

**PROPUESTA DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS POLIMÉRICOS
GENERADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE
BOGOTÁ CON ENFOQUE EN LA ECONOMÍA CIRCULAR**

CASO: COMBUSTIBLE

ALEXANDER OSORIO ARIAS

WILSON JAVIER CASTAÑEDA

Proyecto integral de grado para optar por el título de:

MAGÍSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD

Director:

Claudio Alberto Moreno Arias

Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD

BOGOTÁ D.C

2024

Nota de Aceptación

Claudio Alberto Moreno Arias

DIRECTOR

JURADO 1

JURADO 2

JURADO 3

Bogotá D.C. febrero de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. Maria Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director de Programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Dedicatoria

A Angela Paola Ramírez Barbosa, por su amor, paciencia y constante motivación. Esta tesis es un tributo a nuestro compromiso y apoyo mutuo durante el desarrollo de este proyecto.

A todos mis profesores y docentes que compartieron su conocimiento y fomentaron mi curiosidad intelectual. Su influencia es fundamental en el desarrollo de mi trabajo.

A mis padres, quienes siempre creyeron en mí, me brindaron su apoyo incondicional y me inspiraron a alcanzar mis metas.

También dedico a mi hija Mía Isabel quién ha sido mi mayor motivación para nunca rendirme en los estudios y poder llegar a ser un ejemplo para ella.

A todas las personas que de una y otra forma me apoyaron en la realización de este trabajo.

Wilson Javier Castañeda

A mi querida esposa Alejandra Hurtado Rojas, fuente inagotable de apoyo, amor y comprensión. Tu constante aliento y presencia han iluminado mi camino durante esta travesía académica. A ti, mi compañera de vida, mi gratitud eterna.

A mi querida hija Fátima Victoria Osorio Hurtado, cuyo amor y alegría han sido mi mayor inspiración. Tu inocencia y vitalidad han llenado mis días de significado. Que cada logro alcanzado sea un reflejo de la dedicación para construir un futuro mejor para ti.

Esta monografía de grado está dedicada a ustedes, mis seres queridos, cuyo amor y apoyo han sido la fuerza impulsora detrás de cada logro.

Alexander Osorio

Agradecimientos

Le doy gracias a Dios por darme la vida, y su pasión para terminar lo que con tanto gozo y alegría un día comencé; y por darme fuerzas cada instante para seguir adelante y hacer este sueño realidad de poder finalizar mi Proyecto de Investigación para la Maestría de gestión Ambiental para la competitividad.

A mis padres, mi hermana y mi novia mis agradecimientos con todo mi amor, porque en las dificultades, en mi cansancio, ellos alzaron mis manos y me decían tú puedes, hoy me dicen lo lograste; gracias por darle un final acertado a mis proyectos.

Agradecimientos a mi universidad por brindarme los conocimientos a través de sus profesores y gracias a estos hoy puedo desarrollar este proyecto, gracias al director del proyecto, el Ingeniero Claudio Alberto Moreno Arias por depositar su confianza en nosotros para representar la Universidad.

Gracias a la empresa Metro Línea 1 SAS por abrirnos sus puertas, y brindarnos toda la colaboración en el desarrollo de este proyecto y su apoyo incondicional con la información requerida para la elaboración de la Monografía.

Wilson Javier Castañeda

Primero y, ante todo, a Dios, fuente de sabiduría y guía constante en este viaje académico. Agradezco por la fortaleza, la inspiración y las oportunidades brindadas.

A mis padres, quienes han sido la base sólida sobre la cual se ha construido mi educación. Su sacrificio, apoyo inquebrantable y valores han sido mi mayor inspiración.

A mis hermanos, por su aliento constante y comprensión. En cada paso, su presencia ha sido un recordatorio del valor de la familia y la importancia de compartir los triunfos.

A los profesores de la universidad, cuyo conocimiento, orientación y dedicación han sido fundamentales en mi formación académica. Agradezco por su paciencia, enseñanzas y por desafiarme a alcanzar mi máximo potencial.

Este logro no hubiera sido posible sin la contribución de cada uno de ustedes. Agradezco sinceramente por ser parte integral de mi trayectoria educativa y por enriquecer mi vida con su presencia.

Alexander Osorio

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1 Antecedentes	16
<i>1.1.1. Estado del Arte</i>	<i>16</i>
<i>1.1.2. Marco Legal e Institucional</i>	<i>40</i>
<i>1.1.3. Pregunta de Investigación</i>	<i>42</i>
1.2 Justificación	43
1.3 Hipótesis	44
1.4 Objetivos	44
<i>1.4.1. Objetivo General</i>	<i>44</i>
<i>1.4.2. Objetivos Específicos</i>	<i>45</i>
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	46
2.1 Lugar y Descripción del Proyecto	46
2.2 Fases de la Investigación	48
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
3.1 Exposición de Resultados	56
<i>3.1.1. FASE 1 “Caracterización y diagnóstico inicial de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB”</i>	<i>56</i>
<i>3.1.2. FASE 2 “Realizar un análisis del tipo de pirólisis que se llevará a cabo en la planta (Convencional, rápida o flash) para la valorización de residuos poliméricos en la construcción de la PLMB, con base a la economía circular”</i>	<i>68</i>

<i>3.1.3. FASE 3 “Propuesta de valorización de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB”</i>	<i>83</i>
<i>3.1.4. FASE 4 “Análisis de costos asociados a la propuesta para la valorización de residuos poliméricos generados en los procesos constructivos de la PLMB, para la producción de combustible”</i>	<i>87</i>
4. CONCLUSIONES	113
REFERENCIAS	117
ANEXOS	124

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Marco legal e institucional</i>	40
Figura 2. <i>Localización general y trazado de la plmb</i>	47
Figura 3. <i>Calificación puntuación ponderada</i>	51
Figura 4. <i>Calificación puntuación ponderada.</i>	54
Figura 5. <i>Modelo básico de un reactor de pirólisis.</i>	76
Figura 6. <i>Diagrama de procesos de pirólisis.</i>	77
Figura 7. <i>Esquema de economía circular</i>	112

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Inventario de residuos generados por la plmb.</i>	57
Tabla 2. <i>Características fisicoquímicas de los polímeros</i>	61
Tabla 3. <i>Comparación de parámetros de operación de los tipos de pirólisis</i>	79
Tabla 4. <i>Resultado matriz de ponderación</i>	80
Tabla 5. <i>Tabla comparativa de pirólisis del mercado</i>	89
Tabla 6. <i>Costo del proceso de pirólisis con el reactor lvkun</i>	92
Tabla 7. <i>Inventario de residuos poliméricos y proyecciones del proyecto</i>	93
Tabla 8. <i>Costo de proceso de producción de planta de pirólisis lvkun.</i>	96
Tabla 9. <i>Costos de inversión para planta de pirólisis</i>	99
Tabla 10. <i>Costos de insumos del reactor de pirólisis</i>	100
Tabla 11. <i>Tarifas de energía eléctrica (\$/kwh).</i>	101
Tabla 12. <i>Costos energéticos mensuales</i>	102
Tabla 13. <i>Costos mano de obra</i>	103
Tabla 14. <i>Costos de inversión y costos de operación</i>	104
Tabla 15. <i>Ingresos económicos</i>	104
Tabla 16. <i>Flujo de caja</i>	105

RESUMEN

La presente proposición busca abordar la valorización de los residuos poliméricos generados durante la construcción de la primera línea del metro de Bogotá (PLMB) con un enfoque en la economía circular, orientándose hacia la producción de combustibles líquidos y gaseosos. Por ello, esta indagación tuvo como objetivo principal la gestión sostenible de los residuos poliméricos generados dentro de la construcción de la PLMB, aprovechando los principios de la economía circular para transformar estos residuos en recursos valiosos, como combustibles líquidos. Esto no solo contribuiría a la reducción de residuos y a la conservación de recursos, sino que también podría tener un impacto positivo en la economía y el medio ambiente.

Ahora bien, con base a la investigación realizada previamente pudo encontrarse un inventario de residuos sólidos plásticos generados por los contratistas en una obra en donde se describen las características fisicoquímicas de los polímeros para el proceso de pirólisis. Es por ello por lo que se refleja en el texto, indica que los principales generadores de residuos son el polietileno de alta y baja densidad, lo que quiere decir que son plásticos adecuados para el pirólisis por su fácil descomposición térmica y su bajo consumo de energía. Dentro de la indagación también se encuentra una leve advertencia en donde el uso del poliestireno y el PVC no son aptos para el pirólisis por su composición química y las sustancias tóxicas que liberan al descomponerse a altas temperaturas, que pueden dañar el equipo, el ambiente y la salud.

Palabras clave: Economía Circular, Pirólisis, Residuos Poliméricos, Polímeros, Valorización, Residuos, Reincorporación.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se conoce que el plástico es un elemento esencial y a través de éste se han venido satisfaciendo las necesidades básicas del ser humano. En el desarrollo de las labores domésticas se sabe que el plástico ha logrado satisfacer todas las necesidades básicas dentro en un hogar, pues con éste ha podido almacenar y clasificar sus alimentos. Pero, desde una perspectiva industrial y comercial, también se ha venido utilizando en procesos constructivos como infraestructura vial, usándolo a través de productos como señalizaciones, envases, elementos de protección personal, y demás, sin embargo, una vez cumple su función por razones de carencia cultural y de control, los residuos plásticos terminan en los botaderos sin ser aprovechados y reutilizados una menor parte.

La producción de polímeros ha venido incrementando año tras año puesto que se ha convertido en el material ideal para toda clase de productos debido a su alta durabilidad, resistencia y elasticidad. El problema de los residuos poliméricos es su prolongado ciclo de vida que puede tardar en promedio entre 100 a 1000 años en descomponerse (Daza & Pineda, 2017).

Lo descrito anteriormente, permite plantear la forma en la que se puede generar un aprovechamiento de residuos poliméricos a través de un proceso químico denominado pirólisis que describe una forma de descomposición térmica del material luego de ser sometido al calor en ausencia de oxígeno. Con este método de reacción química podrá obtenerse combustible, ya sea en estado líquido, gaseoso o residuo carbonoso por calentamiento de la biomasa en ausencia de aire y es por ello que su capacidad de tratamiento es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables (Pinedo, 2013).

