico

3.3.1. Disponibilidad de tecnologías

Existen cuatro categorías amplias para el reciclaje de plásticos y ocho categorías para el reciclaje de tecnologías químicas según (Kumar et al., 2011). Las tecnologías presentadas en la Tabla 14 son en base a la literatura obtenida sobre el proceso de reaprovechamiento de residuos plásticos.

En respuesta, a los problemas ambientales asociados con los residuos plásticos, (Kumar et al., 2011) clasifica cuatro categorías generales de reciclaje de plástico y ocho categorías de tecnologías de procesamiento químico, en la cual el análisis de disponibilidad de tecnología se enfoca en las de craqueo térmico y gasificación, como se muestran en la Figura 9, en el cual el proceso termoquímico de pirólisis se denomina reciclaje terciario. Además se mencionan las ventajas y desventajas de las tecnologías presentadas en el estudio técnico realizado.

3.3.2. Selección de tecnología

De la literatura se extrajeron 15 empresas relacionadas a la industria de pirólisis de residuos plásticos que actualmente operan 87 plantas en el mundo para la producción de combustibles a partir de plásticos (Stclair-Pearce & Garbett, 2018). Las plantas de residuos plásticos para combustible revisadas datan del año 2000 (Klean Industries en Japón) hasta la más reciente en 2015 (Vadxx en EE. UU.). La base científica utilizada por todas estas empresas es esencialmente la misma y se basa en métodos probados.

Tabla 14*Ventajas y desventajas de las tecnologías de craqueo y gasificación analizadas en el estudio*

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Escala de instalaciones disponibles
Craqueo Térmico (Pirólisis convencional)	Tecnología simple Proceso simple Adecuado para residuos plásticos que son difíciles de despolimerizar	Complejidad de las reacciones Altos requerimientos de energía No admite PVC y PET Sensibilidad a contaminación de alimentación Productos necesitan ser refinados para consumo final	Operación a escala comercial
Craqueo Catalítico	En comparación con el craqueo térmico: Menor temperatura de operación Mayor rendimiento de productos Menores tiempos de reacción Posible reducción en costos de producción Posible reducción en consumo energético Productos con similares propiedades de combustibles fósiles Catalizadores ayudan a optimizar distribución y selectividad de productos Alta conversión de residuos plásticos	Sensibilidad a contaminación en cargas de alimentación Componentes clorados y nitrogenados pueden desactivar el catalizador Materia orgánica en residuos plásticos puede bloquear los poros del catalizador Requiere un pretratamiento usualmente	Operación a escala comercial
Hidrocraqueo	Alta calidad de los productos	Alto costo del hidrógeno Envenenamiento en el proceso de hidrocraqueo del PVC Alta inversión y costos operativos	Operación a escala piloto
Gasificación	Posible rompimiento de polímeros muy definida para hidrógeno y metano Múltiples aplicaciones del producto gaseoso Adecuado para mezclas de residuos plásticos Tecnología bien establecida La gasificación pura de oxígeno genera gas de síntesis libre de nitrógeno atmosférico que puede ser usado para aplicaciones de síntesis y producción de nuevos productos plásticos Posible producción de hidrógeno del vapor de gasificación	El producto gaseoso requiere mejorar la calidad para un consumo posterior Requiere grandes volúmenes de alimentación para ser viable Char y tar en productos gaseosos Altos consumo de energía y costos Gasificación con oxígeno puro requiere separación del oxígeno del aire que tiene altos costos	Operación a escala comercial

Fuente: Tomado de (Solis & Silveira, 2020)

Conforme a las tecnologías presentadas por las distintas compañías listadas en la Tabla 15, se observa la similitud de las diferentes patentes que utilizan el mismo principio de pirólisis, y sus diferencias se basan en el uso de catalizador y/o equipos que permitirán un producto de mejores propiedades para su utilización en la industria petroquímica, así como de mejores propiedades para ser comercializados como combustibles.

Debido a lo mencionado, se decide elaborar un diseño propio basado en el mismo principio adquirida por las empresas productoras de combustibles o productos de valor comercial elaborados a partir del proceso de pirólisis de residuos plásticos, rescatando las características que se ajusten de mejor manera a nuestro proceso y objetivos del proyecto.

3.3.3. Definición del tamaño del proyecto

El tamaño de la planta se determina en función de la disponibilidad de materias primas y tecnologías disponibles para una planta de pirólisis a escala comercial. De acuerdo con la bibliografía se desarrollará el estudio para una planta con capacidad de 25 000 toneladas anuales de residuos plásticos. Se procesará diariamente 60 toneladas de plásticos para una producción aproximada de 400 barriles por día de producto líquido (Villela, 2013). Por lo antes mencionado, se tomará como carga de alimentación 2 500 kg/hr de residuo plástico conformado por resinas de PE, PP y PS.

Tabla 15*Tecnologías disponibles de pirólisis y características principales de las plantas de proceso*

Compañía	Escala (tpa de carga)	Materia prima	Rendimiento (%)	Calidad	CAPEX	OPEX	Periodo de operación
Agilyx	1 000-10 000	Rango limitado de plásticos	> 70	Crudo sintético	£500-1 000	N/A	2-5 años
Anhui Orsun Env	1 000-10 000	Rango limitado de plásticos	> 50	Combustible	> £2 000	£50-100	> 5 años
Blest	1 000-10 000	Rango limitado de plásticos	> 70	Crudo sintético	£1 000-2 000	< £500	> 5 años
Climax Global Energy	1 000-10 000	Residuos relevantes municipales	> 70	Crudo sintético	£500-1 000	£50-100	N/A
Cynar	1 000-10 000	Rango limitado de plásticos	> 50	Combustible	£1 000-2 000	£100-200	2-5 años
Envion	> 10 000	Rango limitado de plásticos	> 70	Crudo sintético	£1 000-2 000	£50-100	2-5 años
KiOR	> 10 000	Rango limitado de plásticos	> 70	Crudo sintético	£500-1 000	N/A	1-2 años
Klean Industries	1 000-10 000	Rango limitado de plásticos	> 70	N/A	> £2 000	> £200	> 5 años
Niutech energy	> 10 000	Rango limitado de plásticos	> 30	N/A	N/A	N/A	N/A
PARC	> 10 000	Rango limitado de plásticos	> 50	Crudo sintético	N/A	N/A	> 5 años
Plastic2Oil	1 000-10 000	Rango limitado de plásticos	> 70	Mezcla de destilado	N/A	N/A	1-2 años
Plastoil	1 000-10 000	Rango limitado de plásticos	> 30	N/A	N/A	N/A	1-2 años
Polyflow	100-1 000	Rango limitado de plásticos	> 70	Mezcla de destilado	N/A	N/A	< 1 año
Promeco	> 10 000	Residuos relevantes municipales	> 70	Mezcla de destilado	N/A	N/A	1-2 años
Vadxx	> 10 000	Rango limitado de plásticos	> 70	Combustible	N/A	N/A	> 5 años

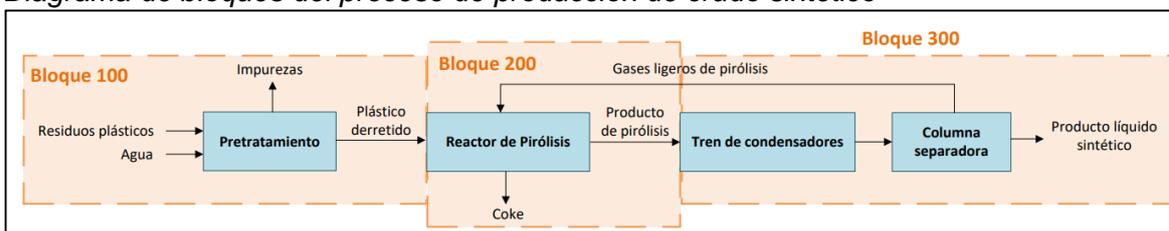
Fuente: Elaborado a partir de (Haig et al., 2015).

3.3.4. Descripción del proceso tecnológico seleccionado

Se propone un diseño propio elaborado a partir del principio de pirólisis térmica de residuos plásticos que desarrolla los procesos de trituración, derretimiento, craqueo, destilado, condensado y separación de residuos plásticos para la producción de líquido de pirólisis sintético con características similares a un crudo comercial ultraligero. En la siguiente Figura 30 se muestra el diagrama de bloques del proceso de pirólisis escogido.

Figura 30

Diagrama de bloques del proceso de producción de crudo sintético



Fuente: Elaboración propia

Todos los productos se recuperan al en su totalidad durante el proceso de pirólisis en circuito cerrado, que se lleva a cabo en reactores, equipos e instalaciones completamente sellados herméticamente. A continuación, se describen las actividades detalladamente.

3.3.4.1. Recolección y clasificación de residuos plásticos. Se recolectan los residuos plásticos en los centros de recolección y acopio, se coordina con las empresas productoras y generadoras de plásticos. Como el material recogido contendrá materiales diversos, posteriormente se lo separará y clasificará de acuerdo al material de origen. Por lo general no existe una clasificación por resinas plásticas ya que los productos plásticos son mezclas de resinas y plastificantes y su separación se da por elementos, ya sean botellas, envases, piezas, entre otros, que están clasificados como plásticos duros.

3.3.4.2. Almacenamiento de materia prima. Se dispone de una zona destinada al almacenamiento de los residuos plásticos recolectados, con un almacenamiento fijo de carga para meses en caso no se logren las recolecciones diarias de residuos plásticos.

3.3.4.3. Pretratamiento. Si existe una contaminación severa de los productos, es necesario construir una zona para la limpieza de residuos plásticos. La materia prima es molida y triturada en una tolva que traslada la materia prima hacia el reactor de pirólisis mediante una faja (Timana et al., 2022). Existe una etapa de pre-derretimiento de la carga de alimentación que purifica la concentración de plásticos y elimina impurezas, de esta manera se logra obtener un ingreso de plástico altamente puro a la entrada del reactor de pirólisis para una óptima conversión.

3.3.4.4. Alimentación en el reactor. Primero se carga el reactor con los residuos plásticos triturados transportados mediante la faja. La carga ingresa con un tamaño entre 10 mm a 20 mm, los cuales son llamados pellets. Este tamaño ideal será clave para una alta conversión de este producto a determinadas condiciones de temperatura y presión.

3.3.4.5. Pirólisis. La etapa de pirólisis consta de un reactor en la parte interior en el cual se mantiene en un rango de temperatura adecuado para la mezcla de materia prima, esta temperatura varía entre 450°C y 500°C. La selección del reactor será de lecho fluidizado para el proceso termoquímico de pirólisis ya que es el reactor que se adapta de mejor forma al proyecto. El combustible se enciende en la cámara de combustión, el combustible usado en los quemadores puede ser diésel, gas natural o GLP, en este escenario se utilizará gas de combustión obtenido por el mismo proceso. En la simulación se muestra que el gas de combustión producido solo abastece aproximadamente la mitad de la carga calórica necesaria, por lo que la energía restante será proporcionada por servicios de gas natural externos.

3.3.4.6. Torre separadora. Una vez obtenidos los gases de destilación por el tope del reactor, estos pasan a la torre de destilación que se encuentra a la salida del horno rotatorio. Se generan los gases de combustión que serán usados por el mismo proceso como energía y por la zona de fondos se obtendrá el producto líquido requerido.

3.3.4.7. Tren de condensadores. Los cortes de producto condensable se recuperan de cada condensador proporcionan separación por densidad de agua y aceite derivados. Varios condensadores desplegados en serie constituyen una serie de

condensadores, también conocidos como un tren de condensadores. Los gases son condensados para obtener producto líquido de cadenas poliméricas más largas a cadenas más cortas generando producto requerido de mayor valor comercial.

3.3.4.8. Almacenamiento del producto. Se dispone de una zona destinada al almacenamiento de los productos líquidos sintéticos en tanques de tipo horizontal.

En la Figura 31 se muestra el diagrama de flujo de proceso de la planta con los equipos y sistemas considerados para las operaciones de producción de petróleo sintético que muestran las condiciones de proceso como presión y temperatura, así como el flujo másico.

3.3.5. Descripción de equipos

Especificada la composición de la carga de alimentación, se precisa determinar la especificación de los equipos, considerando las dimensiones y parámetros de diseño que permitirán desarrollar el proceso a las condiciones deseadas.

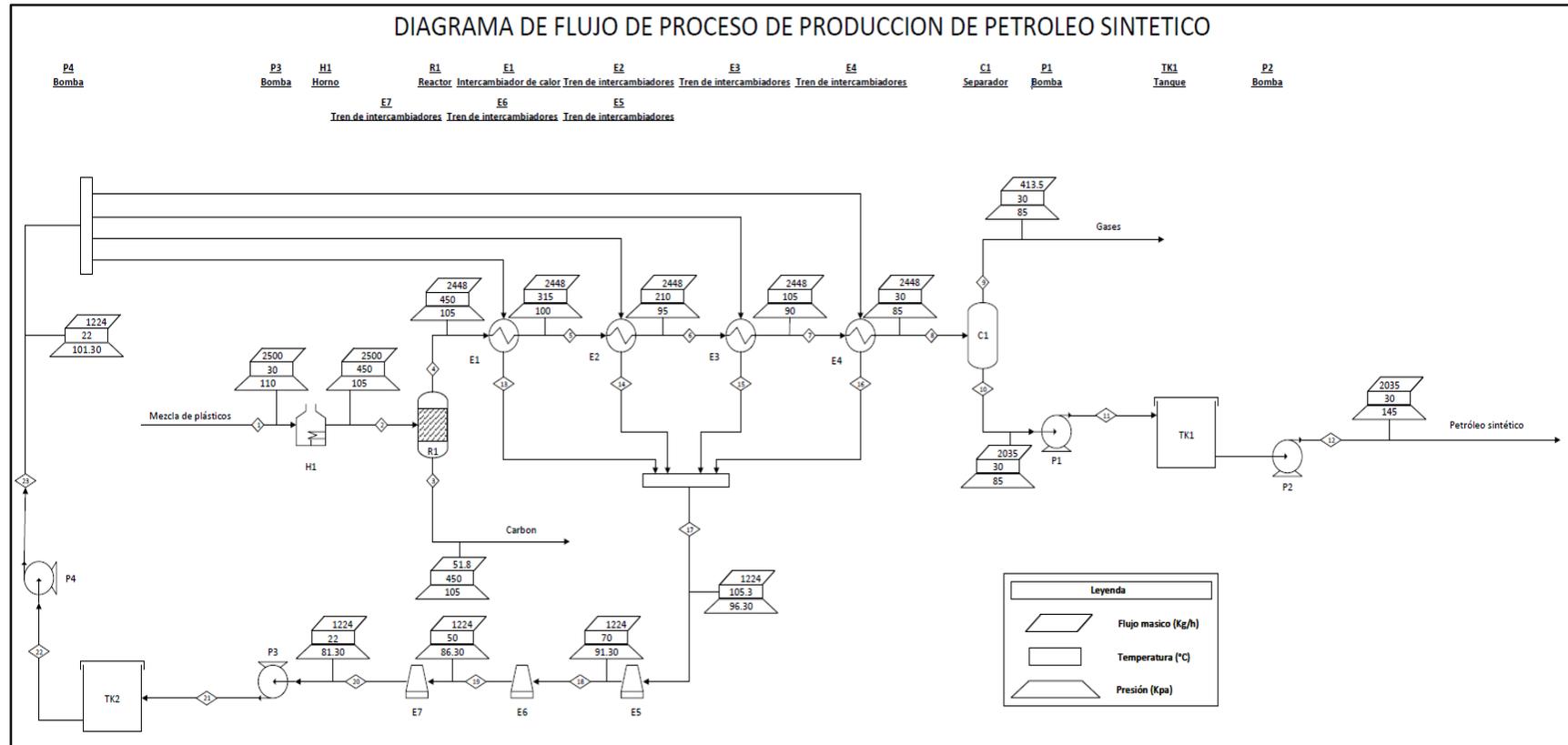
3.3.5.1. Reactor de Pirólisis. El proceso de pirólisis se desarrollará en el reactor de tipo lecho fluidizado CRV-101, en el cual se define la composición de la carga de alimentación, determinada a partir de la caracterización realizada en el apartado 5.3 para luego ingresar al reactor que tiene un volumen calculado de 20 m³. Este reactor cuenta con quemadores.

3.3.5.2. Intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor sirven como elemento fundamental para el proceso de condensación de los gases provenientes del reactor principal.

3.3.5.3. Separadores. Para el diseño de nuestro proceso fue necesario incluir una columna de separación V-103, la cual se encarga de separar los componentes gaseosos incondensables de los líquidos después de ser pasar por los intercambiadores de calor.

3.3.5.4. Aero enfriadores. Estos equipos sirven para condensar el vapor de agua proveniente del tren de intercambiadores de calor.

Figura 31
 Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de residuos plásticos



3.3.6. Cinética de las reacciones

Las reacciones de pirólisis de los plásticos son reacciones muy complejas. Además, hay una serie de factores que afectan el proceso y las reacciones tales como catalizadores, tipo de reactor, tipo de plásticos y el proceso de craqueo secundario. Una degradación térmica no catalítica de los plásticos se puede describir generalmente usando la Ecuación 1 (Gao, 2010).

$$-\frac{dm}{dt} = km^n \quad (1)$$

La constante cinética de la reacción en la ecuación anterior se puede determinar mediante la Ecuación 2:

$$k = A_o e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2)$$

E_a es la energía de activación (kJ/mol) y A_o es la constante pre-exponencial en la forma estándar de Arrhenius. R es la constante universal de los gases (J.K-1.mol-1) y T es la temperatura en Kelvin (K).

Combinando las ecuaciones 1 y 2:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A_o \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] (1 - \alpha)^n \quad (3)$$

Donde α es la relación de conversión que es igual a $(1-m)$. Los parámetros cinéticos y la orden de reacción se pueden determinar a partir de experimentos comprobados. Miranda et al., (2005) aplicó los modelos cinéticos para diferentes plásticos para pirólisis sin catalizador y obtuvo valores para E_a , n y A_o como se indica en la Tabla 16. Los productos de las reacciones de craqueo primarias se pueden romper mucho más en las reacciones posteriores en moléculas de menor peso (Gao, 2010).

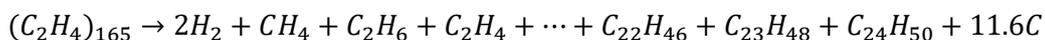
Tabla 16

Modelos cinéticos utilizados para la descomposición térmica de un solo plástico

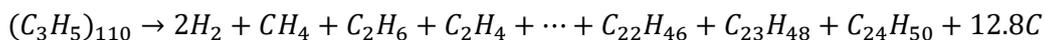
Kinetic model	Differential equations	E_a (kJ/mol)	n	A (min^{-1})	Yield coefficient
$\text{HDPE} \xrightarrow{k_1} \text{V} + \text{R}$	$\frac{d[\text{HDPE}]}{dt} = -A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} [\text{HDPE}]^{n_1}$	250	0.65	1.71×10^{17}	
$\alpha_1 \text{LDPE}_1 \xrightarrow{k_1} \text{V}_1 + \text{R}_1$	$\frac{d[\text{LDPE}_1]}{dt} = -A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} [\text{LDPE}_1]^{n_1}$	$E_{a1} = 120$	$n_1 = 1.40$	$A_1 = 1.34 \times 10^9$	$\alpha_1 = 0.10$
$\alpha_2 \text{LDPE}_2 \xrightarrow{k_2} \text{V}_2 + \text{R}_2$	$\frac{d[\text{LDPE}_2]}{dt} = -A_2 e^{-\frac{E_{a2}}{RT}} [\text{LDPE}_2]^{n_2}$	$E_{a2} = 220$	$n_2 = 0.60$	$A_2 = 1.47 \times 10^{15}$	$\alpha_2 = 0.90$
$\text{PP} \xrightarrow{k_1} \text{V} + \text{R}$	$\frac{d[\text{PP}]}{dt} = -A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} [\text{PP}]^{n_1}$	125	0.40	2.04×10^8	
$\alpha_1 \text{PS}_1 \xrightarrow{k_1} \text{V}_1 + \text{R}_1$	$\frac{d[\text{PS}_1]}{dt} = -A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} [\text{PS}_1]^{n_1}$	$E_{a1} = 120$	$n_1 = 1.60$	$A_1 = 1.06 \times 10^8$	$\alpha_1 = 0.10$
$\alpha_2 \text{PS}_2 \xrightarrow{k_2} \text{V}_2 + \text{R}_2$	$\frac{d[\text{PS}_2]}{dt} = -A_2 e^{-\frac{E_{a2}}{RT}} [\text{PS}_2]^{n_2}$	$E_{a2} = 185$	$n_2 = 0.76$	$A_2 = 2.32 \times 10^{13}$	$\alpha_2 = 0.90$
$\text{PVC} \xrightarrow{k_1} a\text{HCl} + b\text{I}$	$\frac{d[\text{PVC}]}{dt} = -A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} [\text{PVC}]^{n_1}$	$E_{a1} = 198$	$n_1 = 1.04$	$A_1 = 3.57 \times 10^{18}$	$b = 0.52$
$b\text{I} \xrightarrow{k_2} c\text{V}_1 + e\text{R}_1$	$\frac{d[\text{I}]}{dt} = b(A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} [\text{PVC}]^{n_1} - A_2 e^{-\frac{E_{a2}}{RT}} [\text{I}]^{n_2})$	$E_{a2} = 143$	$n_2 = 1.15$	$A_2 = 9.95 \times 10^{10}$	$e = 0.36$
$e\text{R}_1 \xrightarrow{k_3} f\text{V}_2 + g\text{R}_2$	$\frac{d[\text{R}_1]}{dt} = e(A_2 e^{-\frac{E_{a2}}{RT}} [\text{I}]^{n_2} - A_3 e^{-\frac{E_{a3}}{RT}} [\text{SR}_1]^{n_3})$ $\frac{d[\text{R}_2]}{dt} = g(A_3 e^{-\frac{E_{a3}}{RT}} [\text{SR}_1]^{n_3})$	$E_{a3} = 243$	$n_3 = 1.58$	$A_3 = 5.77 \times 10^{16}$	$g = 0.06$

Fuente: Tomado de (Miranda et al., 2005)

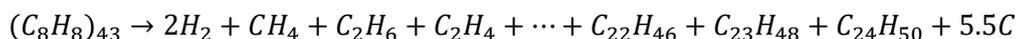
La metodología usada mediante el simulador Aspen Hysys v10 para la producción de petróleo sintético a mediante el proceso de pirólisis de los residuos plásticos está basada en las siguientes tres reacciones químicas:



Reacción 1: Craqueo térmico del Polietileno



Reacción 2: Craqueo térmico del Polipropileno



Reacción 3: Craqueo térmico del Poliestireno

3.3.7. Simulación del proceso de pirólisis

El diseño y características de los equipos para el procesamiento de residuos plásticos de la planta de pirólisis se realizó con base en revisiones bibliográficas de este procedimiento. Se seleccionó el software de simulación Aspen HYSYS V10 por ser el de mayor afinidad a los procesos en la industria de los hidrocarburos. En el Anexo 15 se muestra el procedimiento seguido para llevar a cabo la simulación paso a paso a mayor detalle.