Según lo anterior, esta reutilización de polímeros permite desarrollar ideas de descontaminación del medio ambiente, considerando que actualmente los planes de reciclaje a nivel mundial son inferiores al grado de contaminación generado. Pese a los esfuerzos de reutilización del plástico que los países han implementado, aún son millones de toneladas las que terminan en océanos y cuerpos hídricos que en estos desembocan. Ante esta problemática, el pirólisis es un mecanismo idóneo para dicha descontaminación.

Ahora bien, de acuerdo con lo que se describe anteriormente en esta exploración se busca desarrollar una propuesta para la valorización de los residuos sólidos poliméricos resultantes de la construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá - PLMB, con enfoque en la economía circular. Para cumplir el objetivo general, se plantean como objetivos específicos establecer la caracterización de los residuos poliméricos, establecer las condiciones técnicas para la valorización de residuos poliméricos y por último establecer el análisis de costos asociados a la propuesta para la valorización de residuos para la producción de combustible.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

1.1.1. Estado del Arte

A nivel mundial el uso de polímeros con fines industriales se inició en el año 1909 cuando se llevó a cabo la creación de aleaciones y mezclas de polímeros sintéticos a partir de moléculas para mejorar sus moléculas y tener propiedades y resistencia. Entre las variedades de polietilenos más comunes hoy en día se encuentran el Polietileno tereftalato (PET), el Polietileno (PE), el Policloruro de Vinilo (PVC), el Polipropileno (PP), el Poliestireno (PS), la Poliamida (PA), el Polimetilmetacrilato (PMMA), el Policarbonato (PC), el Poliéster y el Poliuretano (PU) (Castillo, 2008).

De tal forma que los plásticos se clasifican en dos tipos: termoplásticos y termoestables, lo que indica que los materiales termoplásticos son maleables mediante calor y pueden ser moldeados repetidamente, mientras que los materiales termoestables solo pueden ser deformados una vez y se descomponen al entrar en contacto con altas temperaturas. Actualmente, se generan muchos residuos poliméricos por el consumismo en las ciudades lo que provoca una producción creciente de plástico y por ende de residuos plásticos. El proceso de degradación de estos residuos se puede llevar a cabo entre 100 y 1000 años dando paso a una generación de residuos poliméricos en aumento puesto que cada día hay fabricación de materiales con un elemento principal que es el plástico siendo de un solo uso y en su mayoría terminan en rellenos sanitarios (Faria, 2019).

Por otra parte, en cuanto al desafío global de la sostenibilidad se hace cada vez más visible que se comience a establecer la necesidad de desarrollar una cultura ciudadana que permita eliminar las prácticas inadecuadas de disposición y gestión de residuos plásticos en las grandes ciudades. Esto implica que los emprendedores vean estos residuos como una oportunidad de negocio importante

proporcionando medidas para su recolección, almacenamiento y reincorporación a la cadena productiva, existiendo así metodologías para fabricar plásticos con capacidades de biodegradabilidad lo que contribuye a reducir el impacto ambiental a nivel mundial. Estos plásticos se descomponen a través de microorganismos, produciendo agua, dióxido de carbono y metano (Lacovidoub & Gerassimidouc, 2020).

Otra medida energética es utilizar los residuos poliméricos como fuentes de generación de energía y producción de combustible. Esta estrategia implica convertir los residuos en combustibles de baja toxicidad que pueden ser utilizados en motores de combustión interna. Esta alternativa de producción de energía a través de la conversión de residuos es una solución prometedora (Qian et al., 2022).

La industria de plásticos ha experimentado un crecimiento exponencial y se ha convertido en parte integral de nuestros estilos de vida. Sin embargo, es importante adoptar prácticas que promuevan un avance tecnológico y eviten el uso de materia prima que pueda contaminar el medio ambiente. En ese sentido, establecer metas para el futuro implica producir polímeros utilizando metodologías alternativas y reemplazando los componentes de origen fósil por residuos plásticos que hayan sido enviados a cadenas de reciclaje. Si todos los países implementan prácticas enfocadas en la economía circular, podremos garantizar enfoques y soluciones globales que prolonguen significativamente la vida útil de los rellenos sanitarios y vertederos de residuos. Esto tendrá un impacto positivo en nuestra sociedad y el medio ambiente (PlascticsEurope, 2021).

Ante la creciente demanda de residuos plásticos, la economía circular enfrenta desafíos para reincorporar todos estos desechos en procesos productivos, pues actualmente se generan cantidades significativas de residuos que superan la capacidad de aprovechamiento y reutilización en métodos de producción. Es por ello por lo que la sociedad debe implementar prácticas

ambientales y tecnologías que permitan gestionar adecuadamente los residuos poliméricos generados. Lo anterior, permite indicar que es crucial contar con la capacidad de manejar los plásticos de manera efectiva, fomentando prácticas de valorización energética. Esto implica aprovechar los residuos como una fuente de energía en lugar de simplemente desecharlos, de tal forma que, al adoptar este enfoque, podemos minimizar el impacto ambiental de los plásticos y contribuir a una gestión más sostenible de los recursos (Meroño, 2016).

En Colombia, actualmente se basa en modelos económicos lineales en los que los consumidores extraen, utilizan, producen y desechan productos generando residuos de elementos fabricados a partir de polímeros. Sin embargo, para enfrentar los desafíos ambientales es importante establecer cadenas de valor basadas en un modelo de economía circular. El objetivo de este modelo es reducir el consumo de materias primas y aprovechar al máximo los residuos extendiendo así el ciclo de vida de los productos plásticos. Esto podría implicar fomentar la reutilización, hacer uso del reciclaje y otras formas de valorización de los residuos plásticos, en lugar de simplemente desecharlos. Además, es importante promover una producción más sostenible utilizando técnicas que minimicen la generación de residuos y optimicen el uso de recursos (Sierra & Vera, 2022).

Con lo descrito anteriormente, en el Proyecto de Construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá – PLMB, adicional a los residuos típicos de construcción de obras civiles del proyecto es significativa. se observa que la generación de residuos poliméricos en cada etapa de construcción del proyecto es significativa. Desde su inicio en agosto del año 2021 el proyecto ha implementado un seguimiento mensual de la cantidad y tipo de residuos generados. Estos residuos son entregados después a empresas autorizadas de reciclaje en la ciudad, para aprovechar adecuadamente cada tipo de materiales desechados.

El plástico originario del petróleo no se transforma en su composición química durante su uso y comercialización por parte de los usuarios. Sin embargo, al ser un derivado del petróleo contiene energía que puede ser extraída mediante el proceso de pirólisis, objetivo de este estudio. De esta manera, con el tratamiento adecuado los residuos plásticos pueden convertirse en fuentes de energía alternativa para su utilización en procesos industriales de combustión permitiendo que los residuos plásticos que posean un alto contenido energético puedan recuperar combustibles y aceites de buena calidad y con buenas propiedades (Ecoplas, 2011).

Tales residuos durante un proceso de desintegración térmica se pueden transformar en productos como gases, hidrocarburos y residuos carbonosos a través de altas temperaturas. Es relevante destacar que, los hidrocarburos generados a partir de polímeros de alta densidad presentan propiedades muy similares a los combustibles convencionales disponibles en el mercado (Rojas, 2016).

Una alternativa de reciclaje de carácter químico consiste en cambiar las estructuras de los polímeros para obtener productos relacionados con hidrocarburos de alto poder calorífico que se pueden usar en motores de combustión. Esta alternativa puede ser rentable para el mercado y beneficiosa para el medio ambiente siendo eficiente en el proceso de pirólisis de residuos poliméricos (Hernán et al., 2018a).

De tal modo que, debido al aumento de la producción y los residuos de plásticos a nivel mundial se requiere implementar alternativas de reciclaje, una de ellas es mediante el pirólisis catalítico de polímeros de baja densidad (PEBD), que no tienen buenas propiedades para generar hidrocarburos combustibles. Para mejorar estas propiedades se pueden usar métodos complementarios y catalizadores por ejemplo en un experimento, se logró producir un combustible con una eficiencia del 70% al seguir los protocolos del pirólisis catalítico (Olivera et al., 2019).

Para el caso colombiano, el manejo de residuos plásticos en el país se basa principalmente en la entrega a empresas o gremios de reciclaje, que en muchos casos los envían a los rellenos sanitarios, reduciendo su vida útil. Una alternativa es aplicar el método de pirólisis, que consiste en transformar los residuos plásticos en combustibles. Para ello en este estudio, se propone evaluar variables como la densidad, el tiempo y la cantidad de producto final para así diseñar un horno para implementar un reactor de pirólisis con los residuos de una comunidad. Así, se podrían establecer métodos de producción y demanda basados en los residuos generados en un periodo de tiempo (Daniel et al., 2019).

Por lo anterior, la pirólisis del plástico es un proceso que puede generar una cantidad significativa de productos líquidos, gases y sólidos, pero podemos trabajar para mejorar la eficiencia y reducir la generación de residuos. Para lograr esto, es importante controlar cuidadosamente ciertos parámetros y variables clave, como la temperatura y el tiempo de calentamiento.

Según investigaciones recientes realizadas por Mayhua en el año 2022, se ha encontrado que al utilizar temperaturas en el rango de 500 a 550 °C junto con un ritmo de calentamiento de 10°C/min, puede resultar en la producción de un hidrocarburo con características similares a los combustibles comerciales. Estas condiciones son ideales para obtener resultados óptimos y minimizar la generación de residuos pues al asegurarnos de controlar de manera precisa la temperatura y el tiempo de calentamiento en el proceso de pirólisis, es posible generar una reducción más efectiva de los residuos generados. Además, es importante tener en cuenta otros factores, como la calidad de la materia prima inicial y la optimización de los equipos utilizados en el pirólisis, para lograr una producción más eficiente y sostenible de combustible a partir de los desechos de plástico. En resumen, al aplicar condiciones adecuadas de temperatura y tiempo de calentamiento, y considerar otros aspectos relevantes, podemos mejorar la reducción de residuos en el proceso de pirólisis del

plástico, obteniendo un hidrocarburo con características similares a los combustibles comerciales y contribuyendo a una gestión más responsable de los desechos (Mayhua et al., 2022).

Ulteriormente, los investigadores Osvaldo Proaño y Sara Crespo han abordado el problema de la generación excesiva de residuos plásticos y la importancia de manejarlos adecuadamente y disponer de ellos de manera responsable, a través de su investigación, se ha demostrado que, con los mecanismos y las técnicas adecuadas en el proceso de pirólisis, es posible obtener resultados óptimos al utilizar residuos de polietileno de alta densidad como materia prima. La investigación se enfocó en el calentamiento de la materia prima y en el análisis de las variables más importantes para lograr la producción de combustibles líquidos, sólidos y gaseosos mediante el pirólisis. Los resultados obtenidos demuestran que este proceso químico puede generar combustibles líquidos de buena calidad comparables a los combustibles fósiles convencionales.

Es por esto, que los estudios realizados por Proaño y Crespo en el año 2009 destacan la importancia de utilizar los reactores adecuados implementando técnicas precisas para comprender las variables clave en el proceso de pirólisis generando un aprovechamiento de los residuos plásticos de alta densidad y obtener combustibles líquidos de calidad comparables a los combustibles tradicionales. Ello ofrece una oportunidad valiosa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir a una gestión más sostenible de los residuos plásticos (Proaño & Crespo, 2009).

El combustible líquido obtenido, conocido como bio-oíl, se produce mediante un proceso llamado pirólisis rápida, el cual utiliza sistemas de rotación con tornillo sin fin para generar fricción en superficies calientes. Aunque este método ofrece la ventaja de tiempos de producción más rápidos, los resultados obtenidos en términos de combustibilidad son incompatibles con los combustibles tradicionales debido a su bajo poder calorífico (Tessini et al., 2013).

Desde la década de los años 80's, se ha utilizado el proceso de pirólisis para la producción de combustibles inicialmente en Japón y posteriormente en Latinoamérica a partir del año 2006. Durante las pruebas de laboratorio, se descubrió que ciertos polietilenos como el poliestireno poseen propiedades que permiten generar un combustible caracterizado como crudo pesado con mayores capacidades y rendimientos (Mancheno et al., 2016).

En el proceso de pirólisis para obtener combustible, es fundamental analizar la pureza de los hidrocarburos resultantes y establecer la estandarización del producto en cuanto a su relación con otros hidrocarburos de condiciones similares de combustión. Mediante pruebas de laboratorio utilizando cromatografía, se ha determinado que el combustible generado a partir de residuos plásticos mediante pirólisis presenta una homogeneidad del 99% con los combustibles convencionales (Lozano et al., 2016).

En un estudio experimental en Ecuador con residuos plásticos provenientes del vulcanizado de llantas, se caracterizó la fisicoquímica del combustible resultante tras la reacción de pirólisis. Sin embargo, tras realizar pruebas y comparaciones en un equipo de combustión Diesel se determinó que dicho combustible no cumple con los requisitos normativos ni de funcionamiento del motor en comparación con el combustible Diesel comercial disponible en el mercado ecuatoriano (Cárdenas et al., 2017).

Ante el aumento en la producción de combustibles convencionales, hay que explorar alternativas para la fabricación de combustibles fósiles transformando materiales y residuos que puedan servir como fuentes de energía mediante procesos como el pirólisis. En este sentido, es crucial determinar, a través de la experimentación qué tipo de plástico puede generar un combustible con propiedades mejoradas y un alto poder calorífico que sea apto para su uso en motores de combustión (Iralda et al., 2020).

El objetivo principal es llevar a cabo una caracterización fisicoquímica exhaustiva de los productos generados mediante el proceso de pirólisis catalítica de residuos poliméricos. Mediante este análisis se buscarán determinar los resultados más favorables al considerar diversas variables, como la temperatura y la cantidad de catalizador utilizado. El propósito es lograr obtener un combustible óptimo con características de calidad y rendimiento adecuadas para su comercialización en el mercado. Los hallazgos indican que, al utilizar una temperatura comprendida entre 500°C y 600°C, junto con un porcentaje adecuado de catalizador según la materia prima siendo posible obtener hidrocarburos con propiedades ideales para su uso en motores de automóviles (Ramos & Pretell, 2021).

De la misma forma, la pirólisis de plásticos es utilizado como método alternativo para reducir la contaminación derivada de la disposición final de estos residuos ha ganado relevancia. Se ha observado que al aplicar esta técnica a los residuos plásticos de computadoras se puede obtener combustible en forma líquida. Sin embargo, durante este proceso se generan gases no condensables que son liberados a la atmósfera, aunque en algunos casos pueden reintegrarse al sistema de combustión del reactor. El hidrocarburo obtenido tiene propiedades similares a los combustibles pesados y presenta una textura aceitosa (Quiroga et al., 2022).

Por ejemplo, en una institución educativa de Nariño, se garantizaron prácticas de Economía Circular mediante estrategias educativas y pedagógicas. El objetivo era que el manejo de los residuos sólidos fuera un reto importante para los estudiantes. De tal forma que, se buscaba brindarles la información más adecuada para que ellos la replicaran en sus hogares. Así, se crearía una cadena de información donde padres y familiares desarrollaran habilidades para tratar los desechos de forma adecuada y para implementar procesos de valorización. Estos consisten en reincorporar los residuos como materia prima de procesos productivos (Melo et al., 2022).

Ahora, en cuanto a la economía circular es pertinente indicar que es un modelo el cual busca reducir el consumo de recursos y el impacto ambiental, por ejemplo, en los últimos años ha ganado reconocimiento como una alternativa sostenible. Por eso, es importante aplicar este modelo en el sector construcción que genera muchos residuos que si bien podrían ser aprovechados o aquellos materiales se podrían recuperar o ser reutilizados en las diferentes etapas de los procesos constructivos. De esta forma, se establecerían los ciclos completos de los materiales desde su origen hasta su reincorporación en nuevas cadenas de producción (Ruiz et al., 2020).

La mayoría de los productos y servicios que consumimos siguen una economía lineal lo que significa hacer referencia a una extracción de recursos naturales para fabricar bienes, comprarlos, usarlos y tirarlos. Este modelo tiene un alto impacto ambiental y social, para mitigar dicho impacto una alternativa puede ser la economía circular la cual busca reducir el consumo de recursos y el desperdicio de materiales. En este modelo se usan materias primas recicladas para fabricar los productos, se diseñan los productos de forma ecológica para que duren más y se puedan reparar o reutilizar gestionando los residuos con procesos de reciclaje y valorización. Así, se crea un ciclo cerrado de producción que respeta el medio ambiente (Francisco & García, 2020).

La economía circular es un argumento que destaca la relevancia del pirólisis como un proceso para valorizar los residuos poliméricos generados en la construcción, dentro del marco de la economía circular. El plástico, como producto, tiene un impacto negativo significativo en el medio ambiente, pero también puede ser una fuente de energía limpia. Según (Olivera, 2013), el plástico representa una importante fuente de energía si se considera desde una perspectiva tecnológica avanzada, especialmente en un mundo donde la basura plástica está saturando nuestro entorno (Olivera et al., 2019).

Por lo que, la gestión de residuos sólidos debe adoptar enfoques de economía circular dado que los países con mayores niveles de generación de residuos sólidos suelen ser los con mayor desarrollo económico. En este sentido, es importante mencionar que los países más avanzados implementen sistemas económicos basados en la economía circular en donde se promueva la reducción, el reciclaje, la reutilización y la recuperación de materiales en los procesos de producción y consumo. Lo mencionado anteriormente permitirá alcanzar un desarrollo sostenible y una calidad ambiental adecuada implementando sistemas integrales de gestión de residuos alrededor. Así mismo, el crecimiento de los países debe basarse en la adopción de modelos de consumo ambientalmente sostenibles, lo cual contribuirá al cumplimiento de los objetivos económicos y ambientales (Santiago et al., 2018).

Por otra parte, en el texto "Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (primera parte)", por Martínez y Porcelli, en el año 2018 destacan que la economía circular es una opción efectiva para la no recuperación solo del medio ambiente sino también de la economía en su conjunto. El cambio de un modelo económico lineal y convencional a uno circular debe ser implementado a nivel global puesto que, el planeta ya no puede soportar el enfoque tradicional de extracción que esté contaminando los océanos, ríos, bosques y otros ecosistemas vitales.

Del mismo modo, la situación actual en el mundo es preocupante y requiere medidas rápidas y eficaces. Según los autores, en el año 2010 se introdujo al sistema económico alrededor de 65 mil millones de toneladas de materias primas y se espera que esta cifra aumente a 82 mil millones de toneladas para el año 2020, esto mencionado en su momento, puede que la cifra actualmente allá aumentado. Además, se prevé un empeoramiento de la situación a nivel mundial debido al

crecimiento de la clase media global que se espera se duplique para el año 2030 alcanzando casi los 5 mil millones de personas adoptando hábitos de consumo.

En tal sentido, la adopción de la economía circular se presenta como una solución clave para enfrentar estos desafíos y garantizar un futuro sostenible (Martínez & Porcelli, 2018).

Por ejemplo, en el años 2017, los autores Vanessa Prieto, Carmen Jaca y Marta Ormazabal, elaboraron un documento titulado 'Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación'. En este trabajo, proporciona una definición concisa de economía circular: abarca las etapas de extracción, transformación, distribución, uso y recuperación de recursos. A diferencia del enfoque de deseo convencional, en la economía circular no se descarta el material tras su uso inicial; en su lugar, se fomenta su reciclaje, reconstrucción y reutilización (Sandoval et al., 2017).

Lo anterior denota que hay nociones en torno a la economía circular que está ligada al proceso de pirólisis, ya que la primera establece el contexto en el que se implementa la segunda. Además, ambos se fundamentan en principios ambientales compartidos. En el año 2016, Emilio Cerdá y Aygun Khalilova realizaron una interpretación del concepto de economía circular basada en las ideas de Pearce y Turner (1989), quienes acuñaron inicialmente dicho término. En el documento 'Economía Circular', se expone que esta noción se entiende como "una opción atractiva y factible que se ha comenzado a explorar en el ámbito empresarial (Cerdá, 2016).