Para llevar a cabo la simulación, primero se introdujo los datos correspondientes a los compuestos presentes dentro del proceso, es decir, materia prima, productos e insumos, además del modelo termodinámico correspondiente.

En este caso, se tiene como materia prima al polietileno, polipropileno y poliestireno, y como productos, mediante la revisión bibliografía de cromatografía, al hidrogeno, metano, etano, propano, entre otros (ver ecuaciones 3, 4 y 5), además del agua requerida en el tren de enfriamiento.

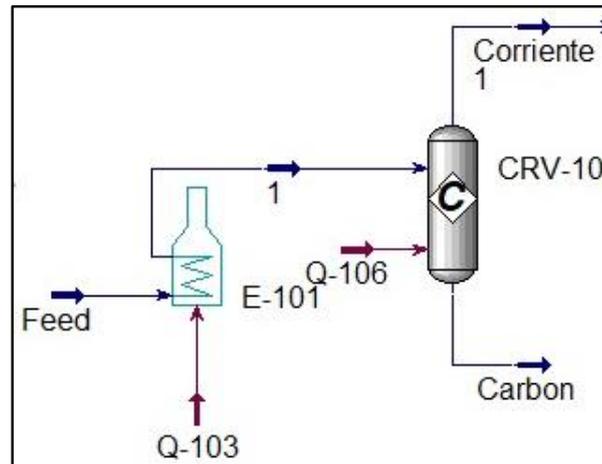
El siguiente paso fue establecer el modelo termodinámico, donde se escogió a Peng-Robinson dado que es un modelo adecuado para sistemas que contienen compuestos no polares como son los hidrocarburos.

La materia prima se encuentra estado sólido con una composición molar de 44,44%, 37.78% y 17.78% para el polietileno, polipropileno y poliestireno respectivamente, a 25 °C y 101.3 kPa.

3.3.7.1. Etapa de craqueo térmico. La corriente de alimentación compuesta del residuo plástico en pellets (molido) ingresa al reactor de conversión (CRV-101) que opera a 450 °C y 105 kPa, y se obtienen productos gaseosos por la corriente superior (tope) y carbón por la corriente inferior (fondos) . La corriente de fondos se presenta a 450 °C, 105 kPa y 51.8 kg/h, además la corriente del tope se presenta a 450 °C, 105 kPa y 2 448 kg/h (Timana et al., 2022).

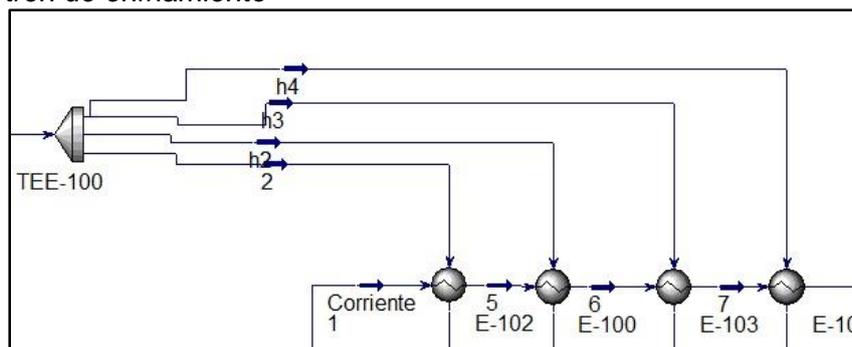
El horno que se aprecia en la Figura 33 fue simulado para facilitar la determinación del calor en kJ/h que se precisará en el reactor. Con ello posteriormente se calculó cuánto de gas necesitará el proceso para llevar el reactor a esta temperatura. Cabe resaltar que se aprovechará el gas del proceso obtenido, el cual se encuentra en la Figura 35 y, además, debido a que este gas carece de la energía necesaria para abastecer la demanda del reactor, se planteará la adquisición de gas natural.

Figura 33
Sección de Craqueo Térmico



3.3.7.2. Etapa de enfriamiento. La corriente 1, a la temperatura de 450 °C con una presión de 105 kPa, ingresa a un tren de enfriamiento que se compone de 4 intercambiadores de calor los cuales utilizan 1 224 kg/h de agua de enfriamiento en total. El primer intercambiador de calor E-102 enfría la corriente 1 hasta 315 °C, el segundo intercambiador E-100 enfría la corriente 5 de 315 °C a 210°C. El tercer intercambiador E-103 enfría la corriente 6 a 105°C. Por último, el intercambiador E-104 da como resultado la Corriente 3 a la menor temperatura posible de aproximadamente 30 °C, con la finalidad de condensar de la mayor cantidad de producto pesado en la corriente gaseosa.

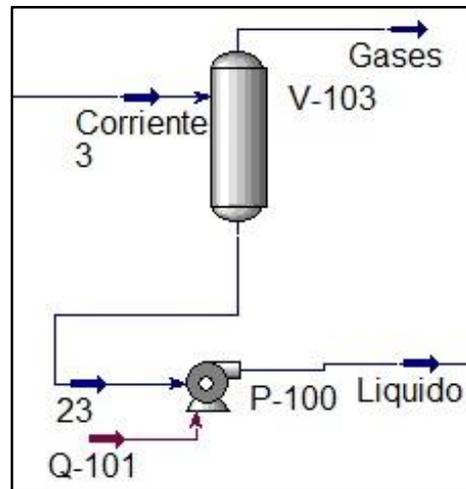
Figura 34
Sección de tren de enfriamiento



3.3.7.3. Etapa de separación de condensados. La corriente 3 ingresa al separador V-103 en el cual se obtiene un flujo másico de 407.3 kg/h por la corriente del tope a 30 °C y 95 kPa, además por la corriente de fondos se obtiene un flujo de 2 040.88 Kg/h

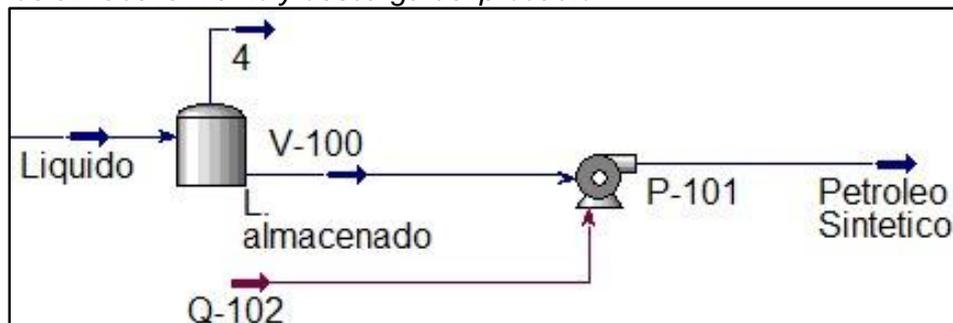
de producto líquido a 30 °C y 95 kPa, este producto será destinado al tanque de almacenamiento mediante la bomba tipo centrífuga P-100 (Timana et al., 2022).

Figura 35
Sección de separación de condensados



3.3.7.4. Etapa de almacenamiento y despacho del producto. El producto líquido se destina a el tanque de almacenamiento V-100, donde se almacenará el producto para la venta hacia los consumidores, para lo cual se empleará la bomba centrífuga de descarga P-101.

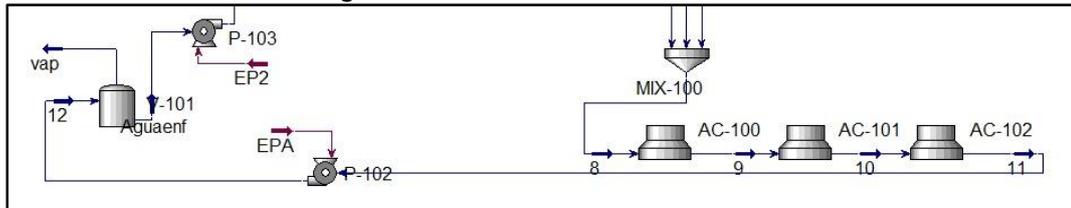
Figura 36
Sección de almacenamiento y descarga del producto.



3.3.7.5. Circuito de enfriamiento del agua. Las corrientes de salida de los intercambiadores de la sección de enfriamiento se juntan en el Mixer mostrado en la Figura 37 (MIX-100), obteniéndose la corriente 8 con una temperatura de 120 °C aproximadamente. Este vapor de agua pasará por los Aero enfriadores AC-100/101/102. La corriente 9 tendrá una temperatura de 70 °C, la corriente 10 una temperatura de 50 °C,

y la corriente 11 con una temperatura de 25 °C. Se bombeará esta agua que tiene una presión de 81.3 kPa con la bomba P-102 a la presión de 101.3 kPa al tanque V-101 de agua de enfriamiento. Se asumirá la pérdida de agua por evaporación del 5% de los 1 224 kg/h, necesiéndose así 61.2 kg/h de agua de reposición para este proceso, la cual se incluirá en el análisis económico previo.

Figura 37
Circuito de enfriamiento del agua



3.3.8. Calidad del producto

Es preciso indicar las condiciones de operación a la cual fue obtenida la simulación por la cual resultará la calidad del producto de pirólisis que se obtiene del proceso. En la Figura 38 se muestra las condiciones de operación del producto de la simulación.

Figura 38
Condiciones de la corriente de producto final

Material Stream: Petroleo Sintetico			
Worksheet Attachments Dynamics			
Worksheet	Stream Name	Petroleo Sintetico	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	30.01	30.01
Composition	Pressure [kPa]	160.0	160.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	11.10	11.10
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	2044	2044
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	2.632	2.632
User Variables	Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-7.397e+004	-7.397e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	465.5	465.5
Cost Parameters	Heat Flow [kcal/h]	-8.210e+005	-8.210e+005
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	2.632	2.632
	Fluid Package	Basis-2	
	Utility Type		

Se muestran las propiedades fisicoquímicas del hidrocarburo sintético producido que nos proporciona el simulador a las condiciones establecidas en la Tabla 17. Estos resultados son los principales métodos de ensayo para caracterizar los productos derivados de los hidrocarburos.

Tabla 17*Propiedades físicas del producto líquido obtenido a partir de la pirólisis de plásticos*

Características	Petróleo Sintético	Método de Ensayo ASTM
Gravedad API a 60°F	50.6	D1298
Azufre total, ppm	<20	D4294
Agua y sedimentos, %v	-	D1796 o D95 y D473
Presión de Vapor Reid, kPa (Psi)	53.4	D323
Flash Point, °C	34.3	D93

Como se puede apreciar en la Tabla 18 de rendimientos de destilados, se obtiene entre gasolina y nafta un rendimiento de 44% de productos ligeros, lo cual es un indicador de que el producto líquido al ser procesado por refinación obtendrá productos de alto valor comercial, incluyendo el diésel con un 35% de rendimiento. El porcentaje menor de aceite residual (21%) aún podría ser aprovechado en unidades de conversión profunda de las refinerías (Timana et al., 2022).

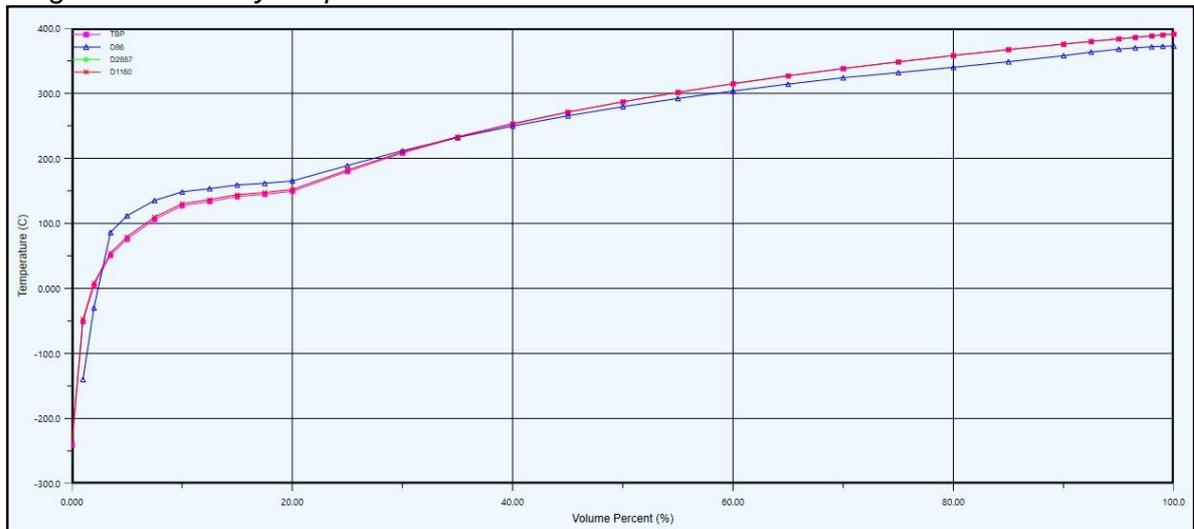
Tabla 18*Rendimientos de destilados de la fracción líquida de la pirólisis*

Producto de pirólisis	Temperatura	Porcentaje Volumétrico
Gasolina natural	<140	18
Nafta ligera	140-270	26
Diésel	270-360	35
Residual	360-400	21

El resultado obtenido de la simulación refleja el porcentaje volumétrico del producto de la pirólisis en la Figura 39.

Figura 39

Diagrama del Assay del petróleo sintético



3.3.9. Control e instrumentación del proceso

En el Anexo 13 se puede observar el P&ID del proceso con los controles respectivos de las variables más importantes del proceso:

Lazo 01F001 (Alimentación al reactor): Este lazo está compuesto del elemento de flujo (Placa Orificio) 01FE001, el cual estará conectado al transmisor FT001, el cual mediante una señal eléctrica se comunicará con el controlador 01FC001 que activará la válvula 01FV001 para dar paso al flujo de materia plástica al reactor. Está con un set para una alimentación de 2 500 kg/hr. La válvula será la que controlará este parámetro.

El fallo de la válvula es FO (Por sus siglas en inglés: Fallo Abre) debido a que el proceso no se puede quedar sin alimentación, causando el incremento de la temperatura del reactor lo cual puede ocasionar daños en su infraestructura.

Lazo 01L001 y 01F002 (Control del nivel del reactor): El lazo consta de los elementos de medición de nivel de vidrio 01LG001 con su respectivo transmisor 01LT001, el cual mandará una señal eléctrica al controlador 01LC001 que posee alarmas de alto y bajo nivel. Dicho controlador se comunicará por una señal vía Software con el controlador de flujo 01FC002 formando un lazo en cascada. El controlador de nivel mandará una señal eléctrica variador de frecuencia de velocidad del motor de la bomba P-01, permitiendo que,

si el nivel es bajo, no sacar mucho producto y si el nivel es alto, descargar el carbón a un posterior almacenamiento. Este lazo de flujo consta adicionalmente del elemento 01FE002 (Placa Orificio) y el transmisor 01FT002, los cuales nos indicarán en un panel la cantidad de flujo obtenido en los fondos.

Lazo 01P001 (Control de presión en el reactor): El lazo consiste en el transmisor de presión 01PT001 que medirá la presión en el tope y comunicará esta información mediante una señal eléctrica al controlador 01PC001. Este controlador actuará sobre la válvula 01PV001 de manera que, si la presión es alta en los topes, la válvula se abra y, por el contrario, si es baja, cierre.

El fallo de la válvula es FO debido a que la sobrepresión en el reactor podría causar una explosión, afectando equipos cercanos y teniendo efectos devastadores en las personas que puedan estar cerca a este.

Lazo 01T001 (Control de la Temperatura en el reactor): Este lazo está formado por el elemento medidor de temperatura 01TE001 el cual será un sensor RTD debido a su alta importancia en el proceso. Se comunicará mediante una señal eléctrica con el transmisor 01TT001 el cual nos mostrará la temperatura en un panel de control. A su vez este transmisor se comunicará con el transmisor 01TC001 el cual está relacionado en cascada mediante una señal de software con el controlador de flujo 01FC003. Este controlador de flujo actuará sobre la válvula 01FV003 abriéndola y cerrándola para mantener la temperatura del reactor en 450 °C. Si la temperatura baja de este valor, se abrirá la válvula dando paso a una mayor cantidad de gas a los quemadores del reactor y por el contrario, si la temperatura sube, se cerrará la válvula restringiendo el paso de combustible a los quemadores.

El fallo de la válvula es FC (Por sus siglas en inglés: Fallo Cierra) debido a que, si se abriera, la temperatura en el reactor aumentaría de forma drástica, causando sobrepresión en él, promoviendo la formación de coque y sacando los productos fuera de especificación.

Lazo 01L002 (Control de nivel en el Drum Separador): De manera similar al control de nivel en el reactor, el lazo está formado por el transmisor 01LT002 el cual informará la lectura del nivel al controlador 01LC002 que mandará una señal eléctrica al variador de frecuencia del motor de la bomba P-02 de forma que, si el nivel en drum es alto, la frecuencia aumente causando una mayor salida del producto y si el nivel disminuye, baje la frecuencia.

Lazo 01P002 (Control de presión en el Drum Separador): Está conformado por el transmisor 01PT002 el cual informará el valor de la presión al controlador 01PC002 mediante señal eléctrica. Este controlador se comunicará en cascada mediante una señal de Software con el controlador de flujo 01FC004 que actuará sobre la válvula 01FV004. Si la presión en el drum aumenta debido a un inminente cierre de la válvula 01FV003, la válvula FV004 se abrirá dando paso al gas para que sea quemado en el flare como medida de seguridad. Adicionalmente se tendrá el elemento de flujo (placa orificio) 01FE004 y el transmisor 01FT004 el cual nos indicará el valor medido del flujo obtenido de gases en un panel remoto.

El fallo de la válvula es FO debido que no se puede sobre presionar el drum con gases porque causaría daños en la estructura de este y un riesgo de explosión del equipo.

Lazo 01T002 (Control de temperatura en el Drum Separador): La temperatura es controlada a un set con valor de 30 °C para poder condensar nuestro producto. Esta temperatura es controlada mediante la admisión del agua de enfriamiento a los condensadores previos al drum. El lazo está conformado por el elemento de temperatura RTD 01TE002, el transmisor 01TT002 que comunica mediante señal eléctrica el valor de la temperatura a su respectivo controlador 01TC002. Este controlador actuará en cascada mediante una señal de software con el controlador de flujo 01FC002 que mandará una señal a la válvula 01FV005 para que abra o cierre según la temperatura del drum. Si la temperatura es alta, la válvula se abrirá, dando paso a una mayor cantidad de agua de enfriamiento a los condensadores y si la temperatura decae, la válvula se cerrará para mantenerla en el valor predeterminado.

El fallo de la válvula es FO, debido a que un decaimiento de la temperatura favorecerá la formación de nuestro producto en lugar de gases. La formación del producto no será elevada sin embargo es mejor a que la temperatura se eleve, causando una sobrepresión en el drum y daño del equipo.

3.3.10. Balance de masa y energía

Se realizaron balances de materia y energía en las secciones principales del proceso mencionados a continuación: pretratamiento, pirólisis y condensación con la finalidad de calcular la cantidad de productos obtenidos, servicios y combustibles requeridos. Los balances para cada unidad de proceso se obtienen a partir de simulaciones ejecutadas en Aspen Hysys, que muestran la cantidad de materia y energía en cada flujo.

En la pirólisis de residuos plásticos, el requerimiento energético en los principales equipos (reactor, intercambiador de calor, etc.) se determina según la Ecuación 4:

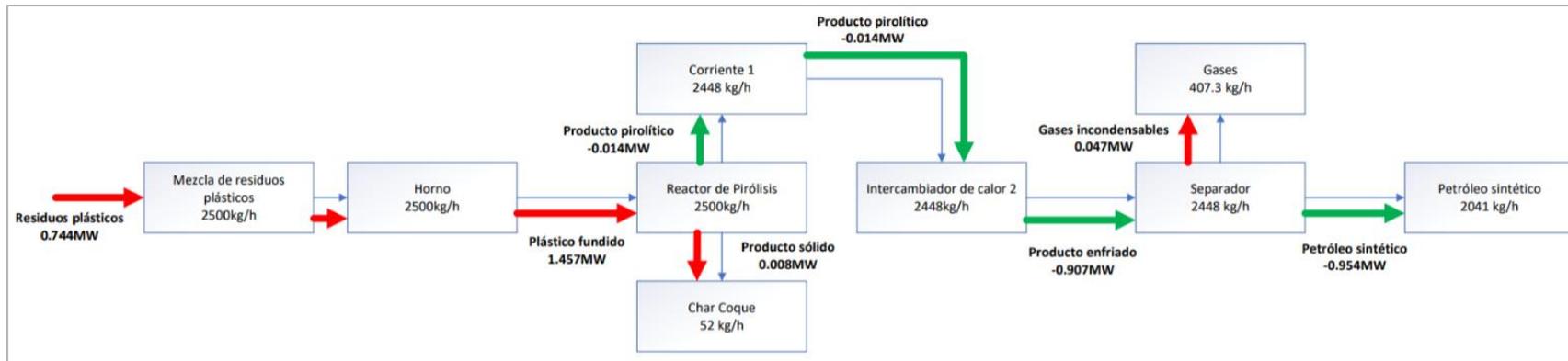
$$Q = \sum_{salida} n_i H_i - \sum_{ingreso} n_i H_i \quad (4)$$

Donde Q es la energía total requerida por el proceso de craqueo térmico (kJ), n_i es el número molar del componente i (mol), H_i es la entalpía del componente i (kJ mol⁻¹), donde la entalpía es la cantidad termodinámica equivalente al contenido de calor total de un sistema (Timana et al., 2022).