Ahora bien, como una evolución alternativa en el ámbito económico, se busca establecer los principios de la economía circular para la producción global de plásticos. Esto pretende asegurar que los residuos plásticos que una vez utilizados, se incorporan en un ciclo de uso continuo en vez de descartarlos sin recolección previa, clasificación y reprocesamiento. Este enfoque implica la

integración de estos desechos en cadenas productivas que requieren materias primas de características similares, impidiendo así su disposición final.

En vista de esto, es esencial que el mercado promueva y respalde la fabricación de productos utilizando materiales reciclados, además de fomentar el desarrollo de plásticos biodegradables y respetuosos con el entorno. Las proyecciones señalan que para el año 2050 la producción de plásticos será cuatro veces mayor que la actual. Por eso, la industria del plástico debe explorar alternativas y soluciones efectivas como la disminución de la fuga de residuos plásticos que podrían terminar en los océanos y la transición desde la dependencia de materiales fósiles hacia el uso de materiales reciclados y reutilizados, de acuerdo con los principios de la economía circular (Vivir Sin Plástico, 2016).

Por las variadas dinámicas legislativas en Iberoamérica, se presenta actualmente una oportunidad concreta para realizar procesos de valorización de los residuos implementando iniciativas para la recolección y reciclaje de estos. Cada día por ejemplo se observa un aumento en las asociaciones de recicladores de oficio, encargadas de preparar los residuos aprovechables para reintroducirlos en los procesos productivos como materias primas de menor impacto ambiental.

La creciente aceptación global de la valorización de residuos ha contribuido a que la incorporación de ciclos de vida para productos plásticos y otros materiales se convierta en una práctica adoptada tanto por la industria como por la sociedad civil (Morillas et al., 2016). De tal forma que es muy importante destacar que el pirólisis es un proceso que implica la aplicación de calor para la reutilización de elementos sólidos en varias cadenas de producción y que es un método fundamental. Lo anterior, no solo permite la transformación de estos elementos en combustibles aprovechables, sino que también permite la reducción significativa del volumen de materiales contaminantes ejerciendo así un impacto positivo en el entorno medioambiental.

Por otra parte, el estudio titulado 'Evaluación de la eficacia del proceso de pirólisis como enfoque de disposición final para residuos sólidos en las zonas rurales del Oriente Antioqueño en Colombia', subraya la eficacia inherente de este proceso. Tanto es así que su implementación ha adquirido un estatus preeminente en diversas partes del mundo en virtud de su eficiencia demostrada resumiendo que los costos sean accesibles y considerables a las ventajas ambientales (Daniel et al., 2019).

Ahora bien, con el fin de establecer un objetivo de evaluación económica que se requiere atribuir valores numéricos a los bienes y servicios generados a partir de una actividad productiva. Esto conlleva a explorar diversas alternativas de utilización de los recursos, considerando sus propiedades inherentes. A partir de este análisis, se determinó una serie de comparaciones entre el valor de los residuos y los precios vigentes en el mercado. De esta manera, se logró discernir la eficiencia económica resultante de la implementación de enfoques ambientales en la gestión de residuos.

Este proceso de valoración no solo implica una dimensión monetaria, sino que también implica considerar el impacto ambiental y social de las decisiones. El estudio titulado 'Evaluación de la Eficiencia Económica de Prácticas Medioambientales en la Gestión de Residuos' subraya la necesidad de esta evaluación integral para tomar decisiones informadas y sostenibles en el manejo de recursos y residuos (Calderón et al., 2017).

Según las cifras en Colombia, especialmente en la Ciudad de Bogotá se generan diariamente 6265 toneladas de residuos, de los cuales el plástico corresponde al 56% de los residuos generados.(Greenpeace & Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud pública MASP, 2019)

Por ejemplo, en Ecuador, de los residuos generados diariamente, los desechos plásticos son aproximadamente el 11 % de la cantidad recolectada y clasificada, según reflejan las estadísticas de las empresas encargadas de los servicios públicos de gestión de residuos. Con el objetivo de transformar esta situación se busca implementar prácticas que promuevan la clasificación de los residuos desde los hogares, especialmente aquellos con potencial de valorización.

Estos residuos clasificados serán canalizados hacia procesos de valorización energética y la producción de materias primas destinadas a la creación de nuevos productos. A través de este enfoque, se aspira a reducir significativamente la cantidad de desechos destinados a vertederos lo que se traducirá en una disminución de las tasas de contaminación y una reducción de los impactos ambientales asociados. En consecuencia, se logrará atribuir un valor económico a los residuos generados en las áreas urbanas.

El estudio titulado 'Perspectivas de Gestión de Residuos en Áreas Urbanas' destaca la importancia de esta estrategia integral para abordar los desafíos ambientales y económicos derivados de la gestión de residuos en contextos urbanos (Jurado, 2017).

En el departamento de Antioquia, desde el año 2018 se han implementado estrategias de valorización de residuos. En virtud de los requisitos gubernamentales locales, de tal forma que se han impulsado programas que fomentan la separación de los residuos sólidos urbanos desde su origen. Este enfoque permite evaluar los posibles rendimientos energéticos de los residuos reciclables generados por los hogares lo que a su vez facilita el cálculo de su valorización tanto desde una perspectiva económica como energética. Este proceso se concentra en las distintas comunas de la ciudad de Medellín.

Estas medidas están en línea con el programa denominado "Basura Cero", que se concibe como un enfoque holístico para la gestión de los residuos sólidos urbanos. El estudio " Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos: análisis del caso Bogotá D.C. Programa Basura Cero" muestra la importancia de estas iniciativas en la búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión de los residuos y en la promoción de responsables ambientales en la región (Acosta, 2015).

Por ejemplo, en el departamento de Atlántico en Colombia, se han establecido cadenas de valor con el propósito de identificar las capacidades de reciclaje y reutilización de los residuos plásticos. La región alberga 118 empresas dedicadas a la producción de plásticos, así como 200 empresas especializadas en el proceso de recuperación de materiales. Esta desaparición de actores está ligada a la abundante generación de residuos resultado del crecimiento de las grandes industrias y de los cambios en los estilos de vida y el aumento demográfico en las áreas urbanas.(Mendoza Quiroga et al., 2020a)

Ante esta realidad, surge la necesidad de implementar modelos circulares que busquen reintegrar todos los residuos reciclables para reducir la dependencia de la energía en un 45 % los procesos de fabricación. Esto a su vez, conlleva una disminución de la huella de carbono en un 40% además de lograr una disminución del costo económico asociado a las materias primas en un margen de hasta el 30%.(Mendoza Quiroga et al., 2020)

No obstante, el logro de estos objetivos se enfrenta a desafíos un tanto significativos especialmente en las ciudades más desarrolladas del departamento esto con el fin de superar estas barreras y limitaciones se convierte en una prioridad para fomentar eficazmente el proceso de reciclaje y la reincorporación de los residuos plásticos en la cadena de valor. El estudio titulado "Desarrollo de Modelos Circulares para la Gestión de Residuos Plásticos en el Departamento de Atlántico" pone

de manifiesto la relevancia de estas iniciativas en la promoción de prácticas sostenibles en la gestión de residuos en la región (Quiroga et al., 2020).

En el contexto de la industria en el país de España que, por ejemplo, se ha llevado a cabo una experiencia destacada que involucra la fabricación de productos de uso industrial mediante la reintegración de elementos y materias primas recicladas específicamente en la creación de mezclas asfálticas. Esta innovación busca reducir el consumo de hidrocarburos y presenta una serie de ventajas desde una perspectiva económica y ambiental.

La iniciativa ha demostrado ser efectiva en cuanto a su viabilidad económica y su contribución al medio ambiente específicamente al emplear elementos reciclados en la elaboración de mezclas asfálticas, que evita la necesidad de consumir hidrocarburos impactando positivamente los costos de producción y la disminución de la huella de carbono.

Así mismo, esta experiencia puede ser exitosa en España y ofrece valiosas lecciones que serán extrapoladas y aplicadas en otros países. La oportunidad de expandir la producción de mezclas asfálticas similares utilizando materiales no convencionales y adoptando la reincorporación de residuos plásticos en esta cadena productiva puede generar beneficios en términos de sostenibilidad y rentabilidad. El estudio titulado "Innovación en la Fabricación de Mezclas Asfálticas mediante la Reutilización de Elementos Reciclados" subraya la relevancia de esta práctica en el ámbito global y la promoción de modelos de producción más sostenibles (Pegalajar, 2020).

Ahora, para abordar la gestión de los residuos plásticos y su potencial para obtener valor en el mercado es esencial llevar a cabo una evaluación exhaustiva de sus propiedades y características. Este proceso se torna fundamental para garantizar un reciclaje y clasificación de efectivos. El

resultado final del aprovechamiento y reincorporación depende de la precisión y eficacia de la fase de clasificación.

En este sentido, la adecuada identificación y separación de los residuos plásticos son etapas cruciales. Estas acciones permiten determinar cuáles son los materiales adecuados y susceptibles al momento de ser reutilizados para reincorporarse en los circuitos productivos. El estudio "Caracterización y Clasificación de Residuos Plásticos para su Revalorización" de Ojeda y Mercante (2021) resalta la importancia de este procedimiento en la optimización de la gestión de residuos y en el fomento de prácticas sostenibles en la industria (Ojeda & Mercante, 2021).

Para llevar a cabo la valorización de los residuos plásticos generados en una planta de gestión de residuos municipales, resulta esencial someter las muestras de estos residuos a un proceso de clasificación riguroso. Esta etapa es realmente crucial porque los procesos posteriores de aprovechamiento demandan una homogeneidad en la materia prima. Esto asegura que los productos resultantes deben obligatoriamente cumplir con las condiciones necesarias para su reintroducción en el mercado.

Los plásticos, por ejemplo, al ser compuestos de fracciones de materiales fósiles presentan características combustibles en su ciclo de reutilización y/o reciclaje. Este enfoque los transforma en productos fabricados a partir de materias primas secundarias y su valor económico en el mercado se vuelve atractivo para oportunidades de negocios.