En la siguiente figura se presenta la ejemplificación del balance de materia y energía del proceso de pirólisis. Para una alimentación de 2 500 kg por hora de carga de residuos plásticos, se tiene una producción de 403 barriles por día de petróleo sintético, 0.246 MMSCFD de gas de pirólisis incondensable y 1 248 kg/d de coque con alto contenido energético, por otro lado, respecto a los requerimientos de energía más importantes son ubicados en el reactor de pirólisis y en los intercambiadores de calor (Aero enfriadores) (Timana et al., 2022).

Figura 40

Balace de materia del proceso de pirólisis



En la siguiente Tabla 19 se muestra los poderes caloríficos de los principales equipos y sus respectivos requerimientos energéticos.

Tabla 19

Balance de energía y requerimientos de caloríficos de equipos

Equipo	Calor (kJ/h)	Descripción
Q-103	2.567 E+06	Calor del reactor (CRV-101)
Q-101	106.8	Bomba a tanque de producto
Q-102	106.8	Bomba de tanque a despacho
Q-104	32.34	Del tanque de agua al circuito de enfriamiento
Q-105	32.34	De la Aero enfriadores a tanque de almacenamiento de agua.

Los siguientes supuestos principales sustentan este balance de masa y energía:

- Composición plástica de residuos mezclados.
- Composición de humedad de plástico de desecho seco del 5% en peso (base húmeda).
- Temperatura del reactor de pirólisis: 450 ° C
- Energía de reacción tipo endotérmica del reactor de pirólisis: 2 500kJ por kilogramo de plástico residual seco
- Productos del reactor de pirólisis: 16.3 % de gas, 81.6% de líquidos crudos, 2.1% de carbón
- Poder calorífico del gas: 50 MJ / kg
- Poder calorífico del líquido crudo: 46 MJ / kg
- Recuperación por destilación como producto: 90% en peso de líquido crudo.

3.3.11. Límite de baterías

Dentro de la planta de pirólisis se definen las siguientes unidades de proceso mencionadas a continuación:

- Unidad de triturado y molienda de plásticos (Unidad 1), zona en la cual se realiza el tratamiento previo a la descomposición térmica de los residuos plásticos. Incluye

la recepción, separación y lavado de los residuos plásticos, donde posteriormente son triturados convertidos a pellets para ingresar al proceso térmico.

- Unidad de Pirólisis (Unidad 2), en esta unidad se realiza el craqueo de los residuos plásticos, donde se obtienen los gases de pirólisis por el tope y coque en los fondos.
- Unidad de condensación (Unidad 3), etapa en la cual los gases de pirólisis son condensados hasta bajar la temperatura requerida de los productos.
- Unidad de Air Coolers (Unidad 4), etapa en la cual se utilizan Aero enfriadores para reducir la temperatura del agua de enfriamiento proveniente de los intercambiadores a la salida del reactor.
- Unidad de separación (Unidad 5), unidad encargada de separar los gases incondensable por el tope y el producto requerido líquido por el fondo.
- Unidad de almacenamiento de producto (Unidad 6), etapa en la cual los productos líquidos de petróleo sintético son almacenados para su posterior despacho.
- Flare donde son quemados gases de alivio, para depresionar los gases provenientes del separador.

De igual forma, se cuentan con las unidades complementarias, entre las cuales tenemos:

- Laboratorio, donde se analiza el control de calidad de los productos, así como la caracterización de la materia prima de alimentación, determinando su compatibilidad al proceso.
- Sala de control, donde se da el manejo de las operaciones y se controlará las variables en las unidades de proceso.
- Mantenimiento, talleres de reparación de equipos y piezas de las unidades.
- Almacén, se encuentran repuestos de piezas mecánicas y accesorios.
- Oficinas de las diferentes áreas y ambientes de personal como el comedor, entre otros.

Por último, se cuenta con el departamento de almacenamiento de materia prima, productos y despacho.

La distribución física de la planta se observa en la Figura 41 a continuación.

Figura 41

Plano de distribución física de la planta



3.4. Localización de la planta

La ubicación de la planta se determina en primera instancia teniendo en cuenta dos factores generales, la macro localización y la micro localización.

3.4.1. Macro localización

En esta fase se consideran los componentes que establecen la ubicación de la planta. Se establece la localización de la planta mediante los factores que se detallan a continuación: proximidad del mercado, fuente de materias primas, gestión de calidad del agua, servicios de electricidad, gestión de calidad del aire, gestión de residuos, mano de obra y disponibilidad de materiales, costos de transporte, costo y disponibilidad de terrenos, protección del suelo y aguas subterráneas, condiciones sociales y culturales; y estructura legal e impuestos.

3.4.2. Micro localización

Se determina la localización donde se desarrollará la instalación industrial teniendo en cuenta los factores que determinan su ubicación. Se tienen las siguientes zonas:

- ✓ Zona Sur: Distrito de Lurín.
- ✓ Zona Oriental: Distrito de Chosica.
- ✓ Zona Norte-Occidental: Distrito de Ventanilla.

3.4.3. Metodología

El método que se utilizará para la selección de la ubicación es el análisis ponderado, que implica la identificación de una serie de variables que se estiman importantes para la ubicación, y su distribución del peso relativo entre ellos de acuerdo con la Tabla 20. Se establece una escala para la evaluación de los factores que se muestran en la Tabla 21.

Tabla 20

Rango de valoración para la ubicación de la planta

	Alta	Media	Baja
FACTOR	7 a 10	4 a 6	1 a 3

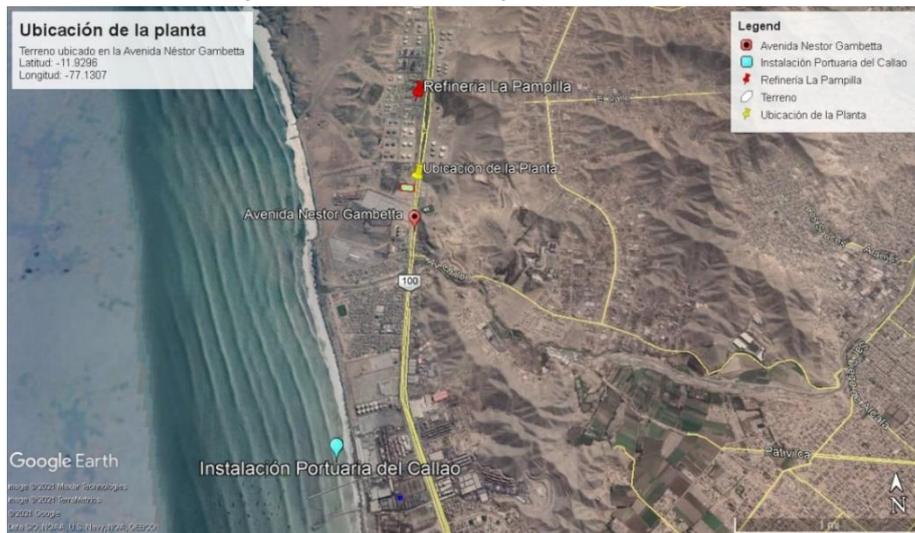
Tabla 21*Cuadro de escala de asignación de valores*

FACTOR ESTRATÉGICO	PONDERACIÓN DEL FACTOR	Distrito de Lurín	Distrito de Ventanilla	Distrito de Chosica
		Calificación	Calificación	Calificación
Proximidad al mercado de consumidor en su área de influencia	40%	9	10	7
Proximidad del abastecimiento de fuente de materia prima	20%	8	7	6
Facilidades de accesos a los servicios básicos (energía eléctrica, agua, alcantarillado)	5%	8	9	8
Proximidad a puerto marítimo.	10%	7	10	5
Facilidades de adquisición de terreno y aspecto legal	5%	8	9	8
Gestión de calidad del agua	5%	8	8	8
Gestión de calidad del aire	5%	8	7	9
Gestión de residuos	5%	7	8	7
Condiciones sociales y culturales	5%	8	8	7
TOTAL	100%	8.25	9.25	7.05

De acuerdo con los resultados de la metodología planteada, la ubicación más apropiada se decide por el Distrito de Ventanilla, provincia del Callao (ver Figura 19). La planta se ubicará en una zona cercana al mercado consumidor (Refinería La Pampilla) ya que es el consumidor de preferencia de los productos a ser procesados, por ende, los costos por transporte son menores. Se considera en el estudio el costo del transporte de la materia prima que será recolectado por los distritos seleccionados hasta el lugar de la planta de procesamiento. La fuente de abastecimiento de agua es un componente crucial. Por la cercanía de la planta tanto al río Chillón como al mar, se tiene confianza en la seguridad de su suministro, con lo cual se propone un sistema de abastecimiento de agua para sistemas de refrigeración y tratamiento de aguas residuales, así como también de uso

en el sistema contra incendios. Se considera también su zona, localizado en la zona industrial de Ventanilla, cercano también al Terminal Portuario del Callao, a una distancia prudente de la zona poblada de Márquez en distrito de Ventanilla. La cercanía a las vías de transporte terrestre, así como el costo del terreno fue considerada buscando la disponibilidad real del terreno de acuerdo a portales web inmobiliarios (Adondevivir, 2020), donde se muestra las características del terreno.

Figura 42
Localización definitiva de la planta industrial de pirólisis



Fuente: Tomado de (Google Earth, 2021)

Tabla 22
Descripción del terreno

Descripción del terreno
Área de terreno: 10 019 m ²
Precio de venta: \$ 3 114 738
Precio de alquiler (mensual): \$ 50 602
Zonificación: Gran Industria (I3)
Frente a Av. Néstor Gambeta
Dispone de Habilitación Urbana (HU)
Parte del inmueble se encuentra asfaltado
Cuenta con pozo propio y subestación eléctrica
El inmueble se encuentra desocupado

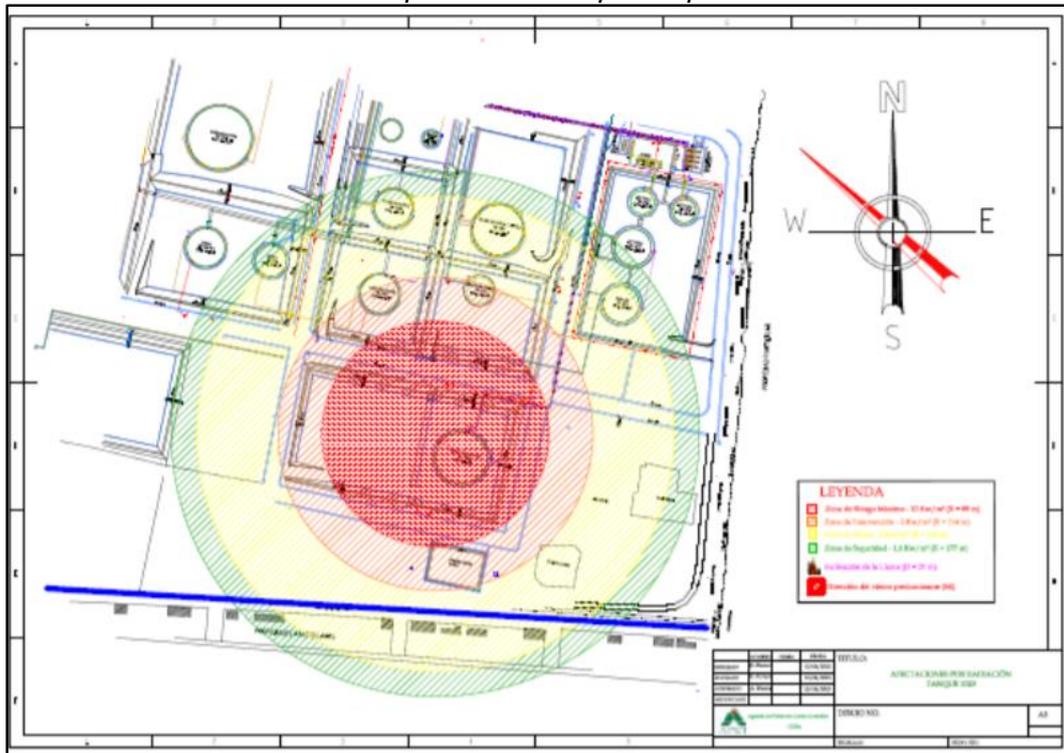
Fuente: Elaboración propia a partir de (Adondevivir, 2020)

3.4.4. Límite de atmósfera explosiva

Como parte del estudio técnico, se incluye el diámetro de afectación de la zona roja que tiene una cobertura de 20 metros de radio y es la zona que sufrirá un mayor impacto, produciéndose en este radio las mayores pérdidas y riesgos ante una posible catástrofe. El radio total de afectación es de 40 metros, cubriendo posibles zonas donde se ubiquen los reactores, ocasionando más pérdidas materiales. La zona residencial más cercana a la planta está a una distancia de 140.13 m, como se muestra en la Figura 43. Esta no se verá afectada por la explosión, sin embargo, podrá verse afectada por la contaminación atmosférica que cause la catástrofe.

Figura 43

Posible zona afectada ante una explosión de tanque de petróleo sintético



Fuente: (Rosero, 2015)

3.5. Evaluación del Impacto Ambiental

Se desarrolla un scopus que muestra un estudio de impacto ambiental preliminar donde se identifican los principales factores de impacto ambiental que son emitidos en el proceso de producción de nuestra planta de petróleo sintético ultraligero. Una vez identificados y clasificados por factores ambientales se realiza una matriz de Leopold para una valorización de los impactos ambientales y medidas para su mitigación y control.

3.5.1. Actividades por etapas en el proceso

3.5.1.1. Sección 1: Pretratamiento. Es la etapa de preparación y adecuación de los residuos plásticos para su adaptabilidad al proceso de pirólisis, en la cual se identifican los impactos ambientales principalmente enfocados en los residuos sólidos y su contaminación por descomposición.

3.5.1.2. Sección 2: Pirólisis. En la pirólisis se identifican dos fuentes de impacto ambiental importantes. El primero se basa en la emisión de dióxido de carbono (CO₂) al ambiente por parte de los quemadores del horno de pirólisis y el segundo, en el coque generado como residuo sólido desechado y recolectado en los fondos del reactor.

3.5.1.3. Sección 3 y 4: Intercambiadores. Se considera el uso del agua de enfriamiento de los intercambiadores y Aero enfriadores.

3.5.1.4. Sección 5: Columna de separación. Se consideran los gases emitidos en la antorcha a la salida de la columna separadora.

3.5.1.5. Sección 6: Almacenamiento de producto. En el almacenamiento de producto como petróleo sintético se debe considerar la volatilización del producto líquido, el cual es analizado de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas.

3.5.2. Factores Ambientales

Los factores ambientales considerados en la matriz de Leopold son los siguientes:

- Suelo: Contaminación Química, Alteración en la Calidad y cambio en las propiedades físicas.

- Atmósfera: Emisión de gases contaminantes, generación de ruido, generación de calor y emisión de olores.
- Agua: Aguas superficiales.

Establecidas las actividades de la planta industrial en columnas y los factores ambientales en filas se evalúa el impacto y la importancia de cada aspecto ambiental considerado en las secciones del proceso en la Tabla 23.

Tabla 23

Matriz de Leopold de valorización de impactos ambientales identificados para el proceso

Proyecto: Estudio de prefactibilidad técnica y económica para la producción de petróleo sintético ultraligero a partir de la pirólisis de residuos plásticos		Acciones del proyecto															
		Sección 01: Pretratamiento				Sección 02: Pirólisis		Sección 03: Condensadores	Sección 04: Air Coolers	Sección 05: Columna de separación	Sección 06: Almacenamiento de producto	Promedios positivos	Promedios negativos	Promedios aritméticos	Impacto por componente	Impacto total del proyecto	
		Triturado	Molienda	Lavado	Secado	Emisiones de CO2 del quemador del reactor	Extracción de Coque	Agua de enfriamiento	Agua de enfriamiento	Emisión de gases en el flare	Volatilización de productos líquidos						
Componentes	Factores ambientales																
Suelo	Contaminación Química						-4 1						-	1	-4	-23	
	Cambio en las propiedades físicas						-2 1						-	1	-2		
	Alteración en la calidad	-2 2	-2 2	-2 2			-2 1			-1 1			-	5	-17		
Atmósfera	Emisión de gases			-2 2		-6 4	-2 2	-2 2	-2 2	-6 4	-2 2		-	7	-58	-205	-240
	Generación de ruido	-2 2	-2 2	-2 2	-4 2			-2 2	-2 2	-1 1			-	7	-29		
	Generación de calor	-2 2	-2 2	-2 2	-4 2	-4 2	-6 2	-6 2	-8 2	-4 2			-	8	-76		
	Emisión de olores	-4 2	-4 2	-4 2		-2 2	-4 2			-2 1	-2 2		-	6	-42		
Agua	Agua Superficial			-2 2				-2 2	-2 2				-	3	-12	-12	
Promedios positivos		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Promedios negativos		4	4	6	2	3	6	4	4	5	2	-	38	-			
Promedios aritméticos		-20	-20	-28	-16	-36	-32	-28	-28	-36	-8	-	-	-240			

En la Tabla 24 se identifican los agentes contaminantes de cada sección y se propone medidas de control para la mitigación.

Tabla 24

Identificación de agentes contaminantes y medidas de control

Sección	Agente contaminante	Medidas de control
1. Pretratamiento	Residuos orgánicos	Implementar procedimientos adecuados de clasificación y pretratamiento de desechos para garantizar que solo se procesen los desechos plásticos aptos para la pirólisis. Esto puede ayudar a reducir la presencia de contaminantes en la materia prima, lo que puede conducir a la generación de emisiones nocivas durante la pirólisis.
	Residuos peligrosos	
	Impurezas	
2. Pirólisis	Gases de combustión de los quemadores del reactor	Instalar tecnologías de control de emisiones como depuradores y filtros para capturar y eliminar material particulado (MP), dióxido de carbono (CO ₂), metano (CH ₄) y otros contaminantes de los gases de escape generados durante el proceso de pirólisis. Estas tecnologías pueden ayudar a reducir la contaminación del aire y minimizar la liberación de gases nocivos a la atmósfera.
3. Condensadores	Agua de enfriamiento	Desinfección del agua para la eliminación de contaminantes que pueden afectar negativamente la transferencia de calor en el intercambiador
4. Aero enfriadores		
5. Columna de separación	Emisión de gases en el flare	Implementar un sistema de control de emisión de gases como precipitadores electrostáticos que eliminen y retengan los componentes orgánicos volátiles (COV) y otros contaminantes en la corriente de gases no condensables obtenidos en el tope del separador.
6. Almacenamiento	Volatilización de productos	Instalar un sistema de alivio de presión en los tanques de almacenamiento de producto para evitar las pérdidas por evaporación de productos volátiles y reducir la contaminación de estos gases a la atmósfera

Fuente: Elaboración propia a partir de (Baggio et al., 2008)

3.5.3. Aspecto social

Los habitantes del Área de Influencia indirecta del proyecto, formado por un sector del AA. HH. Ex Fundo Márquez es de aproximadamente más de 10 000 habitantes según el Censo Nacional del 2017. Los indicadores de salud realizados en la zona industrial de los distritos de Callao y Ventanilla del Ministerio de Salud para el año 2011 los casos más comunes de vulnerabilidad poblacional están relacionados con problemas respiratorios, entre otras enfermedades bucales.

Cabe señalar que en el 2017 se declaró en emergencia ambiental para zonas ubicadas dentro de los distritos de Mi Perú y Ventanilla, zonas aledañas a la zona del proyecto, debido al contenido de plomo y cadmio en el aire era de alto valor dentro de los estándares de calidad ambiental y podría afectar negativamente a la salud de la población.

Como medidas de mitigación al proyecto, consiste en el monitoreo del aire, agua y suelo en las áreas afectadas, la evaluación de las herramientas de gestión ambiental utilizadas por las industrias cercanas al lugar y la elaboración de una estrategia de comunicación efectiva para proporcionar información asertiva y clara a la población para no caer en la desinformación.

Los atractivos turísticos de la zona son: Esteros de Ventanilla, Complejo Chivateros, Huacas de Pampa de los Perros y Cerro Culebras, Ruinas del Paraíso, Cueva del Diablo, Cueva del Lobo, balnearios, playas, acantilados, islotes, entre otros. De estudios previos y encuestas realizadas entre los afectados, afirman que su principal inquietud es la contaminación ambiental y los accidentes de tráfico. Como recomendación, la población manifestó que, como medidas de protección ambiental, es necesario implementar más áreas verdes y cumplir con las normas de seguridad y medio ambiente.

3.5.4. Aspecto normativo

3.5.4.1. Normativa de la materia prima. Respecto a la materia prima, esta se basa en los residuos plásticos no reciclables que son dispuestos en los rellenos sanitarios. Se buscará trabajar con las municipalidades y recicladores que están amparados bajo la Ley de Reciclaje en el Perú Ley N.º 29419 (07/10/2009) que regula la actividad de los recicladores. En el caso de la comercialización de los residuos plásticos hacia los recicladores es necesario el acuerdo entre ambas partes para cerrar el trato debido a una falta de regulación en los precios (MINAM, 2009).

Con respecto al uso de los insumos requerido la Ley N° 29037 que es una modificación de la Ley N° 28305, ley de control de insumos químicos y productos fiscalizados, determina que los insumos que son requeridos para la producción de crudo

sintético son necesarios que se cuente con el Certificado de Usuario de insumos químicos y productos fiscalizados.

3.5.4.2. Normativa aplicada en el proyecto. Se mencionan las principales normas relacionadas al sector hidrocarburos:

- Nueva Ley Orgánica de Hidrocarburos, Ley N° 26221.
- Ley del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, Ley N° 28245.
- Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental, Ley N° 27446.
- Ley de Evaluación de Impacto Ambiental para obras y Actividades, Ley N° 26786.
- Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales, Ley N° 26821.
- Ley de Control de Insumos Químicos y Productos Fiscalizados, Ley N° 28305.
- Ley General de Residuos Sólidos, Ley N° 27314.
- Ley que regula el plástico de un solo uso y los recipientes o envases descartables Ley N° 30884.

El proyecto se apegará a los estándares legales exigidos en materia de seguridad y medio ambiente.