Por otra parte, el estudio titulado "Valorización de Residuos Plásticos en Plantas de Gestión Municipal" de Quezada Lozano publicada en el año 2021 resalta la importancia de este proceso para optimizar la gestión de residuos y fomentar la creación de un ciclo productivo más sostenible

donde los residuos plásticos encuentran una nueva vida útil como recursos valiosos (Lozano, 2021).

En el contexto del mercado colombiano puede hacerse mención de los diferentes procesos de producción que demandan el uso eficiente de recursos para reducir al mínimo la generación de residuos y asegurar la tendrán de los recursos naturales y la salud humana. Estas estrategias promueven una relación armónica con el entorno, buscan establecer un enfoque organizativo tanto técnicamente viable como económicamente sostenible, para lograr el cumplimiento de objetivos ambientales.

Lo descrito anteriormente permite identificar que estas estrategias pueden llegar a ser altamente sustentables involucran diversos aspectos, como el diseño de procesos productivos que minimizan los desechos generados en cuanto a la reutilización de materiales y la implementación de sistemas de reciclaje. Estas medidas no solo contribuyen a reducir el impacto ambiental, sino que también pueden generar beneficios económicos y abrir oportunidades para la creación de cadenas de valor más responsables y sostenibles en el sector productivo.

El estudio "Desarrollo sostenible: Desde la mirada de preservación del medio ambiente colombiano" por ejemplo, enfatiza la importancia de estas prácticas para promover un desarrollo económico compatible con la conservación del medio ambiente y el bienestar de la sociedad (Romero, García, & Angélica María Gavidia Pacheco, 2020).

Lo anterior permite identificar de cierta manera un enfoque que puede llegar a ser predominante en la gestión de los residuos sólidos urbanos se centra en la recolección y su posterior disposición final en rellenos sanitarios, especialmente en las áreas urbanas más grandes. Conforme avanza el tiempo se observa que los mecanismos de cobro aplicados a los usuarios por las empresas de

servicios públicos han ido aumentando progresivamente. Como resultado, las tarifas de disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) también aumentaron constantemente. Esto se debe a que los costos relacionados con las operaciones y el mantenimiento de las instalaciones de manejo de residuos sólidos han aumentado de manera significativa con el tiempo.

Frente a esta situación, surge la necesidad de explorar enfoques alternativos en los diferentes procesos específicos de recuperación y transformación de residuos. Estas alternativas presentan condiciones de mercado más favorables al promover la valorización de los residuos en contraposición a una dependencia continua de la disposición final. Además de aliviar los desafíos económicos en donde estas estrategias pueden respaldar tanto el proceso de disposición final como los procesos de recuperación y transformación de residuos aumentando las ganancias económicas tanto para las empresas como para los usuarios involucrados en esta labor.

El estudio titulado "Alternativas Sostenibles en la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos" resalta la importancia de considerar estas nuevas perspectivas en la gestión de residuos para lograr un equilibrio entre aspectos económicos, ambientales y sociales en esta área (Vargas et al., 2014).

El rápido crecimiento poblacional en las áreas urbanas conlleva un aumento significativo en el consumo de recursos naturales y en la generación de residuos. Esta situación demanda la implementación de prácticas y programas orientados hacia la gestión ambiental. Entre estas prácticas, destaca la posibilidad de dar valores económicos a los residuos en el mercado para lograr beneficios ambientales mediante procesos de remanufactura, rediseño, reciclaje y recuperación de materiales o energía.

Colombia, por ejemplo, tiene la oportunidad de establecer instrumentos políticos de gestión que fomenten un uso más sostenible de los recursos naturales y una mejora en la calidad de vida de sus

habitantes. En esta dirección, la industria de gestión de residuos puede desempeñar un papel crucial como un pilar económico en el ámbito nacional.

Por ello, es fundamental que el enfoque hacia una gestión más sostenible de los recursos sea respaldado por políticas gubernamentales y esfuerzos conjuntos de diversos sectores de la sociedad. El estudio titulado "Perspectivas de Gestión Sostenible de Residuos en Colombia" subraya la relevancia de estos aspectos y la posibilidad de impulsar un cambio positivo en la gestión de residuos y su contribución al desarrollo sostenible en el país (González, 2016).

En el contexto del desarrollo y la implementación de medidas ambientales para la gestión de residuos se ha observado el empleo del proceso de pirólisis de plásticos como una técnica de tratamiento y reutilización. Esta estrategia ha demostrado ser eficaz en la transformación de residuos plásticos y su producto final puede generar impactos económicos significativos. En particular, el producto puede usarse como fuente generadora de energía en motores de combustión convencionales disponibles en el mercado.

Destaca que esta aproximación al manejo de residuos plásticos puede obtener retornos económicos en un período relativamente corto o a mediano plazo. Dicha rentabilidad económica es resultado directo de la reutilización y aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, contribuyendo tanto a la gestión sostenible de los desechos como a la generación de beneficios financieros.

El estudio denominado "Pirólisis de Plásticos como Técnica de Tratamiento de Residuos" destaca la relevancia de estas estrategias en la exploración de soluciones tanto innovadoras como rentables para la gestión de residuos. Este enfoque no solo aborda la búsqueda de métodos efectivos para el

manejo de desechos, sino que también avanza en la dirección de promover un desarrollo más y económicamente viable en este ámbito sostenible (Lamagni et al., 2020).

El documento ‘Evaluación de efectividad del proceso de pirólisis como método de disposición final de residuos sólidos aplicado a zona rural del Oriente Antioqueño – Colombia’, asevera que es tan efectivo este método que en diversas partes del mundo se ha convertido en una práctica imperante debido a su eficiencia, bajos costos y grandes beneficios ambientales (Daniel et al., 2019).

El mercado de los combustibles en países del mundo haciendo una breve mención a Latinoamérica, atraviesa una crisis sin precedentes en donde la creación de productos a partir del petróleo se ha vuelto más costosos y se ve en menor cantidad debido a la creciente dificultad productiva pues cada vez las importaciones son más caras y no se logra suplir a cabalidad la demanda interna. Así lo enseñan (Villegas y Zamudio, 2022 como se citó en Mayhua et al., 2022) en el texto ‘Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido’. Por eso, la pirólisis es un método tan necesario llegándose a erigir como una de las grandes opciones a nivel mundial para la obtención de combustible líquido (Mayhua et al., 2022).

El 2019 el estudiante Sebastian Amar Gil y otros de la universidad del Norte realizan una simulación de pirólisis de residuos plásticos utilizando dos modelos de transformaciones termodinámicas con residuos plásticos PET y HDPE, obteniendo como resultado que los polímeros de alta densidad favorecen en la producción de combustibles líquidos, mientras que los PET favorecen en la producción de combustibles gaseosos (Amar Gil et al., 2022).

En el año 2018, los autores José Artemio Ramírez Velarde, Cesar Enrique Gómez Lazarte y Josué Luis Donoso Rodríguez presentaron su trabajo en el libro "Plan de Negocio para la Implementación de una Planta de Reciclaje de Llantas Usadas Mediante el Proceso de Pirólisis". En este estudio se concluye que el modelo de negocios propuesto resultó exitoso en la generación de ganancias mediante el reciclaje de llantas y aseguró la rentabilidad sostenible del emprendimiento.

El análisis financiero realizado reveló una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 21% y un Valor Actual Neto (VAN) de 12.837.073 de soles. Estos resultados son indicativos de que el negocio no es solo viable, sino también rentable, incluso en un escenario normal. El estudio proporciona una evidencia sólida de que la implementación de una planta de reciclaje de llantas mediante el proceso de pirólisis es una opción con perspectivas positivas tanto desde el punto de vista económico como medioambiental (Velarde et al., 2018).

En el año 2013, se llevó a cabo la instalación de una planta de pirólisis para la valorización de neumáticos fuera de uso por parte de la empresa Reinvent. En este proceso, se elaboró una estructura de costos que engloba aspectos como inversión inicial en gastos de personal, costos de recolección, mantenimiento y operación, incluyendo el consumo energético. La evaluación de costos arrojó resultados considerados en límites razonables. En concreto, el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto ascendió a 9.807.449 €, mientras que la Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanzó un 54,9%. Además, el período de recuperación descontado (Discounted Payback Period) se situó en 3,69 años

El análisis de escenarios planteó distintas posibilidades:

A). Se debería aprobar el proyecto si en el escenario pesimista el VAN es mayor a 0.

B). Se debería rechazar el proyecto si en el escenario optimista el VAN es menor a 0.

C). Si el VAN oscila entre valores positivos y negativos en diferentes momentos, no es posible llegar a una conclusión clara.

El caso en cuestión se ajustó a la situación C, lo que condujo a resultados no concluyentes. Sin embargo, en las conclusiones derivadas de la evaluación económica, se destaca que el análisis costo-beneficio de la implementación de una planta de pirólisis de neumáticos en Santiago de Chile arrojó un VAN positivo de € 4.662.691 en el escenario base y con una tasa de descuento del 25%. Este dato señala que el proyecto debería ser considerado viable, ya que genera más beneficios económicos que costos en la mayoría de los escenarios analizados (Navarro, 2013).

Ruiz Cruz, en su publicación titulada 'Evaluación de un Plan de Negocio para el Aprovechamiento y Valorización de Plásticos con el Uso de Nuevas Tecnologías en Chatarrería La 23 SA', propone la implementación de los indicadores financieros Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) como un modelo de análisis económico para evaluar la viabilidad de la valorización de plásticos.

En el análisis específico de este caso se limitará para que, del total de material adquirido que corresponde al 100% y solo un 10% no era utilizable lo que significa que el 90% restante era rentable y apto para la obtención de beneficios. En consecuencia, la fórmula entre gastos y ganancias muestra de manera objetiva que el proyecto es viable desde el punto de vista económico (Cruz, 2014).

El autor también señala que la mencionada tasa de pérdida puede disminuirse mediante una selección más precisa del material y la adopción de maquinaria de mayor calidad. Además, proporciona un dato relevante: aunque la demanda de plástico para valorización es aún limitada

en Colombia en cuanto al mercado está en crecimiento gracias al potencial que presenta el plástico para la generación de energías alternativas. Pero este progreso es limitado por la falta de conocimiento de las cualidades del material por parte de recicladores y empresarios.