3.5.4.3. Procesamiento y construcción. El petróleo sintético no está definido como un tipo de combustible en el Perú. Su uso como materia prima para obtener productos de mayor valor agregado en una planta petroquímica puede hallarse en el Artículo 74 de la Ley Orgánica que regula las actividades de Hidrocarburos en el territorio nacional, Ley N° 26221 que dictamina:

“Cualquier persona natural o jurídica, nacional o extranjera, podrá instalar, operar y mantener refinerías de petróleo, plantas de procesamiento de gas natural y condensados, asfalto natural, grasas, lubricantes y petroquímica, con sujeción a las normas que establezca el Ministerio de Energía y Minas. Mediante contrato-ley, el Estado podrá otorgar a las plantas de procesamiento de gas natural, los beneficios que la presente Ley y sus normas reglamentarias conceden.” (MINEM, 1993).

Asimismo, se avala también la construcción de la planta según el Artículo 82 el cual dictamina el derecho al uso de agua, grava, madera y demás materiales de construcción necesarios para sus operaciones, respetando los derechos de terceros y en conformidad con las leyes y reglamentos pertinentes (MINEM, 1993).

3.5.4.4. Almacenamiento. De acuerdo con la calidad del petróleo sintético y su composición, se construirán tanques para su almacenamiento de acuerdo con la correspondiente norma API. El almacenamiento del crudo sintético obtenido está normado en la Ley Orgánica que norma las actividades de Hidrocarburos en el territorio nacional, Ley N° 26221 que en su artículo 73 expresa "Cualquier persona natural o jurídica, nacional o extranjera, podrá construir, operar y mantener instalaciones para el almacenamiento de Hidrocarburos y de sus productos derivados, con sujeción a los reglamentos que dicte el Ministerio de Energía y Minas" (MINEM, 1993).

3.5.4.5. Transporte, distribución y comercialización del producto. El método de transporte que se considere sea para camión cisternas como para el transporte marítimo en barcos, debe cumplir con la norma y estándares de diseño según las normas del MINEM. En el Artículo 76 de la Ley Orgánica que norma las actividades de Hidrocarburos en el territorio nacional, Ley N° 26221 se establece que "El transporte, la distribución mayorista y minorista y la comercialización de los productos derivados de los Hidrocarburos se regirán por las normas que apruebe el Ministerio de Energía y Minas; dichas normas deberán contener mecanismos que satisfagan el abastecimiento del mercado interno" (MINEM, 1993).

3.5.4.6. Protección del medio ambiente. Como la materia prima son polímeros cuya composición es muy baja en contaminantes como el azufre, las emisiones de la planta no tendrán un impacto significativo. Aun así, se debe evitar generar gases ácidos como el H₂S y el CO₂, así como eliminar los compuestos clorados y azufrados, que pueden producir lluvias ácidas y corrosión en los equipos. El Artículo 87 de la Ley Orgánica que norma las actividades de Hidrocarburos en el territorio nacional, Ley N° 26221 decreta:

"Las personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras, que desarrollen actividades de hidrocarburos deberán cumplir con las disposiciones sobre el Medio Ambiente. En caso de incumplimiento de las citadas disposiciones el Osinergmin impondrá las sanciones pertinentes, pudiendo el Ministerio de Energía y Minas llegar hasta la terminación del Contrato respectivo, previo informe del Osinergmin." (MINEM, 1993).

Por todo lo anterior mencionado, se concluye que el proyecto es legalmente viable si se cumplen con las exigencias de calidad y seguridad en los ámbitos de procesamiento, almacenamiento, transporte y ambiental que impone el MINEM.

3.5.4.7. Sostenibilidad del proyecto. El proyecto busca impulsar la economía circular en la industria de hidrocarburos de acuerdo con la "Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industrial" (El Peruano, 2020), esto forma parte de la transición energética dentro de las industrias, la cual busca también el consumo responsable de los plásticos.

Las actividades y operaciones desarrolladas en el proyecto contribuyen a los objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015).

Capítulo IV. Análisis Económico

4.1. Metodología

El estudio económico incluye el cálculo de los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX) del proyecto con el fin de obtener los indicadores de rentabilidad como el valor presente neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), así como el período de pago (OP) de la instalación, que denota la cantidad de años que la planta debe operar para recuperar completamente su inversión de capital inicial (Timana et al., 2022).

El CAPEX incluye tanto capital de trabajo como la inversión de capital fijo (FCI). El FCI está compuesto por el costo del equipo y los costos directos e indirectos asociados a su adquisición. El capital de trabajo es el financiamiento adicional requerido para lanzar la planta y mantenerla operativa hasta que comience a generar ingresos (Towler & Sinnott, 2013). El costo de compra de los equipos (PC) se calculó con las correlaciones de (Towler & Sinnott, 2013) en el año 2016, que corresponde al Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) con un valor de 541.7 y fue actualizado para el año 2020 dando un CEPCI de 596.2 para actualizar el costo de compra del equipamiento requerido para el proyecto (Vatavuk, 2002). Se seleccionó el acero inoxidable 304 como la materia de construcción según las tablas de compatibilidad de (Craig & Anderson, 1994). El cálculo presentado para los costos directos e indirectos se muestran en la Tabla 25, los cuales fueron tomados de (Towler & Sinnott, 2013).

Tabla 25
Cálculo de costos directos, indirectos y utilidades

Costos Directos (DC)	Estimaciones
Instalación	40% de PC
Instrumentación y control	40% de PC
Sistema de tuberías	45% de PC
Sistema eléctrico	25% de PC
Infraestructura	40% de PC
Instalaciones de servicio	70% de PC
Terreno	6% de PC
Costos Indirectos	Estimaciones
Ingeniería y Supervisión (I&S)	17.5% de DC
Contingencias	10% de (DC + I&S)
Gastos Legales	2% de (DC + I&S)
Gastos de construcción y contratista	15% de (DC + I&S)
Utilidades	Precio de referencia
Gas Natural (Cálidda) (S&P Global Ratings, 2020)	\$ 0.12 /m ³
Agua (Sedapal) (SEDAPAL S.A., 2021)	\$ 1.677 /m ³
Electricidad (Enel) (ENEL DISTRIBUCIÓN PERÚ S.A.A, 2022)	\$ 9.09 /kW.h

Fuente: Tomado de (Timana et al., 2022)

El OPEX está conformado por los costos variables y costos fijos. El costo variable incluye materias primas, servicios públicos, mano de obra, supervisión, control de calidad, costos indirectos de planta, costos administrativos y costos de investigación y desarrollo (Timana et al., 2022).

Debido a que los residuos plásticos se recogen en vertederos municipales y centros de reciclaje, los costos de la materia prima solo tienen en cuenta los residuos plásticos, cuyo precio es de 30 \$/t. El detalle de los costos variables y de los costos fijos se presentan en la Tabla 26. El costo de mano de obra (LC) es de \$ 20 por hora, y las horas-hombre

requeridas (MH) del proceso se calcularon asumiendo que se necesitan 1.17 MH por cada tonelada de producto líquido fabricado, este criterio se toma de referencia según (Peters et al., 2003) para una planta industrial.

Tabla 26

Cálculo de costos variables y fijos

Costos Variables	Estimaciones
Supervisión (SP)	15% del LC
Control de calidad	15% del LC
Costo Indirecto de planta	60% del (LC+SP+MANTO)
Investigación y desarrollo	2% de ventas brutas anuales
Costos Administrativos	20% del (LC+SP+MANTO)
Costos Fijos	Estimaciones
Mantenimiento de equipos (MANTO)	6% del FCI2
Suministros operacionales	0.75% del FCI
Impuestos locales	2.5% del FCI
Alquileres	10% del terreno
Seguros	0.7% del FCI
Intereses financieros	5% del FCI

Fuente: Tomado de (Timana et al., 2022)

La fórmula para el VAN según (Dayananda et al., 2002) es la siguiente Ecuación 5:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FCN_t}{(1+d)^t} - IC \quad (5)$$

Donde IC es la inversión de capital al inicio del primer año (t=0), d es la tasa de descuento (%) y FCN es el cambio en el flujo de caja neto del proyecto al final del año t. De igual forma, para calcular la TIR se determina a una tasa de descuento que establece el VAN en cero en la ecuación (5) (Dayananda et al., 2002).

El VAN se calculó bajo un escenario financiero (préstamo bancario), con el precio del crudo sintético fijado en \$ 65 con base en el pronóstico del Banco Mundial (World Bank,

2016), la vida económica del proyecto se considera de 10 años a una tasa de descuento establecida en 15% y finalmente para el financiamiento el préstamo es a una tasa de interés efectiva anual (TEA) del 12% (Timana et al., 2022).

4.2. Resultados

4.2.1. Costos de inversión

La inversión para el proyecto de producción de petróleo sintético mediante residuos plásticos se observa en la Tabla 27, donde se observa el monto de inversión necesario para una planta con capacidad de 12 072 barriles de petróleo sintético al mes.

Tabla 27
Resumen de montos de inversión para el proyecto

Inversiones	Rubro de Inversiones	Inversión desagregada	Inversiones Parciales (USD)	Total de Inversiones (USD)
Inversión Fija de Capital (FCI)	Costo de compra (PC)	Costo de compra de equipos y maquinaria (PC)	\$2 319 033	\$2 319 033
		Instalación	\$927 613	
		Instrumentación y controles	\$927 613	
		Cañerías y tuberías	\$1 043 565	
		Instalaciones eléctricas	\$556 568	
		Infraestructura	\$927 613	
		Costos Directos (DC)	Instalaciones de servicio	
	Equipos de Oficina, Seguridad y Limpieza	\$28 907		
	Muebles, Equipos y Otros	\$1 260		
	Muebles en General	\$7 500		
	Artículos Complementarios	\$0		
	Terreno	\$139 142		
	Ingeniería y Supervisión (I&S)	\$1 082 043		
	Costos Indirectos (IC)	Contingencias	\$726 515	\$3 043 633
Gastos Legales		\$145 303		
Gastos de construcción e Impuesto de contratista		\$1 089 772		
Gastos en Materiales e Insumos Básicos		\$162 000		
Pago de Sueldos y Salarios		\$295 500	\$1 066 173	
Capital de Trabajo (WC)	Capital de Trabajo	Gastos de Operación		\$608 673
CAPEX Total (USD)				\$12 611 942

De la Tabla 26 se observa que la inversión para la planta de 12 072 barriles de petróleo sintético mensual es de 12 611 942 USD. Además, se tiene la inversión fija de 11 545 770 USD y capital de trabajo de 1 066 173 USD; donde 10 655 924 USD es la inversión Tangible y 31 100 USD es la inversión Intangible Los valores de la inversión desagregada se obtienen de las tablas en el apartado de los anexos.

4.2.2. Costos de producción

Los costos de producción se dividen en costo de producción y los gastos de operación. En la Tabla 27 se observa que el costo de producción es 67 000 USD mensual y tiene 119 557 USD de costo total mensual.

Tabla 28
Costos de Producción

ITEMS	MONTO (USD)
Materiales e insumos directos	\$54 000
Mano de obra directa	\$12 000
Gastos indirectos de fabricación	\$1 000
Costo de producción (USD)	\$67 000
Gastos Generales y Administrativos	\$16 908
Gastos de Ventas	\$0
Gastos Financieros	\$40 455
Costo total (USD)	\$124 363

4.2.3. Depreciación

En la Tabla 29 se tiene la depreciación de los equipos, muebles, etc. Se observa que la depreciación de los artículos complementarios y la infraestructura no se considera debido que estos bienes no sufren de depreciación respecto a su valor de adquisición inicial.

Tabla 29*Elementos considerados en la depreciación del proyecto*

Depreciación	Monto	Vida Útil (Años)	Depreciación %	Depreciación (USD)
Equipos de Ingeniería	\$2 319 033	10	10.0%	\$ 231 903
Equipo de Oficina, Seguridad y Limpieza	\$28 907	10	10.0%	\$ 2 891
Muebles, Equipos y Artículos de Cocina	\$1 260	10	10.0%	\$ 126
Muebles en General	\$7 500	10	10.0%	\$ 750
Artículos Complementarios	\$0	2	50.0%	\$ 0
Infraestructura	\$0	20	5.0%	\$ 0
Total Depreciación por Año				\$ 235 670

4.2.4. Costos unitarios

De acuerdo con la capacidad de producción de la planta de 12 072 barriles de petróleo sintético y teniendo los costos de producción se puede calcular el costo unitario de producción y consto unitario de venta mediante los siguientes cálculos, referenciados de (Arredondo, 2015):

Costo unitario de producción: calculamos el costo unitario de producción mediante la división entre el costo de producción mensual y la producción mensual, como se muestra en la Ecuación 6.

$$\text{Costo unitario de producción} = \text{costo de producción} \div \text{producción mensual} \quad (6)$$

Costo unitario de venta: calculamos el costo unitario de venta mediante la división entre el costo total mensual y la producción mensual, como se muestra en la ecuación 7.

$$\text{Costo unitario de venta} = \text{costo total} \div \text{producción mensual} \quad (7)$$

Mediante las fórmulas explicadas anteriormente se tiene la Tabla 30 donde se muestra los costos unitarios de producción y costo unitario de venta.

Tabla 30*Costos unitarios de producción y costo unitario de venta*

Costos	USD
Costo unitario de producción	\$5.55
Costo unitario de venta	\$10.30

4.2.5. Precio de Venta

Luego de observar el análisis del petróleo crudo en el estudio de mercado, se observa que el promedio de precios de petróleo crudo (WTI), se proyecta (hasta el año 2022) que será de 55 USD y se asume un costo de 10 USD adicional por costos de flete, además el crudo sintético presenta densidad API de 50.6°API, debido a estos análisis se fija un precio estándar de 65 USD por barril de petróleo sintético, cifra que coincide con el pronóstico del (World Bank, 2016) para un horizonte de 10 años.

4.2.6. Proyección de ventas

La proyección de ventas se toma en función de la capacidad instalada, de acuerdo con lo expuesto se asume que las ventas anuales durante los 10 años de proyección es 144 864 barriles por año. Además, el precio de venta es de 65 USD por barril de crudo sintético, entonces se tiene 9 401 810 USD de ingresos anuales. En la Tabla 31 se presenta la proyección de las ventas en un periodo de 10 años.

Tabla 31*Proyección de ventas*

Período	Precio Promedio Mensual	Cantidad	Ingreso Anual (USD)
1er Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
2do Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
3er Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
4to Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
5to Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
6to Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
7mo Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810

8vo Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
9no Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810
10mo Año	\$65	\$144 864	\$9 401 810

4.2.7. Financiamiento del proyecto

El financiamiento del proyecto se muestra en la Tabla 32, se presenta de la siguiente manera en los porcentajes de 50% a través de préstamos bancarios, 25% de los accionistas y 25% a través de capital personal para cubrir el monto de la inversión requerida de 12 611 942 USD.

En el Anexo 12 se observa el cálculo del monto a pagar para cubrir el financiamiento bancario, donde se tiene una Tasa Efectiva Anual (TEA) de 12% y tasa de descuento de 15%.

Tabla 32
Financiamiento del proyecto

Financiamiento	Monto (USD)	Porcentaje
Capital Propio	\$3 152 986	25%
Socios	\$3 152 986	25%
Banco	\$6 305 971	50%
Total (USD)	\$12 611 942	100%

4.2.8. Flujo de caja económico y financiero

Luego del análisis de los ingresos y egresos en las tablas anteriores, se realiza el flujo de caja financiero que se muestra en la Tabla 33.

4.2.9. Indicadores de evaluación

Se obtienen los indicadores de rentabilidad del proyecto mostrados en la Tabla 34. Como resultados se obtuvo un valor actual neto financiero (VANF) de \$17 312 719 y una tasa interna de retorno financiera (TIRF) de 79% para el escenario financiero. Además, el periodo de recuperación de la inversión (PRI) es 1.3 años. Asimismo, se obtuvo una relación beneficio costo (B/C) de 4.0.

Tabla 33
Flujo de caja financiero

RUBRO	AÑOS										
	Año 0 (USD)	Año 1 (USD)	Año 2 (USD)	Año 3 (USD)	Año 4 (USD)	Año 5 (USD)	Año 6 (USD)	Año 7 (USD)	Año 8 (USD)	Año 9 (USD)	Año 10 (USD)
Ingreso por Ventas											
Ventas de producto		9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810
Valor Rescate de Activo Fijo											
Valor Rescate de Capital Trabajo											1 066 173
Préstamo	6 305 971										
Total Ingresos	6 305 971	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	9 401 810	10 467 982
Costos de Producción		804 000	804 000	804 000	804 000	804 000	804 000	804 000	804 000	804 000	804 000
Gastos Operativos		202 891	223 180	245 498	270 048	297 053	326 758	359 434	395 377	434 915	478 406
Intereses		756 717	713 596	665 300	611 210	550 628	482 776	406 783	321 670	226 343	119 578
Amortización del Préstamo		359 340	402 461	450 757	504 848	565 429	633 281	709 274	794 387	889 714	996 479
Impuestos		2 219 827	2 226 676	2 234 469	2 243 332	2 253 405	2 264 849	2 277 844	2 292 595	2 309 332	2 328 314
Inversión	12 611 942										
Total Egresos	12 611 942	4 342 775	4 369 913	4 400 024	4 433 437	4 470 514	4 511 664	4 557 335	4 608 029	4 664 303	4 726 777
Flujo Neto Financiero	-6 305 971	5 059 035	5 031 897	5 001 785	4 968 373	4 931 295	4 890 146	4 844 475	4 793 781	4 737 507	5 741 205
Flujo Neto Actualizado	-6 305 971	4 911 685	4 743 045	4 577 342	4 414 335	4 253 779	4 095 421	3 939 002	3 784 255	3 630 904	4 271 996
Flujo Neto Acumulado	-6 305 971	-1 394 286	3 348 759	7 926 101	12 340 436	16 594 215	20 689 636	24 628 637	28 412 892	32 043 797	36 315 793

Tabla 34*Evaluación de los indicadores de rentabilidad del proyecto*

Indicadores Económicos	Valores	
Valor Actual Neto Financiero	VANF	18 747 482
Tasa Interna de Retorno Financiero	TIRF	79%
Periodo de Recuperación de Inversión (Años)		1.29
B/C		4.0

4.2.10. Análisis de escalamiento

Se calculó los índices de evaluación del proyecto a diferentes capacidades de producción, tal como se muestra en la Tabla 35. Observándose que a mayor capacidad de producción del proyecto se obtiene mejores índices de evaluación.

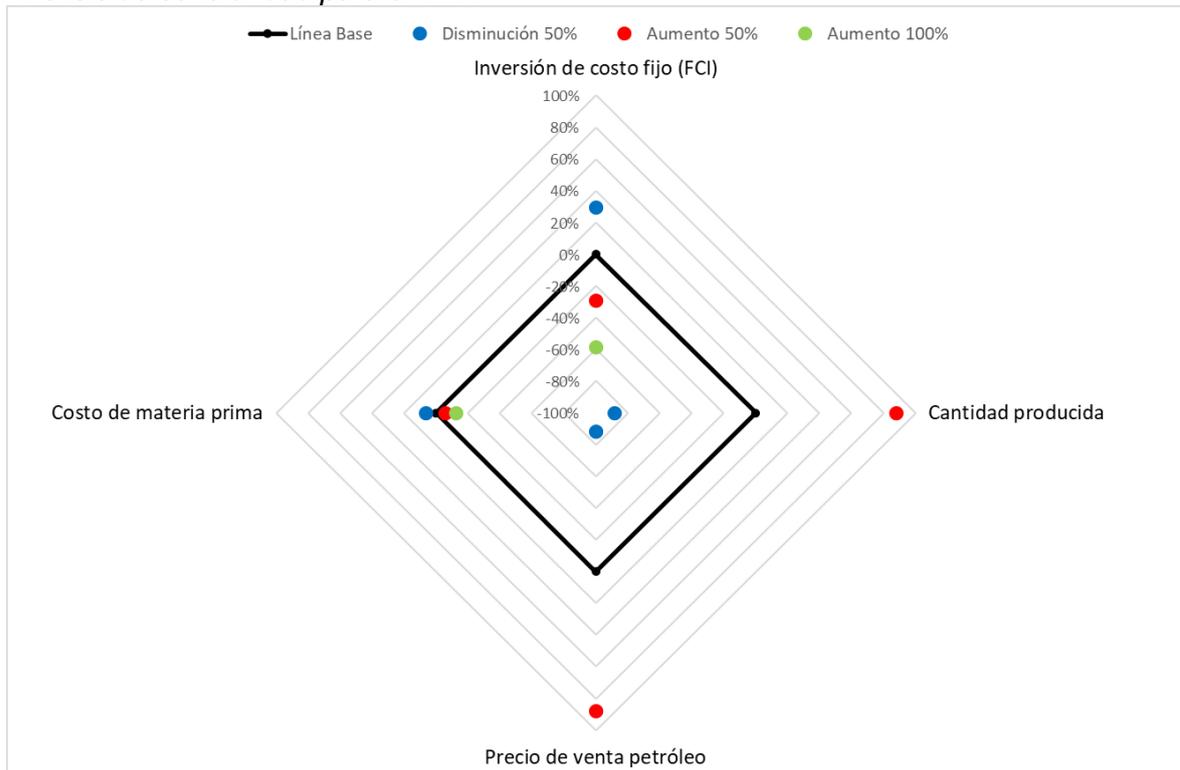
Tabla 35*Indicadores de evaluación de escalamiento del proyecto*

Capacidad (MBPM)	8	10	12	14	16
VAN (USD)	9 229 352	13 596 355	18 747 482	20 941 208	24 742 186
TIR	57%	72%	79%	87%	95%
P.R.I.	1.8	1.4	1.3	1.2	1.1
B/C	2.9	3.6	4.0	4.4	4.7

4.2.11. Análisis de Sensibilidad

Se eligieron cuatro parámetros para realizar el análisis de sensibilidad. Los intervalos de evaluación se extendieron para documentar el valor del VAN del proceso en condiciones más rigurosas que los recomendados por (Towler & Sinnott, 2013). El FCI se cambió entre -50% a 100%, el precio de venta del petróleo sintético y la cantidad producida desde -50% a 50% y el costo unitario de materia prima desde -50% a 100%. Se utiliza un diagrama de araña mostrado en la Figura 44 para presentar la variación en el VAN y determinar las variables que tienen mayor impacto (Timana et al., 2022).