Es importante resaltar que el estancamiento en el mercado se atribuye a la falta de información sobre las propiedades del plástico. Esto subraya que en el caso mencionado no es específicamente una empresa dedicada a la valorización del polímero mediante la pirólisis lo que ayuda a determinar el potencial económico del plástico en todas sus formas y condiciones.

En su trabajo, Correa y Angulo en el año 2015 proponen una fórmula para determinar la viabilidad financiera de una empresa de valorización mediante pirolisis. Esta fórmula se fundamentó en el concepto de Valor Actual Neto (VAN), que tiene aplicación tanto en la evaluación como en la gestión de proyectos asimismo servir para el control financiero. Conforme a esta perspectiva el proyecto se considera viable si su Valor Actual Neto es positivo. Asimismo, se involucraron criterios de rentabilidad específicos donde un VAN mayor a cero implica la aceptación del proyecto, mientras que un VAN menor a cero conlleva su rechazo.

Para llevar a cabo este cálculo, los autores consideraron variables clave como la Tasa de Interés Real con base a la Inflación y la Prima por Riesgo. Estos componentes permiten una evaluación más precisa de la viabilidad económica del proyecto, al considerar factores tanto internos como externos que influyen en su rentabilidad. A su vez la siguiente afirmación:

El Valor Actual Neto (VAN) lo componen los resultados positivos que el proyecto genera en sus diez años de funcionamiento. Sin embargo, estos resultados deben ser transmitidos al valor presente para determinar si la inversión es rentable. Un VAN igual a cero indica que la inversión inicial y los costos de oportunidad se han recuperado por completo. En

contraste, cuando el VAN es mayor que cero, no solo se ha logrado la recuperación de la inversión y los costos de oportunidad, sino que también se ha obtenido un excedente económico adicional, confirmando así la rentabilidad del proyecto (Laverde & Argote, 2015).

1.1.2. Marco Legal e Institucional

La pirolisis es un proceso que implica la descomposición térmica de moléculas grandes en ausencia de oxígeno, se ha explorado como una solución potencial para el manejo de residuos plásticos en Colombia. Este proceso puede generar una mezcla de hidrocarburos conocida como aceite ligero, que puede utilizarse como fuente de energía. En términos de legislación, el Decreto 1281 de 2020 modifica el Decreto único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía 1073 de 2015, respecto del sector de los combustibles líquidos.

Este decreto busca actualizar y mejorar el marco normativo del sector de explotación, refinación, distribución y transporte de hidrocarburos, incluyendo aspectos regulatorios y técnicos que permitan incluir la sostenibilidad ambiental. Además, se busca generar instrumentos que le permitan al Gobierno nacional dar las señales adecuadas en la economía, con el fin de que los agentes participantes de esta sean motores de desarrollo e inversión en el sector energético de los combustibles líquidos derivados del petróleo y sus mezclas con biocombustibles. Dicho lo anterior, a continuación, se presenta la normatividad ambiental aplicable para los trabajos a realizar:

Figura 1.

Marco legal e institucional

AÑO	REFERENCIA	EXPIDE	TÍTULO/DESCRIPCIÓN
		RESIDUOS SOLIDOS	
			Regule de cargue, descargue, almacenamiento y disposición final de escombros. Por la que se

AÑO	REFERENCIA	EXPIDE	TÍTULO/DESCRIPCIÓN
1997	Decreto 357 de 1997	ALCALDIA DE BOGOTÁ	aprueba la Convención sobre los humedales de importancia internacional como hábitat de aves acuáticas, suscrita en Ramsar el 2 de febrero de 1971.
2004	Resolución 132 de 2004	UAESP	Se adopta el Plan de Gestión integral de residuos sólidos de Bogotá.
2008	Ley 1259 de 2008	Presidencia de la República	Por medio de la cual se instaura en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones.
2009	Resolución 372 de 2009	MADS	Por la cual se establecen los elementos que deben contener los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Baterías Usadas Plomo Ácido, y se adoptan otras disposiciones
2011	Ley 1466 de 2011	Presidencia de la República	Por el cual se adicionan, el inciso 2° del artículo 1° (objeto) y el inciso 2° del artículo 8°, de la Ley 1259 del 19 de diciembre de 2008, " aplicación del Comparendo Ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros, y se dictan otras disposiciones.
2012	Decreto 564 de 2012	SDA	Por medio del cual se adoptan disposiciones para asegurar la prestación del servicio público de aseo en el Distrito Capital en acatamiento de las órdenes impartidas por la Honorable Corte Constitucional en la Sentencia T-724 de 2003 y en los Autos números 268 de 2010, 275 de 2011 y 084 de 2012.
2012	Resolución 1115 de 2012	SDA	Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital.
2015	Decreto 586 de 2015	SDA	Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición - RCD en Bogotá D.C.
2011	Acuerdo 473 de 2011	Concejo de Bogotá	"Por el cual se establece el programa puntos ecológicos, con el fin de promover la separación

AÑO	REFERENCIA	EXPIDE	TÍTULO/DESCRIPCIÓN
			en la fuente de los residuos sólidos para su reciclaje, aprovechamiento y disposición final".
2012	Resolución 799 de 2012	UAESP	“por la cual se establece el listado detallado de los materiales reciclables y no reciclables para la separación en la fuente de los residuos sólidos domésticos en el Distrito Capital”
2013	Resolución 61 de 2013	UAESP	“por la cual se crea el Registro Único de Recicladores de Oficio – RURO – El Registro único de Organizaciones de Recicladores – RUOR – y se establecen los criterios para la configuración de organizaciones de recicladores de oficio como Organizaciones de Recicladores habilitadas en Bogotá D.C.”.
2013	Resolución 701 DE 2013	UAESP	“Por la cual se establecen disposiciones para la presentación del material potencialmente reciclable en Bogotá D.C.”
2016	Decreto 495 DE 2016	Secretaría Distrital del Hábitat	"Por el cual se adopta el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS- del Distrito Capital, y se dictan otras disposiciones".
2019	Resolución 2184 de 2019	MADS	“Por la cual se modifica la Resolución 688 de 2016 sobre el uso racional de bolsas y se adoptan otras disposiciones.
2016	ASTM Colección de normas para petróleo		Propiedades y poder calorífico
	GTC 53 - 2		Establece los lineamientos para la gestión de residuos de posconsumo como los plásticos en cada una de sus presentaciones

Nota. Se incluye la normativa que configura la gestión de residuos referidos por la normatividad vigente y que hace referencia al proyecto. Tomado de la Legislación colombiana actual del año 2023.

1.1.3. Pregunta de Investigación

¿De qué manera se pueden aprovechar los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB, con un enfoque de economía circular?

1.2 Justificación

La actividad productiva mundial y por supuesto la nacional genera grandes cantidades de residuos contaminantes convirtiéndose en un constante de deterioro ambiental afectando directamente al ser humano. Por tal razón, las compañías, instituciones, entidades y comunidades deben ser conscientes de la afectación aludida, en consecuencia, están en la obligación de implementar estrategias, planes, programas y proyectos, enfatizados a contrarrestar este fenómeno. En ese sentido, el presente proyecto es una apuesta a ese objeto dado que busca la reutilización de ese material para desarrollar otro modo eficiente de utilizar los residuos restantes de un proyecto sea cual sea; debe ser amigable con el medio ambiente. A su vez, resulta pertinente y novedoso para las políticas internacionales tendientes a la protección de los ecosistemas estratégicos globales.

Como estudiantes de la Maestría en gestión Ambiental para la Competitividad aportando la experiencia profesional en proyectos de infraestructura junto con el conocimiento de los procesos internos de la compañía se pretende implementar medidas de gestión ambiental en la construcción de la PLMB para el aprovechamiento y valorización de residuos poliméricos.

Las obras civiles desarrolladas en el marco de mejoramiento de la ciudad de Bogotá se han caracterizado por tener una alta producción de residuos poliméricos y un consumo de recursos a gran escala. (IDU, 2022). Por eso, sus administradores y operadores se han visto en la necesidad de tomar medidas en el asunto pues en muchos de los casos no tienen la cadena de disposición final adecuada, lo que implica un gasto desmedido de recursos para el control final de residuos a nivel general precisamente en esto radica la importancia de la propuesta aquí formulada. Con la ejecución del proceso de producción de combustible a partir de residuos poliméricos que se está aportando en beneficio de una mejor y mayor valorización de residuos.

En la última década se ha mejorado el manejo de residuos debido a obligaciones y requerimientos de las entidades distritales de control ambiental lo cual ha mejorado el uso de los residuos. Estos desechos se entregan a empresas encargadas de darles una disposición final adecuada o para incorporarlos en nuevas cadenas de producción según corresponda (Caicedo, 2018). En este contexto, resulta viable y favorable para la ciudad una propuesta que genere combustible a través de residuos plásticos. Esto, teniendo en cuenta que el subproducto obtenido tendría mayor posibilidad de uso en la industria y con un beneficio económico para el proyecto de la Primera Línea del Metro de Bogotá - PLMB.

Se puede advertir que el presente es un proyecto viable y novedoso, ya que aporta positivamente a la descontaminación del hábitat urbano, sobre todo, en un contexto caracterizado por altos índices de agentes dañinos, de tal forma que es viable dado que su ejecución es plausible y realizable. No es una idea que contradiga la lógica de lo realizable, por el contrario, con una ideación y la destinación adecuada de recursos, podrá realizarse sin problemas. Finalmente, resulta novedoso ya que hoy esta área de producción a través de la pirólisis es aún incipiente en Colombia.

1.3 Hipótesis

Los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB son una fuente de materia prima para la elaboración de combustibles líquidos cuya producción dinamiza la economía local y reduce impactos ambientales por RSU y emisiones.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar una propuesta para la valorización de los residuos poliméricos generados en la construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá - PLMB, con enfoque en la economía circular, para la producción de combustibles líquidos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar una caracterización y diagnóstico inicial de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB.
- Definir condiciones técnicas para la valorización de residuos poliméricos en la construcción de la PLMB, con base a la economía circular.
- Desarrollar una propuesta de valorización de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB.
- Realizar un análisis de costos asociados con relación a la propuesta de valorización de residuos poliméricos generados en los procesos constructivos de la PLMB, para la producción de combustible.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

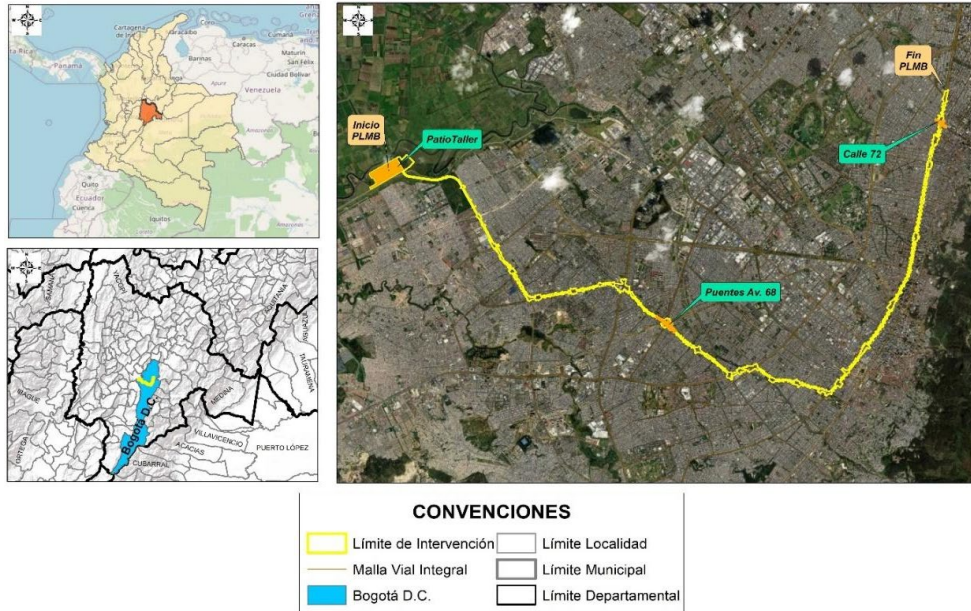
2.1 Lugar y Descripción del Proyecto

Este proyecto de la Primera Línea Metro de Bogotá - PLMB dotará a la ciudad de Bogotá de un sistema de transporte masivo para mejorar la movilidad de los habitantes de la ciudad. Este sistema de transporte consiste en un metro elevado de conducción automática cuyo objetivo principal es responder a la creciente demanda de movilidad de la ciudad dando un servicio de calidad a los habitantes de la capital colombiana.

La PLMB hace parte de los Proyectos de Interés Nacional Estratégico declarados el 30 de mayo de 2017 y pretende generar el desarrollo integral de la movilidad de Bogotá mediante un Sistema Integrado de Transporte Masivo. Esta Línea facilitará la movilidad de los ciudadanos desde la zona suroeste de la ciudad hacia el centro y norte de la ciudad y viceversa, para lo cual se integrará con el actual sistema de transporte masivo (BRT / Transmilenio). La Primera Línea del Metro de Bogotá - PLMB tiene una longitud aproximada de 23.9 Km, que se divide en 6 tramos. El corredor se encuentra a lo largo de las siguientes 9 localidades: Bosa, Kennedy, Puente Aranda, Antonio Nariño, Los Mártires, Santa Fe, Teusaquillo, Chapinero y Barrios Unidos. El proyecto inicia en el predio El Corzo en el que se localiza el Patio Taller en la localidad de Bosa y finaliza en la Avenida Paseo de Los Libertadores con calle 80 con Caracas (Metro Línea 1 SAS, 2023).

Figura 2.

Localización general y trazado de la PLMB



Nota. Se incluye el trazado de la PLMB y los frentes de trabajo que se encuentran activos en la fase previa al proceso constructivo del viaducto. Tomado de la PLMB 2022.

De tal forma que el proyecto de investigación está encaminado a establecer un análisis cuantitativo en donde el objeto de la investigación es estructurar una propuesta de aprovechamiento de residuos para la producción de combustibles con los residuos sólidos plásticos resultantes de la construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá. Se necesita realizar estudios de orden económico y financiero, recopilar todos los datos estadísticos disponibles, es necesario también identificar que clases de materiales se están utilizando para la construcción de la PLMB, que nivel de peso contienen los materiales y todas las variables posibles que ayuden a identificar la viabilidad del proyecto.

Ahora bien, de acuerdo con lo descrito anteriormente, el enfoque cualitativo no aplica con el objeto del proyecto dado que, no se ve la necesidad de tratar ningún tema de conducta, comportamiento o ámbito social demostrativo. Una vez realizado este paso, se puede identificar muchos interrogantes o vacíos por explorar sobre el uso de los residuos poliméricos en la producción de combustible. De igual manera se puede identificar y fundamentar la hipótesis.

2.2 Fases de la Investigación

Para el cumplimiento de los objetivos trazados en el presente proyecto, se ejecutarán las siguientes fases:

FASE 1:

“Realizar una caracterización y diagnóstico inicial de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB”

El proceso de caracterización y diagnóstico inicial de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB se construirá teniendo en cuenta la siguiente información:

- Verificación y aforo de los residuos poliméricos generados en las obras desarrolladas para la construcción de la PLMB.
- Identificación de las propiedades fisicoquímicas de los residuos poliméricos generados.
- Se realiza la caracterización de los residuos poliméricos mediante sus propiedades fisicoquímicas para identificar su composición y determinar su uso apropiado en el proceso de pirólisis.

FASE 2:

“Definir condiciones técnicas para la valorización de residuos poliméricos en la construcción de la PLMB, con base a la economía circular”

Según las referencias consultadas, se verifican las técnicas utilizadas para la reincorporación de polímeros en sistemas productivos y se determinan las alternativas para manejar los polímeros generados en la construcción de la PLMB.

Tras revisar la bibliografía y la información experimental, se determina cuál es la mejor metodología de implementación para manejar residuos plásticos poliméricos.

Se realiza una verificación y cuantificación de la generación de residuos poliméricos en la PLMB y su periodicidad y frecuencia de generación. Luego se efectúa una verificación de las propiedades caloríficas de los residuos que han sido clasificados en campo para determinar cuáles son más efectivos en el proceso de pirólisis.

Teniendo en cuenta el inventario de residuos realizado en la construcción de la PLMB, se establecen las actividades a realizar en cuanto a almacenamiento, selección y entrega para reutilización en el proceso llamado pirólisis.

Se requiere de un proceso y/o mecanismo para poder determinar la mejor opción del residuo polimérico adecuado para el proceso de pirólisis. Se desarrolla a través del modelo de matriz de ponderación donde se consideran múltiples factores y/o criterios para calificación y toma de la mejor decisión del polímero a utilizar en la producción de combustible. Para el desarrollo de la Matriz de ponderación, se deben establecer las siguientes fases de trabajo:

- ***Establecimiento de criterios (Producción de combustible)***

Se establecen los criterios de importancia para evaluar la fabricación de combustible a través del proceso de pirólisis usando como materia los polímeros de la PLMB.

- ***Definición de la importancia de los criterios***

Luego se define la importancia de cada uno de los criterios definidos con la siguiente calificación:

1 = menos/poco importante

2 = importante

3 = muy importante

Se clasifica para cada criterio identificado en la producción de combustible.

- ***Puntuación***

Se establece una puntuación del escenario evaluado teniendo en cuenta el resultado esperado para el cumplimiento del objetivo principal que en este caso es el cumplimiento del criterio establecido inicialmente. Se califica de la siguiente manera:

1 = cumple criterios de 0% a 20%

2 = cumple criterios de 20% a 40%

3 = cumple criterios de 40% a 60%

4 = cumple criterios de 60% a 80%

5 = cumple criterios de 80% a 100%

Se clasifica para cada criterio identificado en la producción de combustible.

- ***Justificación de la puntuación obtenida***

Se hace una breve descripción de la justificación de la puntuación obtenida según la necesidad de producir combustible.

- ***Puntuación ponderada del criterio***

Se multiplica el valor de la importancia y el valor de la puntuación para obtener la puntuación ponderada y se clasificará de acuerdo con el siguiente código de colores tipo semáforo:

Figura 3.

Calificación puntuación ponderada

Calificación	Resultado
15 a 11	Importante
6 a 10	Aceptable
1 a 5	Inaceptable

Nota. En la figura se observa que según el resultado obtenido se incluye en el color de la codificación establecida.

- ***Resultado de ponderación***

Se establece la sumatoria de la ponderación total ponderada de cada uno de los escenarios evaluados y se clasifica de mayor a menor siendo así el de mayor resultado el más favorable para la producción de combustible.

FASE 3:

“Desarrollar una propuesta de valorización de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB”

Después de verificar las técnicas empleadas para el tratamiento químico de los residuos poliméricos, se elabora una propuesta con la mejor alternativa requerida para la transformación de los residuos poliméricos. Con esta propuesta se plantea tener resultados efectivos de obtención de combustible a través de los residuos poliméricos generados en la PLMB y así se puedan dar a conocer en la ciudad para generar emprendimientos y propuestas de negocio.

La propuesta planteada debe garantizar que los residuos poliméricos recolectados en la PLMB se encuentren disponible para el desarrollo del proceso de pirólisis planteado. Con este almacenamiento en sitio se tiene la materia prima como insumo principal para el proceso de producción de combustible.

Debido a la intención de establecer el área de la planta de producción de combustible en el sector del Patio Taller del Metro ubicado en la localidad de Bosa, es necesario tener en cuenta que este fue un predio adjudicado para la construcción y desarrollo del proyecto, para lo cual no se requiere una renta de algún inmueble para el desarrollo de la infraestructura necesaria para la realización del proceso de pirólisis.

Después del instalado el equipo reactor de pirolisis, se realiza la verificación de toda su instalación y requerimientos de insumos para su debida operación según lo establecido por el fabricante.

Luego del debido proceso de instalación del reactor, se continúa con los procesos técnicos y de calidad para poder garantizar la obtención del combustible con la materia prima almacenada en el área de acopio central de la PLMB.

Para poder garantizar un mercado, se deben establecer valores económicos del producto obtenido a través del desarrollo del proceso de pirólisis y de esta forma implementar la alternativa de negocio para la propuesta establecida de producción de combustible.