Figura 44
Análisis de sensibilidad para el VAN



Para el estudio de sensibilidad se tomaron en cuenta cuatro factores: la inversión, la producción, el precio de venta y el costo de las materias primas. Estos factores se examinaron a intervalos del 50%. Se muestra en la Tabla 36 los efectos de la variación de estas variables con respecto al VAN. Se puede percibir que la cantidad producida y el precio de venta del petróleo tienen el mayor impacto en el VAN (Timana et al., 2022). La importancia de estos dos parámetros se evidencia por el hecho de que una reducción del 50% puede resultar en una reducción del VAN del 88%. La demanda de petróleo en el Perú, que mantiene una relación muy estricta con el precio del crudo a nivel internacional, puede tener un impacto directo en la comercialización del producto de pirólisis. El VAN se ve menos afectado por la FCI; con un aumento del 100%, el VAN disminuye en un 59%. Finalmente, el costo unitario de la materia prima es el que menos influye en el valor del VAN, el cual solo decrece un 13% con un aumento del 100% (Timana et al., 2022).

Tabla 36*Análisis de sensibilidad en función al VAN*

Variación VAN	VAN (-50%)	VAN (0%)	VAN +50%	VAN +100%
Inversión de costo fijo (FCI)	29%	0%	-29%	-59%
Cantidad producida	-88%	0%	88%	
Precio de venta petróleo	-88%	0%	88%	
Costo de materia prima	6%	0%	-6%	-13%

Una vez que se establecieron los límites superiores de las variables, quedó determinado que el proyecto ya no era económicamente factible a un precio de crudo sintético inferior a 29 USD por barril. Además, se determinó que la instalación deja de ser rentable para una producción mensual de inferior a 5 220 barriles (Timana et al., 2022).

Conclusiones

- Debido a los antecedentes, fue posible desarrollar un estudio técnico, una evaluación del impacto ambiental y un análisis económico que permitieron determinar la viabilidad de la implementación de una planta de pirólisis en la ciudad de Lima y Callao para la producción de petróleo sintético. El proyecto demostró que la tecnología propuesta es rentable económicamente con un Valor Actual Neto (VAN) de \$ 18 747 482, además dispone de la materia prima necesaria del cual se toma el 6.67% del volumen total generado en Lima Metropolitana y el Callao para la capacidad de la planta propuesta con la cual se diseñó para producir 146 876 barriles anuales, volumen que representa el 0.4% respecto a la demanda nacional insatisfecha que es importada por las refinerías en el país.
- Se determinó las condiciones de operación para el reactor de pirólisis con un flujo másico de alimentación de residuos plásticos de 2 500 kg/h a una presión de 105 kPa y una temperatura de 450 °C da a lugar a las tres reacciones principales de craqueo en el reactor de las cuales se obtienen los productos gaseosos, líquidos y sólidos con alto poder calorífico.
- Se desarrolló el proceso productivo gracias a la simulación realizada en el simulador de procesos químicos Aspen Hysys v10 en la que se determina un rendimiento de productos líquidos de 81.6%, el cual tiene una calidad semejante a la de un crudo ultraligero con una gravedad API de 50°. Del proceso también se obtienen gases de combustión con capacidad calorífica para abastecer parte de la demanda calórica de los quemadores del reactor, con lo cual el proceso emplea la cogeneración energética para ser auto sostenible.
- En el estudio económico del proyecto se obtuvo como indicadores de rentabilidad un valor actual neto (VAN) de \$ 18 747 482 y una tasa interna de retorno (TIR) de 79% lo que económicamente convierte a la planta de producción de petróleo sintético en un proyecto altamente rentable. Además, el periodo de recuperación de la inversión (PAY-

OUT TIME) es de 1.3 años. Asimismo, se obtuvo una relación beneficio costo (B/C) de 4.0.

Recomendaciones

Del proyecto se recomienda lo siguiente:

- Se recomienda elaborar un estudio económico más riguroso de los costos de capital y costos operativos del presente trabajo de investigación debido a que la tecnología de pirólisis de residuos plásticos a escala industrial para la producción de combustibles es una tecnología relativamente novel en materia de plantas industriales. Este factor limita las fuentes bibliográficas de tecnologías patentadas que permitan realizar un estudio económico certero por lo que se precisa desarrollar el análisis en base a estimaciones de proyectos similares y publicaciones de investigación relacionadas a estudios de factibilidad en diseños de plantas de procesamiento del sector hidrocarburos.
- Las condiciones de operación en el reactor fueron simuladas en base a las reacciones de craqueo térmico de los polímeros las cuales fueron desarrolladas por los porcentajes de conversión obtenidos de las referencias bibliográficas. Por lo tanto, se recomienda trabajar con factores cinéticos de cada plástico en específico, esto puede obtenerse a través de un estudio de análisis termogravimétrico (TGA) a las muestras de materia prima, lo que permitirá tener un alcance real de los productos obtenidos. Además, se recomienda también usar paquetes de simulación diseñados específicamente a polímeros, esto con la finalidad de obtener datos más precisos relacionados a la cinética.
- Es recomendable realizar un estudio detallado de la calidad del producto obtenido mediante la pirólisis y evaluar la posibilidad de utilizar un catalizador con la finalidad de obtener un producto refinado y con mayor valor comercial. Este análisis del catalizador conlleva una cinética mucho más compleja que no pudo ser desarrollada en el presente proyecto, sin embargo, a nivel industrial muchas plantas de pirólisis lo implementan como parte de sus patentes y obtienen márgenes de rentabilidad mucho mayores por la comercialización de este producto.

- Se recomienda incrementar la capacidad de producción de la planta ya que se demostró que la rentabilidad aumenta a medida que la capacidad instalada de la planta sea mayor. Este factor está ligado netamente a la disponibilidad de materia prima, que según se demostró se encuentra en un aumento sostenido por lo que una capacidad mayor es factible para ciudades de Lima y Callao. Por otro lado, también se vio que en otros departamentos costeros del Perú el proyecto también resultaría rentable, debido a la densidad poblacional, aumentos de consumo plástico, cercanía a puertos, etc.

Glosario

Biodegradación: Proceso natural mediante el cual los materiales orgánicos son descompuestos y transformados en productos más simples por la acción de organismos vivos, como microorganismos, bacterias y enzimas.

Copolimerización: Se define como el proceso químico mediante el cual dos o más monómeros diferentes se combinan para formar un polímero compuesto por unidades repetitivas de dichos monómeros.

Coque: Residuo carbonoso de la destilación de carbón o petróleo, empleado en la industria metalúrgica y química.

Descarboxilación: Eliminación de un grupo carboxilo de una molécula, proceso clave en la síntesis orgánica y metabolismo bioquímico.

Gasificación: Conversión termoquímica de materiales carbonosos en gas, un proceso relevante en producción de energía y síntesis de combustibles.

Haloalcanos: Compuestos orgánicos que contienen átomos de halógeno, fundamentales en síntesis química y relevantes en aplicaciones farmacéuticas y agroquímicas.

Pellets: Pequeñas partículas cilíndricas o esféricas de biomasa o materiales compactados, utilizadas como combustible o en procesos industriales.

Petróleo sintético: Combustible derivado de procesos químicos que replican las propiedades del petróleo, reduciendo dependencia de fuentes fósiles.

Pirolizado: Descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, generando productos como carbón, gases y líquidos.

Vulcanización: Proceso químico que fortalece y endurece elastómeros, como caucho, mediante la adición de azufre y calor controlado.

Referencias bibliográficas

- Adondevivir. (2020). *Adondevivir.com*. <https://www.adondevivir.com/propiedades/terreno-industrial-de-74.7-mil-m-sup2--en-av-nestor-58510123.html>
- Aguado, J., Serrano, D. P., & Escola, J. M. (2008). Fuels from waste plastics by thermal and catalytic processes: A review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(21), 7982–7992. <https://doi.org/10.1021/ie800393w>
- Ahmad, I., Khan, M. I., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2015). Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products. *International Journal of Green Energy*, 12(7), 663–671.
- Akenji, L., & Bengtsson, M. (2019). *Circular economy and plastics*. 14–20.
- Almeida, D., & Marque, M. de F. (2015). Thermal and Catalytic Pyrolysis of Polyethylene Plastic Waste in Semi. *Polimeros*, 26(1), 1–8. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2100>
- Almukhtar, R. S. (2018). Characterization of Liquid Produced from Catalytic Pyrolysis of Mixed Polystyrene and Polyethylene Terephthalate Plastic. *Engineering and Technology Journal*, 36(1). <https://doi.org/10.30684/etj.36.1a.4>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Angel, C., Olaychea, N., Congreso, E. L., & República, D. E. L. A. (2018). ?.-0 _.
- Arandes, J., Bilbao, J., & López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 28–45. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1048871&orden=30219&info=link>
- Arena, U., & Mastellone, M. L. (2006). Fluidized Bed Pyrolysis of Plastic Wastes. In *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into*

- Diesel and Other Fuels*. <https://doi.org/10.1002/0470021543.ch16>
- Arredondo, M. (2015). *Contabilidad y Análisis de Costos*. Larousse - Grupo Editorial Patria. <https://books.google.com.pe/books?id=i9NUCwAAQBAJ>
- ASTM. (2000). *ASTMD-5033-90. Standard Guide for Development of ASTM Standards Relating to Recycling and Use of Recycled Plastics*.
<https://standards.globalspec.com/std/468419/ASTM D5033>
- Ateş, F., Miskolczi, N., & Borsodi, N. (2013). Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part I: Product yields, gas and pyrolysis oil properties. *Bioresource Technology*, 133, 443–454.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.112>
- Baggio, P., Baratieri, M., Gasparella, A., & Longo, G. A. (2008). Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis and combined cycle. *Applied Thermal Engineering*, 28(2), 136–144.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.028>
- Bockhorn, H., Hornung, A., Hornung, U., Jakobströer, P., & Kraus, M. (1999). Dehydrochlorination of plastic mixtures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 49(1), 97–106. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(98\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(98)00124-7)
- BP Outlook. (2019). BP Energy Outlook 2019 edition The Energy Outlook explores the forces shaping the global energy transition out to 2040 and the key uncertainties surrounding that. *BP Energy Outlook 2019*.
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>
- Bridgwater, A. V, & Grassi, G. (2012). *Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization*. Springer Science & Business Media.
- Buekens, A. G. (1977). Some observations on the recycling of plastics and rubber.

Conservation and Recycling, 1(3–4), 247–271. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(77\)90014-5](https://doi.org/10.1016/0361-3658(77)90014-5)

Bugosen, S., Mantilla, I. D., & Tarazona-Vasquez, F. (2020). Techno-economic analysis of aniline production via amination of phenol. *Heliyon*, 6(12), e05778. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05778>

Cacciari, I., Quatrini, P., Zirletta, G., Mincione, E., Vinciguerra, V., Lupattelli, P., & Sermanni, G. G. (1993). Isotactic polypropylene biodegradation by a microbial community: Physicochemical characterization of metabolites produced. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(11), 3695–3700. <https://doi.org/10.1128/aem.59.11.3695-3700.1993>

Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 34(12), 2466–2486. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>

Comercio, R. El. (2021). *Generación de residuos sólidos: ¿cómo afecta la pandemia y qué medidas se pueden tomar?* <https://elcomercio.pe/casa-y-mas/mantenimiento/generacion-de-residuos-solidos-como-afecta-la-pandemia-y-que-medidas-se-pueden-tomar-noticia/?ref=ecr>

Cordova, F. (2021). IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGASIFICACIÓN PARA ABASTECER DE GAS A LAS CENTRALES TÉRMICAS DEL NODO ENERGÉTICO DEL SUR PERUANO. *7 De Mayo De 2020*, 4. <https://www.gob.mx/sener>

Craig, B. D., & Anderson, D. S. (1994). *Handbook of corrosion data*. ASM international.

Dayananda, D., Irons, R., Harrison, S., Herbohn, J., & Rowland, P. (2002). *Capital Budgeting: Financial Appraisal of Investment Projects*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511753701>

Dreamstime. (2022). Dreamstime Polymers. *Página Web*.

<https://www.dreamstime.com/polyethylene-polythene-pe-polyethene-poly-methylene-molecul-structural-chemical-formula-model-polymer-ethylene-image239215560>

EIA. (2020). *Weekly Oil Prices EIA*.

EIA. (2022). Short-Term Energy Outlook Forecast highlights. *EIA - U.S. Energy Information Administration*, 2022(March 2021), 1–51.

El Peruano. (2020). Decreto Supremo N° 003-2020-PRODUCE: Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industria. *Diario Oficial El Peruano*.

ENEL DISTRIBUCIÓN PERÚ S.A.A. (2022). *TARIFA PARA LA VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENEL PERÚ. 2022*.

Enerdata. (2021). *Enerdata*. <https://datos.enerdata.net/productos-petroliferos/estadisticas-consumo-mundial-petroleo-consumo-domestico.html>

Escudero. (2011). *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diesel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos. UNIVERSIDA*.
<https://doi.org/10.16194/j.cnki.31-1059/g4.2011.07.016>

Gao, F. (2010). *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels By Feng Gao*. 216.

Google Earth. (2021). *Google Earth Pro 2021*.

Haig, S., Morrish, L., Morton, R., Onwuamaegbu, U., Speller, P., & Simon, W. (2015). Plastics to oil products. *Xionconsulting*, 1–155. <http://www.zerowastescotland.org.uk/>

Horvat, N., & Ng, F. T. T. (1999). Tertiary polymer recycling: Study of polyethylene thermolysis as a first step to synthetic diesel fuel. *Fuel*, 78(4), 459–470.
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00158-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00158-6)

Hussein, Z. A., Shakor, Z. M., Alzuhairi, M., & Al-Sheikh, F. (2021). Thermal and catalytic cracking of plastic waste: a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1946527>

- Hyatt, N. W. (2018). *Perú limpio*.
- IEA. (2021). Key World Energy Statistics 2021. *Paris*, 1–82.
<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
- IEES. (2019). Reporte Sectorial N° 04-2019: Fabricación de productos de plástico. *lees*, 1–23. https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-Plásticos_2019.pdf
- Indeed. (2022). *Estimaciones salariales Staff planta industrial*. <https://pe.indeed.com/>
- Industriales, E. de I. (2014). *Fabricación de Envases Plásticos Destinados a la Industria Alimenticia*. 1–152. <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso11-12/Gema/envases-y-embalajes/memoriaplasticos.pdf>
- INEI. (2020). Situación del Sector Plástico en el Perú. *Instituto Nacional de Estadística e Informática*, 33.
<http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/presentacion-iii-congreso-internacional-plasticos.pdf>
- INEI. (2021). *Base de datos INEI*. <https://www.inei.gob.pe/bases-de-datos/>
- Intriago, S., & Rodríguez, P. (2017). *Degradación térmica de poliestireno en un reactor pirolítico tipo Batch para la producción de combustible alternativo*. 129.
- Jamradloedluk, J., & Lertsatitthanakorn, C. (2014). Characterization and Utilization of Char Derived from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes. *Procedia Engineering*, 69, 1437–1442. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.139>
- Jung, & Fontana. (2006). *Production of Gaseous and Liquid Fuels by Pyrolysis and Gasification of Plastics: Technological Approach* (pp. 249–283).
<https://doi.org/10.1002/0470021543.ch10>
- Jung, S.-H., Cho, M.-H., Kang, B.-S., & Kim, J.-S. (2010). Pyrolysis of a fraction of waste

- polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 277–284.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.009>
- Kaminsky, W. (1992). Possibilities and limits of pyrolysis. *Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia*, 57(1), 145–160.
<https://doi.org/10.1002/masy.19920570113>
- Khatha, W., Ekarong, S., Somkiat, M., & Jiraphon, S. (2020). Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 717(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/717/1/012001>
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1–2), 37–40. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547/5543>
- Kumagai, S., Nakatani, J., Saito, Y., Fukushima, Y., & Yoshioka, T. (2020). Latest Trends and Challenges in Feedstock Recycling of Polyolefinic Plastics. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 63, 345–364. <https://doi.org/10.1627/jpi.63.345>
- Kumar, S., Panda, A. K., & Singh, R. K. (2011a). A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 893–910. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.005>
- Kumar, S., Panda, A. K., & Singh, R. K. (2011b). A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 893–910. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.005>
- Lewandowski, W. M., Januszewicz, K., & Kosakowski, W. (2019). Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type—A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 25–53.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018>

- Luis, F., & Moncayo, G. (2013). *Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia de Lima - PIGARS*.
- Lv, G. J., Wu, S. Bin, & Lou, R. (2010). Characteristics of corn stalk hemicellulose pyrolysis in a tubular reactor. *BioResources*, 5(4), 2051–2062.
- Mangesh, V. L., Perumal, T., Subramanian, S., & Padmanabhan, S. (2020). Clean Energy from Plastic: Production of Hydroprocessed Waste Polypropylene Pyrolysis Oil Utilizing a Ni-Mo/Laponite Catalyst. *Energy and Fuels*, 34(7), 8824–8836.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01051>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- MINAM. (2009). Ley N° 29419 - Ley que regula la actividad de los recicladores. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-ley-no-29419-ley-que-regula-actividad-recicladores%0A
- MINAM. (2016). Ley De Gestión Integral De Residuos Sólidos. *El Peruano*, 1–17.
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-gestion-integral-residuos-solidos>
- MINAM. (2018). Cifras del mundo y el Perú. *Ministerio Del Ambiente*.
<https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/>
- MINAM. (2019). *Registro de empresas operadoras de residuos autorizadas por el MINAM sólidos*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1306546/MINAM Registro EO-RS - Actualizada 17-11-2020.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1306546/MINAM%20Registro%20EO-RS%20-%20Actualizada%2017-11-2020.pdf)
- MINAM, & OPS. (2015). *Reciclaje y disposición final segura de residuos sólidos*. 1–47.
<http://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39052>
- MINEM. (1993). *Ley Orgánica de Hidrocarburos*. 42(4), 1.

- MINEM. (2019). *Anuario Estadístico 2019*. 59, 102–107. http://www.aeade.net/wp-content/uploads/2020/07/AEADE-ANUARIO-2019-OK_1.pdf
- MINEM. (2020a). *Anuario Estadístico-Sector hidrocarburos*. 137.
- MINEM. (2020b). *Libro Anual de Hidrocarburos 2020*.
- MINEM. (2022). PRODUCCIÓN MENSUAL PROMEDIO DE PETRÓLEO (Barriles Por Día). *Ministerio de Energía y Minas, 2022, 2022*.
- Miranda, R., Pakdel, H., Roy, C., & Vasile, C. (2001). Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC II. Product analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 73(1), 47–67. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00066-0)
- Miranda, R., Sosa-Blanco, C., Yang, J., Pakdel, H., & Roy, C. (2005). Pyrolysis of PVC and commingled plastics: Kinetic study and product analysis. *Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition, AWMA, 2005*(January 2005).
- Morales. (2018). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la ESPOCH*. 101. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8661>
- Morales, G., Mahecha, C., & Navas, G. (2012). Ajuste de curvas de propiedades de crudos : nueva metodología e implementación en el módulo CrudeExpert Fitting crude oil property curves : new methodology and implementation into the CrudeExpert program. *Revista Ion*, 25(2), 29–37.
- Murata, K., Sato, K., & Sakata, Y. (2004). Effect of pressure on thermal degradation of polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 569–589. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.08.010>
- Naconha, A. E. (2021). *CEPCI 2021*. 4(1), 6.

- OECD. (2022). Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. In *Global Plastics Outlook*. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- ONU. (2015a). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización A/70/1*. *Naciones Unidas*, 1(1), 1–88. <https://undocs.org/es/A/70/1>
- ONU. (2015b). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización A/70/1*. *Naciones Unidas*, 1(1), 1–88.
- Oviedo, J. (2014). *Estudio de Factibilidad para Planta de Reciclado de Residuos de Plástico PET*. 103.
- Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 233–248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.005>
- PERUPETRO. (2010). *Actividades De Exploración Y Explotacion De Hidrocarburos En El Peru*. 40.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers* (Vol. 4). McGraw-Hill New York.
- PETROPERÚ S.A. (2021). *Memoria Petroperu 2020*.
- PlastPerú Digital News. (2016). *Mercado plástico peruano: Mucho espacio para crecer*. PlastPerú Digital News. <http://expoplastperu.com/plastnews/mercado-plastico-peruano-mucho-espacio-para-crecer-66/>
- Polanco, D. (2019). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de fuel oil a partir de residuos plásticos mediante un proceso pirolítico en Arequipa*.
- Prabir, B. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Published by Elsevier Inc.

- Qureshi, M. S., Oasmaa, A., & Lindfords, C. (2019). Thermolysis of plastic waste: Reactor comparison. *Pyroliq 2019: Pyrolysis and Liquefaction of Biomass and Wastes*.
- Repsol Perú. (2021). *Memoria Anual de Refinería La Pampilla 2021* (p. 44).
- Ríos, P., & Calvo, M. (2011). Proyecto De Biocombustible: Planta De Pirólisis. *Instituto Tecnológico de Buenos Aires*, 167.
- Rosero, J. (2015). *Identificación Y Evaluación De Riesgo De Incendio Y Explosión En El Área De Almacenamiento De Productos Limpios, Tanque 1020, Simulación De Efectos En Caso De Emergencia*. 1–1996.
http://repositorio.uisek.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/1269/1/TESIS_Gestion_Ergonomica_Proano_Representaciones.pdf
- Roy, G. K. (2013). A Novel Process of Converting Polyethylene to Gasoline , Middle Distillate and Heavy Oil through Hydropyrolysis Route. *International Journal of Energy Engineering* 2013, 3(3), 147–157. <https://doi.org/10.5923/j.ijee.20130303.04>
- S&P Global Ratings. (2020). *Gas Natural de Lima y Callao S . A . (Calidda)*. 2022, 1–10.
[https://www.calidda.com.pe/Inversionistas/CalificacionesRiesgo/Clasificación S%26P - Cálidda 04.20 \(ESP\).pdf](https://www.calidda.com.pe/Inversionistas/CalificacionesRiesgo/Clasificación S%26P - Cálidda 04.20 (ESP).pdf)
- Scalenghe, R. (2018). Resource or waste? A perspective of plastics degradation in soil with a focus on end-of-life options. *Heliyon*, 4(12), e00941.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00941>
- Scheirs & Kaminsky. (2006). Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics. In *Focus on Catalysts* (Vol. 2006, Issue 9). [https://doi.org/10.1016/s1351-4180\(06\)71853-0](https://doi.org/10.1016/s1351-4180(06)71853-0)
- Schneiderman, D. K., & Hillmyer, M. A. (2017). 50th Anniversary Perspective: There Is a Great Future in Sustainable Polymers. *Macromolecules*, 50(10), 3733–3749.
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.7b00293>
- SEDAPAL S.A. (2021). *Servicio de agua potable y alcantarillado de Lima - Estructura*

- Tarifaria*. 2021.
- SIGERSOL. (2018). Reporte Anual. *MINAM*, 5(1), 43–54.
<http://www.akrabjuara.com/index.php/akrabjuara/article/view/919>
- Sobko, A. A. (2008). Generalized van der Waals-Berthelot equation of state. *Doklady Physics*, 53(8), 416–419. <https://doi.org/10.1134/S1028335808080028>
- Sohel, R. (2012). *Feasibility study of Plastic to Diesel factory at Dhaka in Bangladesh*. 1–48.
- Solis, M., & Silveira, S. (2020). Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, 105, 128–138.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>
- Stclair-Pearce, T., & Garbett, D. (2018). *Plastic Waste Thermal Cracking New Energy Investment Business Plan*.
- SUNAT. (2020). *Aduanet, 2020*. <http://www.aduanet.gob.pe/cl-ad-itestadispartida/resumenPPaisS01Alias>
- Tansel, B., & Inanloo, B. (2019). Odor impact zones around landfills: Delineation based on atmospheric conditions and land use characteristics. *Waste Management*, 88, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.028>
- Timana, J., Ubillas, C., Pretell, V., Manrique, H., Ramos, W., Timana, J., Ubillas, C., Pretell, V., Manrique, H., & Ramos, W. (2022). *Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste*
Análisis Tecno-Económico de una Planta de Pirólisis Obtenida por Simulación Para Producir Petróleo Sintético a Partir de Residuos Plásticos Te. 1–9.
- Towler, G., & Sinnott, R. K. (2013). *Chemical Engineering Design - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design (2nd Edition)*. In *Elsevier*.

- Tukker, A., Groot, H. De, Simons, I., & Wiegiersma, S. (1999). Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins). *TNO Institute of Strategy, Technology and Policy*, 1–132. http://www.pvc.dk/billeder/word/chem_recycle.pdf
- UNEP. (2020). *Plastic Demand and Waste Increase During the Pandemic*.
- UNEP. (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. In *New Scientist* (Vol. 237, Issue 3169). [https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(18\)30486-X](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(18)30486-X)
- Uriarte Cáceres, D. N. (2018). Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir del polietileno de alta densidad. *Concytec*.
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_3deb0434f609479d1bf12f956e1f88f7
- Urionabarrenechea, A. L. (2011a). *Chemical recycling of municipal packaging waste by pyrolysis*. <https://addiehu.ehu.es/handle/10810/7211>
- Urionabarrenechea, A. L. (2011b). *Chemical recycling of municipal packaging waste by pyrolysis*.
- Vashchuk, A., Fainleib, A. M., Starostenko, O., & Grande, D. (2018). Application of ionic liquids in thermosetting polymers: Epoxy and cyanate ester resins. *Express Polymer Letters*, 12(10), 898–917. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2018.77>
- Vatavuk, W. M. (2002). Updating the Cost Index. *Chemical Engineering, January*, 62–70.
- Villela, Lucia maria aversa. (2013). 濟無No Title No Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Wastecare Corp. (2013). <https://www.wastecare.com/>. <https://www.wastecare.com/>
- White, J. R., & De, S. K. (2001). *Rubber Technologist 's Handbook , Volume 1* (Vol. 2).
- Williams, P. T. (2006). Yield and Composition of Gases and Oils/Waxes from the

Feedstock Recycling of Waste Plastic. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*, 285–313.

<https://doi.org/10.1002/0470021543.ch11>

World Bank. (2016). *World Bank Commodities Price Forecast (nominal US dollars)*.

January, 1–4. <http://pubdocs.worldbank.org/en/764161469470731154/CMO-2016-July-forecasts.pdf>

Zhang, Y., Ji, G., Chen, C., Wang, Y., Wang, W., & Li, A. (2020). Liquid oils produced from pyrolysis of plastic wastes with heat carrier in rotary kiln. *Fuel Processing Technology*, 206(March), 106455. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106455>

Anexos

Anexo 1: Acta de sustentación.....	1
Anexo 2: Autorización para la publicación en acceso abierto en el Repositorio Institucional de la UNI	2
Anexo 3: Hoja de Metadatos.....	4
Anexo 4.1: Constancia de originalidad.....	5
Anexo 4.2: Reporte de análisis de originalidad	6
Anexo 6. Tablas de crudo importado a Perú	7
Anexo 7. Contratos de exploración de petróleo.....	16
Anexo 8. Contratos de explotación de petróleo.....	17
Anexo 9. Tabla de materiales e insumos	21
Anexo 10. Tabla de requerimiento de personal.....	22
Anexo 11. Tabla de equipamiento y maquinaria	23
Anexo 12. Tabla de inversión en infraestructura	24
Anexo 13. Tabla de activos intangibles.....	25
Anexo 14. Tabla de gastos de operación	26
Anexo 15. Tabla de resumen de costos.....	27
Anexo 16. Tabla de estructura de costos.....	28
Anexo 17. Tabla de cronograma de pagos por préstamos	29
Anexo 18. Diagrama P&ID de instrumentación del proceso de pirólisis	30
Anexo 19. Descripción y dimensionamiento de equipos	31
Anexo 20. Procedimiento de la simulación.....	32
Anexo 21. Artículo presentado al LACCEI 2022.....	36

Anexo 1

Acta de sustentación

Anexo 2

Autorización para la publicación en Acceso Abierto en el Repositorio institucional de la UNI

Datos del autor

Nombre y Apellidos: Juan Luis Timaná Lanfranco

DNI / Carné de extranjería / Pasaporte No: 72369889

Correo electrónico: jtimanal@fip.uni.edu.pe

Teléfono: 936425548

Datos del documento:

Modalidad de sustentación:

- Tesis
- Trabajo de suficiencia profesional
- Tesina

X

Nombre del grado o título:

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Petroquímico

Ejm: para obtener el grado de bachiller en ciencias con mención en física

Nombre del documento:

Diseño y simulación de una planta de pirólisis para producir petróleo sintético a partir de residuos plásticos

Asesor(es):

MSc. Víctor Hugo Pretell Huamán

Facultad:

Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica

Declaración:

Con la presentación de este documento, el (la) autor (a) confirman la originalidad de la obra y que el contenido redactado es producto de su trabajo. Asimismo, garantiza ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual. También, acepta que los contenidos entregados se pueden leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna para su posterior registro en el Repositorio Institucional -UNI.

Por lo tanto, Autorizo a la Universidad Nacional de Ingeniería a publicar la obra en el Repositorio Institucional de la UNI avalado por la Ley N° 30035 que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, su Reglamento (DS N° 006-2015-PCM), así como sus modificatorias, sustitutorias y conexas con el propósito de conservar, preservar y dar acceso abierto a estos recursos.

En consecuencia, la Universidad Nacional de Ingeniería tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna en los medios, canales y plataformas que la Universidad, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los contenidos, e incluirlos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover la investigación y el trabajo colaborativo.

Autorizo que el documento sea puesto a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Firma: _____



Nombre: Juan Luis Timaná Lanfranco

DNI / Carné de extranjería / Pasaporte N°: 72369889

Domicilio: Urb. Juan Velasco Mz. H1 Lote 38

20/12/2023

Fecha

Anexo 3

Hoja de Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y Apellidos	Juan Luis Timaná Lanfranco
DNI o Pasaporte	72369889
ORCID	0009-0002-0565-9712
Datos de asesor	
Nombres y Apellidos	Víctor Hugo Pretell Huamán
DNI o pasaporte	08989157
ORCID	0000-0002-3564-5381
Presidente del jurado 1	
Nombres y Apellidos	
DNI	
Revisor jurado 2	
Nombres y Apellidos	
DNI	
Datos de investigación	
Línea de investigación	Pirólisis
Grupo de investigación	Grupo de Procesos Termoquímicos y Energéticos
Agencia financiadora	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Lima
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021-2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería Petroquímica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03

Anexo 4.1. Constancia de originalidad

Anexo 4.2. Reporte de análisis de originalidad

Anexo 5. Tablas de crudo importado a Perú

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
ECUADOR	Mundo	6355235	5053937	6189824	7853414	7731163
	Estados Unidos de América	4037761	2812816	3407989	4009531	3812344
	Panamá	259050	285397	281465	517758	1485928
	Chile	881696	885553	955171	1145406	1211126
	Perú	665596	654712	957011	1267642	603331
	China	157009	230912	339083	479691	261105
	Japón	140295	107970	189627	123353	160707
	Jamaica	0	13701	0	20618	82740
	India	49996	0	48805	234174	59644
	Corea, República de	110885	0	0	0	51986
	Pitcairn	0	0	0	0	2254
	Bahamas	0	0	0	36802	0
	Brasil	1	0	0	0	0
	Colombia	0	0	10673	0	0
	Estonia	0	0	0	18438	0
	Aruba	0	9098	0	0	0
	Nicaragua	53946	53779	0	0	0
ESTADOS UNIDOS DE AMERICA	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Mundo	8820941	9462122	22502431	48261572	65323191
	Canadá	8158897	5634364	6678819	10385093	10082528
	Corea, República de	58183	149446	1114035	5805328	9339187
	Países Bajos	95997	785227	1805158	3169239	6129500
	India	17325	0	481298	3551023	5639033
	Reino Unido	0	147973	1970785	3881127	5304124
	Taipei Chino	0	0	354237	3293604	3525274
	China	15354	360620	4378736	5430627	2901414
	Italia	80334	356105	987771	2474938	2688172
	Tailandia	0	83105	310371	853067	2399271
	Singapur	0	217384	451908	919576	1848850
	Francia	28832	122311	587233	574982	1809466
	Brasil	34780	7714	221075	634697	1188831
	Japón	0	136757	504320	1480329	1133752
	España	100607	114881	407087	522566	1093302
	Australia	0	0	0	10	987704
Irlanda	0	0	0	332922	948406	
Chile	0	0	0	282105	836508	
Panamá	0	48697	33715	40677	827130	

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Emiratos Arabes Unidos	0	0	100999	669997	819111
	Dinamarca	0	0	36416	337554	715371
	Alemania	0	0	0	62541	691570
	Perú	0	127194	87881	169712	626834
	Noruega	0	0	81026	787552	547786
	Colombia	0	169220	370959	561801	411646
	Uruguay	0	0	0	92125	349611
	República Dominicana	0	15387	46712	230281	332540
	Polonia	0	0	32358	210565	318228
	Grecia	0	24709	0	110497	296239
	Viet Nam	0	0	0	0	278126
	Israel	0	28783	0	0	260146
	Nicaragua	0	78513	44027	107256	229029
	Suecia	0	0	0	56340	113336
	Bélgica	0	0	0	0	93833
	Indonesia	0	0	0	0	93192
	Malasia	0	0	367366	439209	92475
	Croacia	0	0	0	72893	87689
	Sudáfrica	0	17223	21575	120494	74274
	Jamaica	0	0	0	0	58594
	Lituania	0	0	0	0	39471
	Suiza	230632	228051	67837	105288	36495
	Bulgaria	0	0	0	0	30342
	México	0	0	0	68008	28275
	Filipinas	0	0	0	0	15669
	Argentina	0	28636	132101	40963	861
	Territorio Británico del Océano Índico	0	0	27656	0	0
	Gibraltar	0	0	16225	31955	0
	Curacao	0	497077	213498	168229	0
	Islas Marshall	0	19752	0	0	0
	Bahamas	0	35100	355176	54918	0
	Georgia	0	0	1171	0	0
	Hong Kong, China	0	0	109225	0	0
	Nigeria	0	22912	0	0	0
	Papua Nueva Guinea	0	4982	0	0	0
	Portugal	0	0	0	131482	0
	Togo	0	0	47633	0	0
	Trinidad y Tobago	0	0	27340	0	0
	Turquía	0	0	28701	0	0
	Importadores	Valor exportado en 2011	Valor exportado en 2012	Valor exportado en 2013	Valor exportado en 2014	Valor exportado en 2015

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
TRINIDAD Y TOBAGO	Mundo	1519186	1243665	916523	1344625	271333
	Perú	0	0	0	154175	185157
	Estados Unidos de América	1322329	1080041	787447	1098919	86176
	Colombia	0	0	41114	2	0
	Hungría	196856	125869	0	0	0
	Países Bajos	0	37754	0	91529	0
	Singapur	0	0	87961	0	0
COLOMBIA	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Mundo	12834380	8081951	10916373	13671260	12986757
	Estados Unidos de América	4361433	3906634	4389500	4042270	4898843
	China	1796758	871121	1595862	3098645	3930436
	Panamá	2033969	1462440	2247362	3203281	1930671
	Santa Lucía	158027	66760	617130	795670	867237
	Países Bajos	141101	37568	0	30712	390116
	Ecuador	0	171	35975	219660	264266
	Bahamas	650601	294208	767064	385080	209834
	Perú	105634	119871	158693	170896	156378
	Côte d'Ivoire	88532	93851	25720	100763	124115
	Singapur	195857	0	65829	122417	55061
	India	436402	0	1096	320848	52782
	Jamaica	10184	24144	43455	63418	49661
	Aruba	724744	298204	82285	155309	26029
	Uruguay	0	0	0	18157	25009
	Chile	881	17718	8182	37599	4473
	Japón	100719	2894	16099	1461	1848
	Bonaire, San Eustaquio y Saba	0	1791	0	0	0
	Estados Unidos Minor, periférico Islas	0	0	23958	0	0
	Zona Nep	398108	185044	52263	0	0
	Canadá	74225	0	42881	71666	0
	Francia	3772	0	0	0	0
	Alemania	47316	29292	34509	0	0
	Italia	95769	18332	39593	0	0
	Corea, República de	47820	0	0	65047	0
	Malasia	54112	40290	114253	96958	0
	Taipei Chino	25482	0	0	0	0
	Nicaragua	0	0	37144	61975	0
	Eslovenia	25520	0	0	0	0
Sudáfrica	108591	20766	0	0	0	
España	907032	559754	220656	338856	0	

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Trinidad y Tobago	140675	41097	222994	272573	0
	Turquía	101117	0	73870	0	0
NIGERIA	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Mundo	34402932	28523867	33254677	43566996	41045144
	India	7597137	5738255	6575916	7680055	7572968
	Países Bajos	5027210	2460106	3098849	4273902	4503816
	España	3664351	2360683	3146835	4673324	4450807
	Sudáfrica	2527174	1896956	1821360	3371314	3127202
	Estados Unidos de América	724239	3993454	4808804	3068203	2708945
	Francia	2172358	1794015	2470815	3407507	2680945
	Italia	1002832	678855	886863	1508910	2078376
	Indonesia	1106562	1313724	1300465	2126581	1432317
	Canadá	527441	941919	1403279	1470650	1338196
	Côte d'Ivoire	1034302	823514	586165	1111996	1132000
	Reino Unido	1396921	1168296	1084033	1893810	1079342
	China	381545	183176	311877	132980	970934
	Alemania	734920	570887	581987	1057359	879608
	Suecia	413897	697185	882035	2015504	853337
	Turquía	110315	0	70087	19986	779196
	Brasil	2703223	625657	379633	1498429	702735
	Polonia	59162	46821	0	164446	483999
	Tailandia	42155	0	280895	553730	462507
	Togo	52779	184419	882834	811463	453674
	Senegal	438755	495831	336403	585055	380343
	Australia	45260	59843	351084	216667	368909
	Camerún	330185	504331	319641	225516	347344
	Malasia	197206	120044	162487	118350	240590
	Ghana	113308	320702	115797	30975	230452
	Singapur	318636	386282	183379	83192	222396
	Noruega	51638	9935	0	0	217012
	Portugal	94507	213050	113907	0	204711
	Uruguay	282997	144350	223908	236804	204471
	Gibraltar	77628	259600	244552	111503	190933
	Dinamarca	402528	15549	46802	0	179417
	Perú	0	53490	47156	124378	153080
	Corea, República de	0	0	0	126365	114038
Dominica	0	0	0	0	62547	
República Dominicana	0	0	114514	309985	56327	
Viet Nam	0	0	0	0	52237	
Emiratos Arabes Unidos	0	0	53062	0	52137	
Filipinas	0	0	0	46399	49706	
Croacia	0	0	0	0	27591	

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Croacia	0	0	0	0	27591
	Curacao	47838	0	0	0	0
	Eur. Otros Nap.	60929	0	0	99639	0
	Otros Africa	61876	0	0	0	0
	Zona Nap.	54942	0	14799	158651	0
	Otros Asia	0	0	0	57260	0
	Angola	61693	0	0	0	0
	Argentina	198440	171937	281145	108538	0
	Cabo Verde	0	103890	0	0	0
	Colombia	25905	37283	0	0	0
	Irlanda	54190	13307	28786	61982	0
	Lituania	118846	0	0	0	0
	Taipei Chino	0	0	44525	65432	0
	Aruba	44710	0	0	0	0
	Panamá	0	126730	0	0	0
	Rumania	0	0	0	60159	0
Túnez	42393	9793	0	0	0	
ANGOLA		Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Mundo	41231709	25577533	31057113	36539448	31334932
	China	19972638	13865278	19259800	23715917	21232630
	India	3397856	1946636	2629327	3245466	2767255
	Portugal	1242170	796780	280085	1057776	1100959
	España	2599575	816656	913637	1168314	1092688
	Estados Unidos de América	1467815	1305683	912528	1160712	855328
	Italia	1383632	479571	460150	474165	740924
	Tailandia	140773	17009	189427	671493	580479
	Francia	1620469	890780	314798	620623	492793
	Sudáfrica	1777445	1266471	1335814	1121412	359157
	Uruguay	0	196227	0	333045	343424
	Malasia	235846	478781	571026	257150	245054
	Singapur	247246	0	135930	379210	242533
	Polonia	0	0	0	0	231797
	Chile	53656	0	0	0	188584
	Israel	0	0	69266	423547	186776
	Taipei Chino	1775434	1130868	1386482	150792	182906
	Noruega	0	0	0	0	126425
	Países Bajos	1000025	420915	0	68618	121957
	Perú	0	0	40076	0	64847
	Corea, República de	50147	103259	44271	0	61375
	Emiratos Arabes Unidos	0	0	0	0	61214
	Japón	236957	0	187924	201010	55827
Caribe Nap.	40578	0	0	0	0	

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Curacao	82592	0	0	0	0
	Islas Marshall	10640	0	0	0	0
	Australia	0	0	0	21891	0
	Bahamas	0	64442	0	0	0
	Canadá	1506665	872994	1078888	682789	0
	Colombia	111930	292968	457063	0	0
	Dinamarca	35844	0	0	0	0
	Finlandia	42573	0	0	0	0
	Indonesia	712771	286208	414725	601522	0
	Namibia	0	0	3	0	0
	Panamá	495024	39258	184402	129361	0
	Rumania	45268	0	0	0	0
	Togo	41238	0	89664	0	0
	Reino Unido	904708	306761	111826	54634	0
CONGO	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Mundo	2672337	1528701	3645546	9109675	4409488
	China	1323543	815908	2653471	6696281	3018931
	India	116298	0	37565	97072	672320
	Estados Unidos de América	175572	82363	82275	196277	174771
	España	37445	113110	176735	115488	142272
	Australia	102967	99844	235655	141376	108753
	Israel	0	0	50437	66768	64202
	Portugal	269914	37362	49719	50873	55484
	Malasia	41991	0	17405	102864	54753
	Italia	319298	301364	241504	727962	53582
	Singapur	0	0	100780	447392	31434
	Indonesia	0	0	0	0	28222
	Canadá	53902	0	0	159657	4763
	Camerún	1767	0	0	0	0
	Francia	41866	38640	0	90470	0
	Gabón	0	0	0	49718	0
	Corea, República de	0	0	0	85785	0
	Taipei Chino	0	40110	0	0	0
	Noruega	120188	0	0	0	0
Viet Nam	67587	0	0	0	0	
Togo	0	0	0	81691	0	
Perú	0	0	0	0	0	
BRASIL	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Mundo	11781324	10073805	16625024	25130987	24002334
	China	4138635	3908156	7351046	14334414	15395141
	Estados Unidos de América	1923922	1120848	2648443	3076150	3191908

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Chile	1120995	1088695	1507701	2057618	1190402
	India	1103342	671429	1498101	1138950	967568
	España	396983	411084	959338	2029113	791020
	Uruguay	1268615	1340140	739971	1241396	757030
	Países Bajos	179696	194986	135024	0	404309
	Portugal	206583	78577	359518	356357	264445
	Singapur	0	0	63593	54928	255091
	Malasia	74308	21313	48676	26778	224234
	Francia	0	24787	0	0	121390
	Noruega	0	0	2	5	113716
	Indonesia	0	0	0	0	60801
	Luxemburgo	0	0	0	0	60553
	Corea, República de	0	0	0	0	58947
	Santa Lucía	670317	364624	441142	400093	53592
	Filipinas	0	0	0	0	52103
	Bahamas	535728	283140	164272	0	29863
	Jamaica	0	0	0	0	10221
	Côte d'Ivoire	0	0	0	0	1
	Argentina	0	0	22184	0	0
	Bolivia, Estado Plurinacional de	6	3	0	0	0
	Canadá	99334	0	0	0	0
	Colombia	0	122475	0	29793	0
	Croacia	0	14989	0	0	0
	Hong Kong, China	0	0	71715	0	0
	Italia	0	102538	0	0	0
	México	1	0	0	0	0
	Taipei Chino	0	166429	289585	116846	0
	Aruba	12974	48383	0	0	0
	Panamá	0	0	185179	181682	0
	Paraguay	13	6	27	1	0
	Perú	49869	60201	139508	22923	0
	Arabia Saudita	0	0	0	0	0
	Sudáfrica	0	0	0	63942	0
	Trinidad y Tobago	0	21887	0	0	0
	Reino Unido	0	29316	0	0	0
PAISES BAJOS	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Mundo	184061	77530	65168	119434	75527
	Reino Unido	2293	1556	11166	59790	21668
	Malasia	0	0	0	0	16563
	China	0	0	0	0	15529
	Bélgica	32672	7005	4446	243	11009
	Gibraltar	0	0	0	0	5056

Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
Dinamarca	61	5	51	4	2184
Francia	260	0	0	0	1675
Alemania	123946	68721	49267	46215	1496
Polonia	48	7	18	0	249
España	66	28	0	0	51
Australia	0	0	0	0	22
Emiratos Arabes Unidos	0	0	0	16	16
Zona Nep.	0	0	0	0	7
Suriname	0	0	0	0	2
Kazajstán	0	0	0	0	1
Tanzania					
República Unida de	0	0	0	0	1
Eur. Otros					
Nep.	1	0	0	0	0
Austria	66	8	127	0	0
Bulgaria	3	1	0	0	0
Canadá	0	0	0	13161	0
Croacia	1	0	0	0	0
Chipre	3	0	0	0	0
República Checa	18	2	0	2	0
Estonia	8	1	11	0	0
Finlandia	41	8	0	0	0
Grecia	7	4	0	0	0
Hungría	46	2	0	0	0
Indonesia	0	0	0	1	0
Irán, República Islámica del	0	0	0	0	0
Irlanda	30	4	41	0	0
Italia	178	21	27	0	0
Letonia	2	1	0	0	0
Lituania	5	0	0	0	0
Luxemburgo	27	3	0	0	0
Malta	5	1	0	0	0
Noruega	10	0	0	0	0
Perú	0	0	0	0	0
Portugal	19	1	13	0	0
Qatar	0	0	0	0	0
Rumania	120	136	0	0	0
Rusia, Federación de	0	0	0	0	0
Arabia Saudita	0	0	0	0	0
Eslovaquia	14	1	0	0	0
Eslovenia	6	2	0	0	0
Sudáfrica	0	0	1	0	0
Suecia	51	11	0	0	0

	Importadores	Valor exportado en 2015	Valor exportado en 2016	Valor exportado en 2017	Valor exportado en 2018	Valor exportado en 2019
	Túnez	0	0	0	0	0
	Estados Unidos de América	24053	0	0	0	0
	TOTAL PERU	821099	1015468	1430323	1909726	1789627
	TOTAL MUNDO	119802105	89623111	125172679	185597411	187179889

Fuente: Tomado de (SUNAT, 2020)

Anexo 6. Contratos de exploración de petróleo

CONTRATOS EN EXPLORACIÓN VIGENTES AL 31/12/2020								
Zona	Lote	Compañías/ Consortios	Decreto Supremo	Fecha D.S.	Fecha Suscripción	Tipo Contrato		
Selva Central	107	PETROLÍFERA	029-2005-EM	11/08/2005	1/09/2005	LICENCIA		
		PETROLEUM DEL	A/D 109-2007	18/08/2007	22/10/2007			
		PERU S.A.C.(100%)	050-2010-EM	13/08/2010	18/08/2010			
			009-2015-EM	30/04/2015	2/06/2015			
			002-2017- EM	12/01/2017	25/09/2017			
Noroeste	XXI	GOLD OIL	024-2006-EM	20/04/2006	4/05/2006	LICENCIA		
		PERU S.A.C (100%)	018-2012-EM	4/06/2012	10/07/2012			
			030-2015-EM	23/09/2015	9/02/2016			
		XXIII	UPLAND OIL & GAS LLC (100%)	062-2007-EM	21/11/2007		21/11/2007	LICENCIA
				016-2016-EM	17/05/2017		17/05/2017	
	XXVII	PETRO BAYOVAR INC. S.A., SUCURSAL DEL PERU (100%)	023-2009-EM	16/04/2009	16/04/2009	LICENCIA		
			034-2016-EM	24/11/2017	24/11/2017			
	XXIX	RICOIL S.A.	026-2015-EM	12/08/2015	18/09/2015	LICENCIA		
Zócalo	Z-38	KEI (PERU Z-38) PTY LTD., SUCURSAL DEL PERU (75%)	013-2007-EM	3/03/2007	12/04/2007	LICENCIA		
		PITKIN PETROLEUM PERU Z-38 S.R.L. (25%)	052-2008-EM	3/10/2008	17/11/2008			
			083-2009-EM	24/11/2009	9/12/2009			
			006-2011-EM	17/03/2011	5/05/2011			
			016-2012-EM	21/05/2012	21/08/2012			
		Z-61	ANADARKO PERÚ B.V., SUCURSAL DEL PERÚ (100%)	006-2019-EM	6/04/2019	30/04/2019	LICENCIA	
		Z-62	ANADARKO PERÚ B.V., SUCURSAL DEL PERÚ (100%)	029-2017-EM	18/09/2017	9/10/2017	LICENCIA	
		Z-63	ANADARKO PERÚ B.V., SUCURSAL DEL PERÚ (100%)	030-2017-EM	18/09/2017	9/10/2017	LICENCIA	
		Z-64	TULLOW PERU LIMITED, SUCURSAL DEL PERÚ (100%)	031-2017-EM	18/09/2017	9/10/2017	LICENCIA	
		Z-67	TULLOW PERU LIMITED, SUCURSAL DEL PERÚ (100%)	012-2019-EM	30/04/2019	3/05/2019	LICENCIA	
	Z-68	TULLOW PERU LIMITED, SUCURSAL DEL PERÚ (100%)	016-2020-EM	2/07/2020	17/07/2020	LICENCIA		
			017-2020-EM	2/07/2020	17/07/2020	LICENCIA		
TOTAL CONTRATOS EXPLORACIÓN						12		

Fuente: Tomado de (MINEM, 2020)

Anexo 7. Contratos de explotación de petróleo

CONTRATOS EN EXPLOTACIÓN VIGENTES 2020					
Lote	Compañías/ Consorcios	Decreto Supremo	Fecha de Publicación	Fecha de Suscripción	Tipo de Contrato
I	G. M. P. S.A. (100%)	030-91-EM	24/12/1991	27/12/1991	SERVICIOS
		025-93-EM	11/06/1993	11/06/1993	
		25-95-EM	26/07/1995	31/07/1995	
		028-98-EM	19/07/1998	13/08/1998	
		019-2002-EM	25/05/2002	17/06/2002	
		019-2002-EM	22/03/2010	22/03/2010	
II	PETROLERA MONTEERRICO S.A. (100%)	039-95-EM	11/12/1995	5/01/1996	LICENCIA
		018-97-EM	3/09/1997	1/10/1997	
		031-99-EM	21/08/1999	3/11/1999	
		013-2004-EM	3/06/2004	16/06/2004	
		001-2005-EM	3/02/2005	1/03/2005	
		030-2005-EM	11/08/2005	25/08/2005	
III	G. M. P. S.A. (100%)	004-2015-EM	31/03/2015	31/03/2015	LICENCIA
IV	G. M. P. S.A. (100%)	005-2015-EM	31/03/2015	31/03/2015	LICENCIA
V	G. M. P. S.A. (100%)	038-93-EM	10/09/1993	8/10/1993	SERVICIOS
		031-2002-EM	27/09/2002	21/10/2002	
VI / VII	SAPET DEVELOPMENT PERU INC., SUC.PERU (100%)	040-93-EM	13/09/1993	22/10/1993	LICENCIA
		001-96-EM	17/01/1996	21/02/1996	
		005-2000-EM	11/04/2000	1/05/2000	
		016-2003-EM	21/05/2003	16/06/2003	
		003-2006-EM	6/01/2006	3/03/2006	
IX	EMPRESA PETROLERA UNIPETRO ABC S.A.C. (100%)	048-2014-EM	-	24/07/2015	LICENCIA
		014-2015-EM	16/06/1993	16/06/2015	
X	CNPC PERU S.A. (100%)	15-94-EM	15/03/1994	20/05/1994	LICENCIA
		33-96-EM	17/10/1996	17/10/1996	
		42-96-EM	16/12/1996	17/12/1996	
		006-2000-EM	11/04/2000	8/05/2002	
		027-2001-EM	16/06/2001	16/07/2001	
		020-2004-EM	25/06/2004	21/07/2004	
		035-2004-EM	16/09/2004	16/09/2004	
		017-2014-EM	30/05/2014	6/11/2014	
XIII	OLYMPIC PERU, INC., SUC.DEL PERU (100%)	011-2019-EM	13/04/2019	1/07/2019	LICENCIA
		015-96-EM	24/03/1996	30/05/1996	
		019-2008-EM	28/03/2008	11/01/2009	
XV	PETROLERA MONTEERRICO S.A. (100%)	051-2011-EM	31/12/2011	31/12/2011	LICENCIA
		013-98-EM	18/04/1998	26/05/1998	
		001-2000-EM	8/01/2000	25/02/2000	
XX	PETROLERA MONTEERRICO S.A. (100%)	047-2014-EM	27/12/2014	29/01/2015	LICENCIA
		01-2006-EM	5/01/2006	19/01/2006	
		049-2008-EM	30/09/2008	9/12/2008	LICENCIA

Lote	Compañías/ Consorcios	Decreto Supremo	Fecha de Publicación	Fecha de Suscripción	Tipo de Contrato
Z-2B	SAVIA PERUANA S.A. (100%)	044-93-EM	1/11/1993	16/11/1993	OPERACIONES
		RS 158-1999-EM	31/12/1999	31/12/1999	
		052-2001-EM	14/11/2001	30/11/2001	
Z-1	BPZ EXPLORACION & PRODUCCION S.R.L.(51%) FRONTERA ENERGY OFF SHORE PERU S.R.L.(49%)	045-2002-EM	25/10/2002	23/01/2003	LICENCIA
		003-2004-EM	13/02/2004	18/03/2004	
		A/D 044-2004	21/07/2004	26/07/2004	
		002-2005-EM	3/02/2005	3/02/2005	
		060-2008-EM	28/11/2008	12/01/2009	
Z-6	SAVIA PERU S.A. (100%)	049-2012-EM	29/12/2012	3/01/2013	LICENCIA
		005-2002-EM	20/02/2002	20/03/2002	
192	PACIFIC STRATUS ENERGY (100%)	037-2005-EM	9/10/2005	14/11/2005	LICENCIA
		027-2015-EM	29/08/2015	30/08/2015	
8	PLUSPETROL NORTE S.A. (60%) KOREA NATIONAL OIL CORP.,SUC. PERUANA(20%) DAEWOO INTERNATIONAL CORP., SUC.PERUANA (11,67%) SK CORPORATION, SUC. PERUANA (8.33 %)	16-94-EM	16/03/1994	20/05/1994	LICENCIA
		030-96-EM	21/07/1996	22/07/1996	
		028-2002-EM	6/09/2002	18/12/2002	
		009-2003-EM	20/03/2003	16/05/2003	
		15-2010-EM	5/03/2010	30/06/2010	
39	PERENCO PERÚ PETROLEUM LIMITED, SUCURSAL DEL PERÚ (20%) PERENCO PERÚ BLOCK 39 LIMITED, SUCURSAL DEL PERÚ (9.5%) PERENCO PERÚ PETROIL LIMITED, SUCURSAL DEL PERÚ (25.5%) PVPE PERÚ, SUCURSAL PERUANA (35%) RELIANCE EXPLORATION & PRODUCTION DMCC, SUCURSAL DEL PERÚ (10%)	028-99-EM	8/07/1999	9/09/1999	LICENCIA
		008-2001-EM	5/02/2001	23/04/2001	
		039-2002-EM	25/10/2002	23/01/2003	
		014-2003-EM	7/05/2003	29/05/2003	
		038-2003-EM	11/11/2003	27/11/2003	
		018-2005-EM	23/06/2005	25/08/2005	
		A/D 087-2005	16/11/2005	18/11/2005	
		029-2006-EM	25/05/2006	7/08/2006	
		A/D 125-2007	04/10/2007	17/10/2007	
		041-2009-EM	15/04/2009	21/05/2010	
64	GEPARK PERÚ S.A.C.(75%)/PETROLEOS DEL PERU - PETROPERU S.A.(25%)	025-2012-EM	27/06/2012	27/08/2012	LICENCIA
		026-2014-EM	15/08/2014	29/09/2014	
		33-95-EM	5/11/1995	7/12/1995	
		049-99-EM	19/09/1999	26/10/1999	
		005-2001-EM	4/02/2001	10/05/2001	
		006-2004-EM	15/03/2004	17/03/2004	
		027-2004-EM	22/07/2004	9/08/2004	
		077-2007-EM	21/11/2007	5/12/2007	
		009-2010-EM	11/02/2010	5/04/2010	
		021-2010-EM	29/04/2010	11/05/2010	
	011-2013-EM	26/04/2013	29/04/2013		
	031-2016-EM	1/12/2016	2/12/2016		

Lote	Compañías/ Consorcios	Decreto Supremo	Fecha de Publicación	Fecha de Suscripción	Tipo de Contrato
67	PERENCO PERU PETROLEUM LIMITED, SUCURSAL DEL PERÚ(5%)/PVEP - PERENCO PERU LIMITED, SUCURSAL DEL PERU(95%)	38-95-EM	10/12/1995	13/12/1995	LICENCIA
		32-97-EM	26/12/1997	26/02/1998	
		048-99-EM	18/09/1999	24/01/2000	
		007-2001-EM	5/02/2001	23/04/2001	
		008-2003-EM	20/03/2003	1/04/2003	
		044-2005-EM	20/10/2005	28/11/2005	
		056-2007-EM	17/11/2007	28/11/2007	
		043-2010-EM	20/07/2010	1/09/2010	
042-2010-EM	10/11/2013	10/11/2013			
95	PETROTAL PERU S.R.L. (100%)	010-2005-EM	18/03/2005	7/04/2005	LICENCIA
31-C	AGUAYTIA ENERGY DEL PERU S.R.L.(100%)	21-94-EM	30/03/1994	30/03/1994	LICENCIA
		26-96-EM	17/07/1996	25/07/1996	
		021-99-EM	16/06/1999	10/09/1999	
		036-2001-EM	13/07/2001	20/07/2001	
131	CEPSA PERUANA S.A.C. (100%)	075-2007-EM	21/11/2007	21/11/2007	LICENCIA
		042-2008-EM	13/08/2008	10/09/2008	
		013-2017-EM	26/04/2017	12/05/2017	
56	PLUSPETROL PERU CORPORATION S.A.(2,2%)/SONATRACH PERU CORPORATION S.A.C.(10%)/PLUSPETROL LOTE 56 S.A.(42.6%)/TECPETROL BLOQUE 56 S.A.C.(10%)/HUNT OIL COMPANY OF PERU L.L.C.,SUCURSAL DEL PERU(25,2%)/REPSOL EXPLORACIÓN PERÚ, SUCURSAL DEL PERÚ(10%)	033-2004-EM	27/08/2004	7/09/2004	LICENCIA
		060-2005-EM	13/12/2005	16/12/2005	
		039-2006-EM	28/07/2006	28/08/2006	
		066-2009-EM	11/09/2009	20/01/2010	
88	PLUSPETROL PERU CORPORATION S.A.(2,2%)/PLUSPETROL CAMISEA S.A.(42.6%)/HUNT OIL COMPANY OF PERU L.L.C.,SUCURSAL DEL PERU(25,2%)/TECPETROL DEL PERU S.A.C.(10%)/SONATRACH PERU CORPORATION S.A.C.(10%)/REPSOL EXPLORACIÓN PERÚ, SUCURSAL DEL PERÚ(10%)	021-2000-EM	7/12/2000	9/12/2000	LICENCIA
		032-2003-EM	29/10/2003	31/10/2003	
		023-2004-EM	25/06/2004	19/08/2004	
		061-2005-EM	13/12/2005	16/12/2005	
		006-2006-EM	13/01/2006	19/01/2006	
		040-2006-EM	28/07/2006	21/11/2006	
		064-2006-EM	3/11/2006	19/12/2006	
		063-2009-EM	8/09/2009	10/12/2009	
023-2014-EM	27/07/2014	6/08/2014			
57	REPSOL EXPLORACION PERU, SUCURSAL DEL PERU(53,84%)/CNPC PERU S.A.(46,16%)	043-2003-EM	19/12/2003	27/01/2004	LICENCIA
		048-2006-EM	19/08/2006	5/02/2007	
		055-2007-EM	11/01/2008	22/01/2008	
58	CNPC PERU S.A.(100%)	018-2014-EM	6/11/2014	6/11/2014	LICENCIA
		017-2005-EM	23/06/2005	12/07/2005	
		009-2013-EM	18/03/2013	1/04/2013	
		019-2014-EM	31/05/2014	6/11/2014	

Fuente: Tomado de (MINEM, 2020)

Para los costos de operación y producción se realizó el análisis de los egresos que se tendrán para la operación del proyecto, este análisis se desarrolla en un periodo mensual de operación de la planta. En la siguiente tabla se muestra los costos de materia prima (residuos plásticos). Cabe resaltar que los precios de los plásticos recuperados varían y se muestra un precio promedio en la siguiente tabla.

Anexo 8. Tabla de materiales e insumos

N°	Materiales e insumos	Unidad	Cantidad x Mes	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
1	Residuos Plásticos	60	1 800	30	54 000
Costo Total de Materiales (para un mes en promedio) (USD)					54 000

Fuente: Entrevista con recuperadores y recicladores – noviembre 2021

Se observa que se necesitan 60 toneladas de residuos plásticos por día, por lo tanto, se necesita 1800 toneladas de residuos plásticos mensuales donde el costo de materia prima es de 30 USD por tonelada, entonces se tiene como egreso 54 000 USD por materia prima mensual.

Es importante también desarrollar el análisis de los egresos generados para el personal que se empleara en el proyecto. Las estimaciones salariales mostradas en la siguiente tabla se basan en investigaciones realizadas por varios sitios web de búsqueda de empleo.

Anexo 9. Tabla de requerimiento de personal

Personal	N° Personal/Turno	Remuneración Mensual en (USD)	N° Turnos/día	Monto Total Mensual en (USD)
Mano de Obra Directa				
Operarios	4	800	3	9 600
Operarios adicionales	3	800		2 400
Total Mano de Obra Directa				12 000
Mano de Obra Indirecta				
Limpieza	3	500	2	3 000
Seguridad	4	700	3	8 400
Jefe de Produccion	1	3 000	1	3 000
Jefe de Turno	1	3 000	3	9 000
Jefe de Calidad	2	3 000	1	6 000
Supervisor SOMA	1	2 000	3	6 000
Laboratorista	2	1 000	2	4 000
Jefe de Almacén	1	3 000	2	6 000
Tecnico Mecánico	1	1 400	2	2 800
Técnico Eléctrico	1	1 400	2	2 800
Jefe de Compras	1	3 000	1	3 000
Jefe de Administración	1	3 000	1	3 000
Jefe de Proyectos	1	3 000	1	3 000
Jefe de RR.HH.	1	3 000	1	3 000
Jefe de Compras	1	3 000	1	3 000
Jefe Comercial	1	3 000	1	3 000
Vendedor	1	1 000	1	1 000
Jefe de Contabilidad y Finanzas	1	3 000	1	3 000
Jefe de Administración	1	3 000	1	3 000
Jefe de Sistemas	1	3 000	1	3 000
Gerente General	1	7 500	1	7 500
Total Mano de Obra Indirecta				86 500
Total Mano de Obra (USD)				98 500

Fuente: Tomado de (Indeed, 2022)

Se observa que el proyecto solo necesita el jefe de marketing para dicha área, debido a que el producto es muy competente en el mercado y no es necesario la publicidad del producto. Por otro lado, se empleará 15 operarios para la operación de la planta. Con estas consideraciones de tiene 98 500 USD para cubrir los egresos por personal en el proyecto.

Otros egresos importantes en el proyecto son los egresos generados por los materiales y equipos; los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Anexo 10. Tabla de equipamiento y maquinaria

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (USD)	Monto Total (USD)
1	Reactor	501 513	501 513
1	Separador	119 856	119 856
1	Bomba	264 366	264 366
1	Enfriador	261 395	261 395
1	I.C precalentamiento	345 591	345 591
1	Tanques	272 401	272 401
1	Unidad de Pretratamiento de plásticos	185 110	185 110
1	Sistema de Flare	33 800	33 800
1	Tolva de recolección de coque	10 000	10 000
1	Secadora industrial	10 000	10 000
1	Aspiradora industrial	15 000	15 000
1	Sistema contra incendio	300 000	300 000
Total de equipamiento y maquinaria (USD)			2 319 033

Fuente: Tomado de (Naconha, 2021)

Para la toma de los precios se estimaron los precios de los equipos mediante el software en Excel CAPCOST, también se actualizaron los costos de los equipos mediante los índices de CEPCI (Naconha, 2021). Por otro lado, también se tiene la inversión por infraestructura en la siguiente tabla.

Anexo 11. Tabla de inversión en infraestructura

DESCRIPCIÓN	SUB-TOTAL (USD)
Construcción e Instalación	927 613
Terreno	139 142
Total en Infraestructura (USD)	1 066 755

Fuente: Tomado de (Bugosen et al., 2020)

El terreno comprende un área de 10019 m² ubicado en Av. Néstor Gambeta Km 11.

Por otro lado, se tiene los gastos Intangibles como se muestra en la siguiente tabla.

Anexo 12. Tabla de activos intangibles

Descripción	Costo (USD)	Resumen de Gastos por Rubro
Gastos de Organización		24 000
Estudios Preliminares	3 000	
Estudio de Factibilidad Definitivos	3 000	
Estudio Arquitectónico	3 000	
Asesoría	3 000	
Gastos de Instalación	3 000	
Permisos (construcción, municipales, otros)	3 000	
Búsqueda y Selección de personal	3 000	
Gastos imprevistos	3 000	
Gastos de Constitución		2 100
Gastos Notariales	350	
Inscripción en el Registro Público	350	
Licencia Municipal	350	
Trámites en Ministerio de Salud	350	
Otros Trámites	350	
Servicio de Terceros	350	
Gastos en Capacitación		5 000
Capacitación en el Puesto	2 500	
Otras Capacitaciones	2 500	
Total Intangibles (USD)		31 100

Fuente: Tomado de (INEI, 2021)

Se observa que los gastos intangibles comprenden los gastos de organización, gastos de constitución y gastos de capacitación, además no se considera los gastos de publicidad. Finalmente se tiene los gastos de operación en la siguiente tabla donde se observa los gastos generales y gastos administrativos.

En la siguiente tabla se observa los gastos generales y gastos administrativos, donde se observa los gastos de servicios brindado por terceros.

Anexo 13. Tabla de gastos de operación

Descripción	Costo (USD)	Gastos Mensuales por Rubro	Gastos Anuales por Rubro
Gastos Generales			
Teléfonos Celulares	200	14 845	178 140
Servicio de Cable	200		
Servicio de Internet	2 000		
Seguridad por Monitoreo	500		
Servicio de Gas (Calidda)	6 905		
Servicio de Agua	1 460		
Servicio de Luz	3 300		
Servicio de Telefonía Fija	280		
Gastos Administrativos			
Útiles de Oficina	155	2 063	24 751
Gastos de Representación	99		
Servicios de Terceros	187		
Mantenimiento Equipos	67		
Artículos de Limpieza	256		
Personal Administrativo	1 143		
Otros Gastos	156		
Gastos de Ventas			
Publicidad			
Gastos de Operación (USD)		16 908	202 891

Fuente: Tomado de (INEI, 2021)

Proyección de costos de operación

Los gastos de operación y producción se detallan en la tabla del Anexo 10, donde se observa que el proyecto es considerado para una operación de 10 años, por esta razón se observan los costos de operación y producción para ese ciclo del proyecto.

En el Anexo 11 se observan los costos fijos y costos variables del proyecto en los 10 años de operación del proyecto como parte de la estructura de costos.

Anexo 14. Tabla de resumen de costos

COSTOS	AÑOS									
	Año 1 (USD)	Año 2 (USD)	Año 3 (USD)	Año 4 (USD)	Año 5 (USD)	Año 6 (USD)	Año 7 (USD)	Año 8 (USD)	Año 9 (USD)	Año 10 (USD)
COSTOS DE PRODUCCIÓN	804 000									
Materiales e Insumos	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000
Mano de Obra Directa	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000
Gastos Indirectos de Fabricación	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000
GASTOS DE OPERACIÓN	202 891	223 180	245 498	270 048	297 053	326 758	359 434	395 377	434 915	478 406
Gastos Generales	178 140	195 954	215 549	237 104	260 815	286 896	315 586	347 144	381 859	420 045
Gastos Administrativos	24 751	27 226	29 949	32 943	36 238	39 862	43 848	48 232	53 056	58 361
Gastos de Ventas										
GASTOS FINANCIEROS	756 717	713 596	665 300	611 210	550 628	482 776	406 783	321 670	226 343	119 578
Intereses	756 717	713 596	665 300	611 210	550 628	482 776	406 783	321 670	226 343	119 578
TOTAL DE COSTOS (USD)	1 763 607	1 740 776	1 714 798	1 685 257	1 651 680	1 613 534	1 570 216	1 521 047	1 465 258	1 401 984

Anexo 15. Tabla de estructura de costos

RUBRO	AÑOS									
	Año 1 (USD)	Año 2 (USD)	Año 3 (USD)	Año 4 (USD)	Año 5 (USD)	Año 6 (USD)	Año 7 (USD)	Año 8 (USD)	Año 9 (USD)	Año 10 (USD)
COSTOS FIJOS										
Depreciación	235 670	235 670	235 670	235 670	235 670	235 670	235 670	235 670	235 670	235 670
Amortización	3 110	3 110	3 110	3 110	3 110	3 110	3 110	3 110	3 110	3 110
Gastos Generales	178 140	195 954	215 549	237 104	260 815	286 896	315 586	347 144	381 859	420 045
Gastos Administrativos	24 751	27 226	29 949	32 943	36 238	39 862	43 848	48 232	53 056	58 361
Gastos de Ventas										
Gastos Financieros	756 717	713 596	665 300	611 210	550 628	482 776	406 783	321 670	226 343	119 578
Costo Fijo Total	1 198 387	1 175 556	1 149 578	1 120 037	1 086 460	1 048 314	1 004 996	955 827	900 038	836 764
COSTOS VARIABLES										
Materiales e Insumos	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000	648 000
Mano de Obra Directa	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000	144 000
Gastos Indirectos de Fabricación	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000
Costo Variable Total	804 000									
Costo Total	2 002 387	1 979 556	1 953 578	1 924 037	1 890 460	1 852 314	1 808 996	1 759 827	1 704 038	1 640 764

Anexo 16. Tabla de cronograma de pagos por préstamos

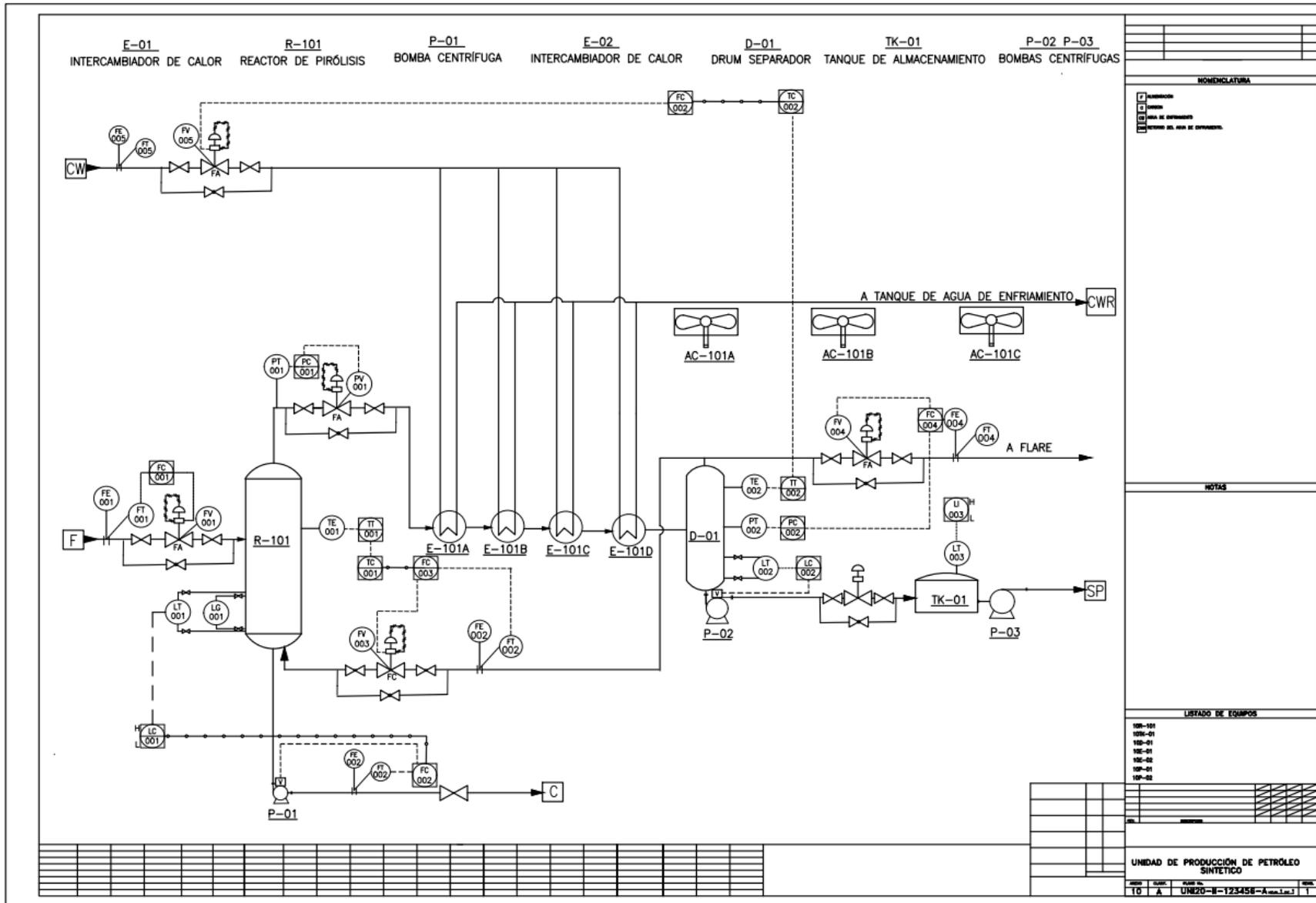
Financiamiento

En la siguiente tabla se observa el cronograma de pago por préstamo con una tasa efectiva de retorno anual de 12%.

Tabla de cronograma de pagos por préstamos

Años	Saldo Inicial (USD)	Intereses (USD)	Amortización (USD)	Cuota Anual (USD)	Saldo Final (USD)
1	6 305 971	756 717	359 340	1 116 057	5 946 631
2	5 946 631	713 596	402 461	1 116 057	5 544 169
3	5 544 169	665 300	450 757	1 116 057	5 093 413
4	5 093 413	611 210	504 848	1 116 057	4 588 565
5	4 588 565	550 628	565 429	1 116 057	4 023 136
6	4 023 136	482 776	633 281	1 116 057	3 389 855
7	3 389 855	406 783	709 274	1 116 057	2 680 581
8	2 680 581	321 670	794 387	1 116 057	1 886 193
9	1 886 193	226 343	889 714	1 116 057	996 479
10	996 479	119 578	996 479	1 116 057	
Total Intereses		4 854 599	6 305 971		

Anexo 17. Diagrama P&ID de instrumentación del proceso de pirólisis



Anexo 18. Descripción y dimensionamiento de equipos

- ✓ Reactor CRV-101: Tipo mezcla completa – CSTR, de diámetro 2.57 m, altura 4 m y volumen 20 m³.
- ✓ Intercambiadores de Calor E-101 A/B/C/D: Tipo de Coraza y tubos, caída de presión 5 kPa, pasos por la coraza 2, pasos por los tubos 2, volumen del tubo y de la carcasa es 0.1 m³.
- ✓ Drum separador D-101: De diámetro 2.04 m, altura 3.06 y volumen 10 m³.
- ✓ Bomba P-01/02: Presión de admisión 100-105 kPa y presión de descarga 130 kPa.
- ✓ Tanque de almacenamiento de producto TK-01: Tipo Techo flotante, de diámetro 11.3 m altura 10 m y volumen 2000 m³.
- ✓ Tanque de almacenamiento de agua TK-02: Tipo vertical, de diámetro 2.57 m, altura 3.86 y volumen 20 m³.

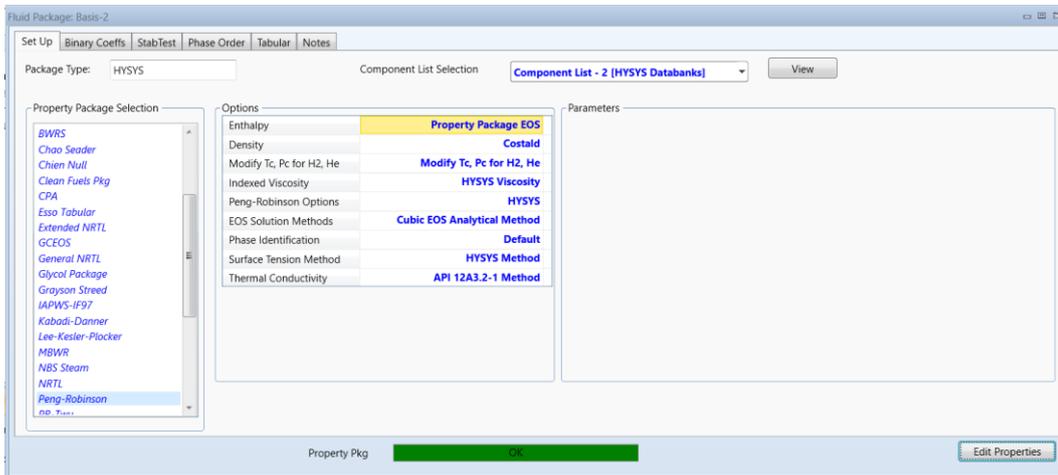
Anexo 19. Procedimiento de la simulación

1. Definir los objetivos del proceso a simular

En los capítulos previos se definieron los objetivos del proceso y los productos requeridos, dentro de los cuales se indican las condiciones del proceso.

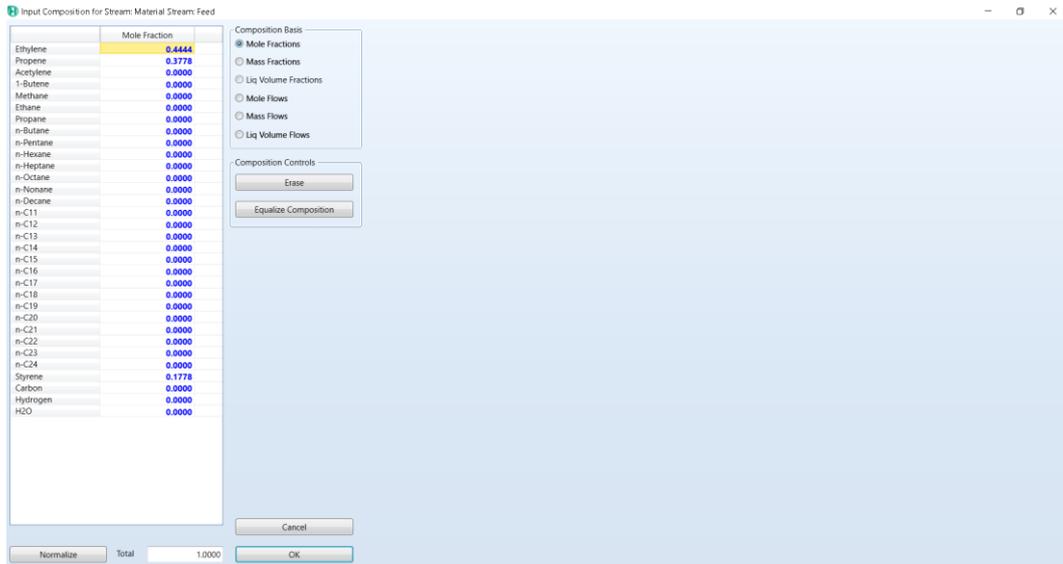
2. Crear un nuevo caso en Aspen Hysys

Abrimos Aspen Hysys y creamos un nuevo caso para la simulación del proceso de pirólisis. Definimos la lista de componentes, el ambiente de la simulación, incluyendo el paquete del fluido, el sistema de unidades, entre otros.



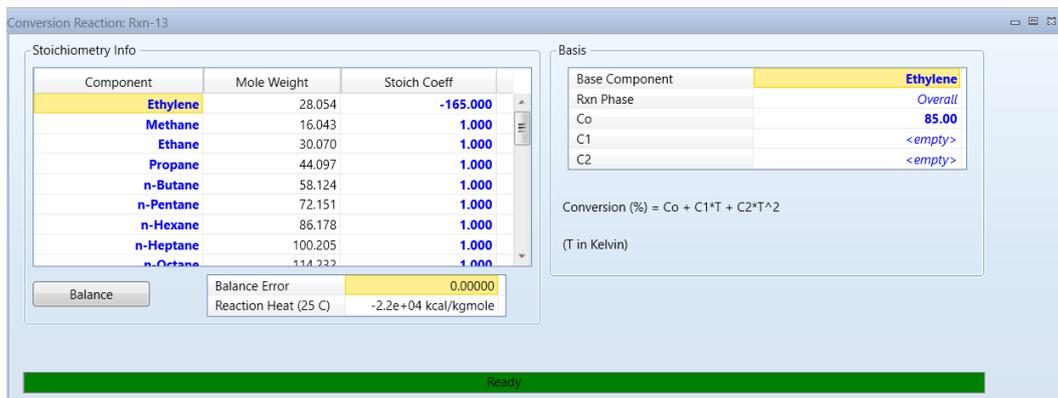
3. Definir la corriente de alimentación

Se define la corriente de alimentación de materia prima especificando la composición y las condiciones de presión y temperatura. Los plásticos seleccionados son mostrados como isómeros con el peso molecular equivalente de su respectivo polímero.



4. Simular el reactor de pirólisis

Seleccionamos el reactor de pirólisis luego de realizar el estudio técnico en el cual se decide optar por un reactor tipo horno rotatorio, el cual será simulado en dos partes: un horno y el reactor en el cual se introducirán las reacciones según su conversión.



5. Definir las corrientes de producto

Como se ha visto en el estudio técnico se obtienen tres productos principales: corriente de gases, líquidos y sólidos. Se definirán las condiciones para obtener el producto de mayor valor deseado.

Material Stream: Petroleo Sintetico

Worksheet Attachments Dynamics

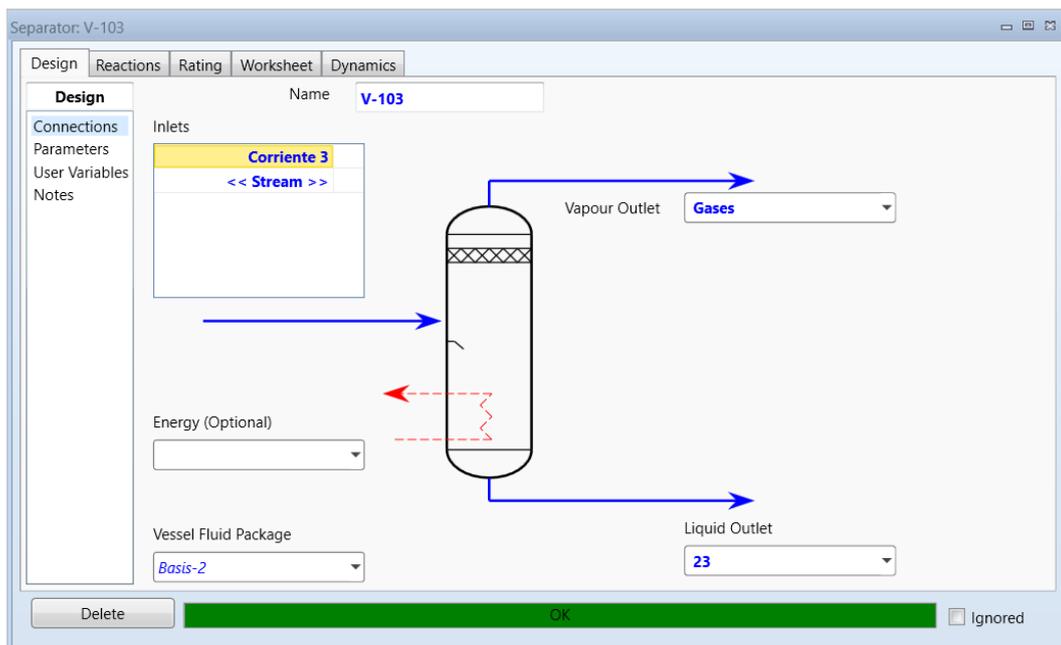
Worksheet	Stream Name	Petroleo Sintetico	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	30.01	30.01
Composition	Pressure [kPa]	160.0	160.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	11.10	11.10
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	2044	2044
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	2.632	2.632
User Variables	Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-7.397e+004	-7.397e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	465.5	465.5
Cost Parameters	Heat Flow [kcal/h]	-8.210e+005	-8.210e+005
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	2.632	2.632
Emissions	Fluid Package	Basis-2	
	Utility Type		

OK

Delete Define from Stream... View Assay

6. Adicionar unidades auxiliares

Se añaden los condensadores, separadores, aroenfriadores, bombas definiendo las condiciones para cada sistema. Como resultado de la simulación obtendremos los consumos energéticos de estas unidades que servirán para el balance de energía del proceso.



7. Correr la simulación

Corremos la simulación en Aspen Hysys para obtener los resultados, en el cual se aprecia la calidad del producto según las condiciones especificadas.

Petroleum Assay: Petroleum Assay-Petroleo Sintetico

Design Results Dynamics

Results

Assay Properties

Basis: Volume Frac

Volume [%]	TBP [K]	Sp. Gravity	API_60	Simple K Factor	Molecular Weight	Liquid Density [kg/m3]
0.00	-240.8	8.154e-002	1604	<empty>	2.720	81.38
1.00	-50.70	0.5135	144.1	<empty>	40.85	512.4
2.00	4.723	0.5915	107.7	<empty>	59.93	590.3
3.50	50.96	0.6438	88.30	<empty>	78.76	642.5
5.00	75.88	0.6704	79.58	<empty>	89.37	669.0
7.50	106.4	0.6933	72.61	<empty>	104.1	691.9
10.00	127.2	0.7190	65.29	<empty>	113.6	717.6
12.50	133.7	0.7207	49.76	<empty>	110.6	779.1
15.00	141.3	0.8176	41.57	<empty>	107.5	815.9
17.50	144.7	0.9003	25.67	<empty>	104.5	898.5
20.00	149.4	0.7714	51.93	<empty>	123.0	769.9
25.00	179.8	0.7367	60.57	<empty>	145.9	735.2
30.00	208.3	0.7495	57.30	<empty>	164.7	748.0
35.00	232.1	0.7591	54.89	<empty>	181.9	757.6
40.00	252.7	0.7643	53.65	<empty>	197.7	762.7
45.00	270.8	0.7720	51.78	<empty>	212.6	770.5
50.00	287.0	0.7771	50.59	<empty>	226.6	775.5
55.00	301.6	0.7816	49.54	<empty>	239.9	780.0
60.00	314.8	0.7852	48.71	<empty>	252.6	783.6
65.00	326.9	0.7883	48.01	<empty>	264.7	786.7
70.00	338.1	0.7909	47.41	<empty>	276.3	789.3
75.00	348.4	0.7936	46.80	<empty>	287.6	792.0
80.00	358.1	0.7963	46.21	<empty>	298.4	794.7

Delete Ignored

Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste

Juan Timana, Bach¹, Carlos Ubillas, Ing.¹, Victor Pretell, MSc.¹, Herbert Manrique, MSc.¹, Williams Ramos, MSc.¹ Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jtimalanal@uni.pe, carlos.ubillas.a@uni.pe, vpretellh@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe

Abstract– Population growth has brought with it pollution problems caused by plastic waste and the use of fossil fuels. Pyrolysis is a thermal degradation technology that finds a solution to these two major problems by transforming plastic waste into synthetic oil. In this research, a simulation of a pyrolysis plant that processes 60 tons per day of the three most common plastic waste (polyethylene, polypropylene, and polystyrene) in Peru to obtain synthetic oil is carried out. The product is compared with a commercial WTI oil and a diesel fuel to validate its properties. An economic analysis is carried out to obtain the net present value (NPV) of the project for a horizon of 10 years. From the results of the simulation, a production of 12 thousand barrels per month of synthetic oil was obtained with a liquid product yield of 81.6%, and with 50.6 °API. This result shows that synthetic oil is lighter than a commercial oil but does not have the properties of a diesel fuel to be marketed without first undergoing an additional refining process. Finally, in the economic analysis, a NPV of \$18.8 million dollars, an internal rate of return (IRR) of 80% and a project investment recovery period of 1.3 years were obtained.

Keywords: Pyrolysis, techno-economic analysis, plastic waste, simulation of chemical processes, synthetic oil.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.326> **ISBN:**
978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390