Como parte final de la propuesta de valorización, se busca generar un crecimiento de la idea de negocio generando procesos de divulgación a los diferentes métodos productivos de la ciudad para que puedan ser implementados y replicados en sus modelos de negocio.

FASE 4:

“Realizar un análisis de costos asociados a la propuesta para la valorización de residuos poliméricos generados en los procesos constructivos de la PLMB, para la producción de combustible”

Tras revisar la bibliografía y la información experimental, se elabora el análisis de costos asociados a la propuesta para verificar los precios del mercado en cada proceso, y allí se identifican los costos operativos y de procesamiento de los residuos poliméricos. El proceso se realizará de la siguiente manera:

- Se realiza una verificación del mercado para identificar el precio promedio del galón de gasolina según las entidades que vigilan y controlan los precios a nivel nacional.
- Se realiza un análisis del mercado a nivel mundial para la compra de un reactor pirolítico que funcionará en las instalaciones del proyecto de la PLMB, en donde se instalará la planta de producción de combustible, este reactor deberá cumplir con las necesidades de disponibilidad de materia prima almacenada “Residuos poliméricos” en el centro de acopio para el proceso de aprovechamiento.

Posteriormente, se realiza un análisis comparativo de los equipos de pirolisis encontrados en el mercado y que se ajustan a las necesidades del proyecto; de esta forma a través de una calificación de cada una de sus características técnicas se establecerá una ponderación para establecer los criterios más predominantes y tomar la decisión óptima para escoger el equipo en el mercado:

Puntuación Ponderada del Criterio

Se verifica el valor de la características para cada uno de los equipos “Reactor pirolítico” con el fin de obtener la puntuación ponderada y se clasificará de acuerdo con el siguiente código de colores tipo semáforo:

Figura 4.

Calificación puntuación ponderada.

Calificación	Resultado
3	Mejor condición
2	Condición Aceptable
1	Condición desfavorable

Nota. Se muestra que según el resultado obtenido se incluye en el color de la codificación establecida.

Resultado de Ponderación

Se establecerá la sumatoria de la ponderación total ponderada de cada característica y se determina el de mayor valor, siendo el de mayor puntaje el que tenga mejor condición para producir combustible. (Eficiencia, precio, operatividad y porcentaje de producción de combustible).

- De acuerdo con la toma de decisión del reactor pirolítico con mejor condición de operación y de eficiencia en la producción de combustible, se realiza y establece el costo de operación de este equipo con las características de operatividad según las capacidades máximas dadas por el fabricante.
- Luego, se realiza el cálculo de la operatividad del rector pirolítico con la cantidad de residuos a generar en la obra y que se encuentran proyectados para la construcción de la PLMB.
- Se establece la evaluación de alternativas de inversión del proyecto (costos de inversión y costos de operación).

- Se realiza el análisis de los ingresos económicos del proyecto basado en la proyección de residuos a generar en 5 Años de construcción por 8 frentes de trabajo; 10000 trabajadores promedio de 250 contratistas.
- Por último, se analizan indicadores de bondad financiera considerando el porcentaje de inflación anual de 33 % y una producción durante 5 años para establecer la TIR (Tasa interna de retorno) de la inversión del proyecto.
- Como análisis de la investigación, se establecen los beneficios ambientales del proceso de producción de combustible a través del uso de reactores pirolíticos que se pondrán en marcha en el proyecto de la PLMB.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Exposición de Resultados

Para el desarrollo de la metodología se realiza la recolección de la totalidad de la información primaria y secundaria para la puesta en marcha de cada una de las fases propuestas de la siguiente manera:

3.1.1. FASE 1 “Caracterización y diagnóstico inicial de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB”

Para la caracterización de los materiales se elaboró un registro a los subcontratistas de obra que se encuentran desarrollando actividades en la fase de preconstrucción del proyecto, donde se recolecta información de los inventarios de volúmenes de residuos poliméricos generados mensualmente en cada uno de los frentes de trabajo.

La caracterización y el diagnóstico inicial de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB se pueden realizar a través de un análisis detallado de los tipos y cantidades de residuos generados, así como de su composición y potencial impacto ambiental. En primer lugar, es importante identificar los diferentes tipos de residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB como, por ejemplo, residuos de polietileno, polipropileno, PVC, poliestireno, entre otros.

Dichos residuos pueden provenir de materiales de embalaje, tuberías, revestimientos, aislamientos, entre otros. Una vez identificados los tipos de residuos poliméricos es necesario cuantificar la cantidad de residuos generados durante la construcción de la PLMB. Esto puede realizarse a través de la estimación de la cantidad de residuos generados por tipo de material y su peso o volumen.

Con base en esta caracterización y diagnóstico inicial es pertinente establecer estrategias para la gestión adecuada de los residuos poliméricos como la implementación de medidas de reducción,

reutilización, reciclaje o disposición final adecuada con el fin de minimizar su impacto ambiental y promover la sostenibilidad en la construcción de la PLMB. A la fecha se realizaron las encuestas de generación de residuos plásticos generados en las actividades de la Fase Previa de la PLMB a lo largo de las obras desarrolladas en la Calle 72 con Caracas, Av. 68 con 1ro de mayo y el Patio Taller las cuales se muestran a continuación en la siguiente tabla y se soportan con la encuesta anexa (Véase Anexo 1 Declaración de Residuos):

Tabla 1.

Inventario de residuos generados por la PLMB.

INVENTARIO DE RESIDUOS SOLIDOS (KG)					
PERIODO	PLÁSTICO PET (kg)	PLASTICO SEÑALIZAC IÓN (ALTA DENSIDAD) (KG)	PLÁSTICO CUBRIMIE NTO DE MATERIAL ES (BAJA DENSIDAD) (KG)	PLÁSTICO (BOTELLAS - CONSTRUCC ION SOSTENIBLE) (KG)	PLÁSTIC O PVC (KG)
1 - 31 enero 2022	0	0	80	0	0
1 - 28 febrero 2022	0	0	120	0	0
1 – 31 marzo 2022	13	0	30	5	0
1 - 30 abril 2022	12	0	180	5	50
1 - 31 mayo 2022	14	20	150	5	10
1 - 30 junio 2022	0	27	68	2	0
1 - 31 julio 2022	0	30	66	2	0
1 - 31 agosto 2022	10	160	130	2	0

INVENTARIO DE RESIDUOS SOLIDOS (KG)					
PERIODO	PLÁSTICO PET (kg)	PLASTICO SEÑALIZACIÓN (ALTA DENSIDAD) (KG)	PLÁSTICO CUBRIMIENTO DE MATERIAL ES (BAJA DENSIDAD) (KG)	PLÁSTICO (BOTELLAS - CONSTRUCCION SOSTENIBLE) (KG)	PLÁSTICO PVC (KG)
1 - 30 septiembre 2022	55.2	28	0	20	0
1 - 31 octubre 2022	87	12.2	0	12	0
1 - 30 noviembre 2022	60	7.9	0	12	0
1 - 31 diciembre 2022	50	21.28	0	13	0
1 - 31 enero 2023	110	313	0	15	0
1 - 28 febrero 2023	110	35.4	0	21	5
TOTAL	521.2	654.78	824	114	65

Nota. Información recolectada de encuestas de la totalidad de la generación de residuos de la PLMB. El periodo de mayor generación de residuos es enero de 2023 y el de menor generación de residuos es marzo de 2022. La descripción de la información recolectada se realiza en una fracción de tiempo de enero de 2022 a marzo de 2023 (13 meses).

Con la tabla 4 es pertinente tener en cuenta que, para la ejecución del proyecto se cuentan con 15 subcontratistas que desarrollan y/o ejecutan labores para el proyecto en actividades constructivas y diseños del proyecto. Para muestreo de la generación de residuos plásticos en obra se encuestaron 9 de ellos quienes realizan las actividades constructivas en el proyecto y son los grandes

generadores de residuos mes a mes. El proceso de declaración de estos residuos se realiza en una fracción o periodo de tiempo que va desde enero de 2022 hasta febrero de 2023, el cual es el requerido para desarrollar la monografía. Luego de este ejercicio se procede a realizar la caracterización fisicoquímica de los polímeros que se generan en el proyecto.

3.1.1.a. Caracterización fisicoquímica de los polímeros. Los polímeros se clasifican de acuerdo con su estructura química, su origen y su comportamiento térmico y mecánico (Ochoa Montoya, 2017). En ese sentido, para la identificación y clasificación de los residuos poliméricos, se va a seguir el método planteado por Céspedes; el cual permite analizar la densidad del plástico. Con esta observación se pueden identificar los componentes de los polímeros y, en consecuencia, si son de calidad o no, o si sirven para los fines propuestos de acuerdo con su composición química (Céspedes & Hernández, 2018).

Según Céspedes, los plásticos son materiales sintéticos con una amplia variedad de características fisicoquímicas que varían según su composición y procesamiento. A continuación, se presentan algunas de las características más comunes de los plásticos:

Densidad: Los plásticos tienen densidades que pueden variar desde menos de 0.9 g/cm³ (como en el caso del polietileno de baja densidad) hasta más de 2 g/cm³ (como en el caso del policarbonato). Esta propiedad puede afectar el peso, la resistencia y la flotabilidad del plástico (Beltrán & Marcilla, 2020).

Flexibilidad - Resistencia: Es una propiedad mecánica de los plásticos. Los plásticos pueden ser muy flexibles y tener una alta resistencia a la deformación, como en el caso del polipropileno, o pueden ser rígidos y quebradizos, como en el caso del policarbonato (M Beltrán & A Marcilla, 2020).

Estabilidad térmica: Los plásticos tienen diferentes niveles de estabilidad térmica, lo que significa que algunos pueden soportar temperaturas muy altas sin sufrir cambios significativos en

sus propiedades físicas, mientras que otros se derriten o se degradan a temperaturas relativamente bajas. Por ejemplo, el polietileno tiene una temperatura de fusión alrededor de 110 °C, mientras que el teflón puede resistir temperaturas de hasta 260 °C (González-Prolongo, 1997).

Resistencia química: Los plásticos pueden ser resistentes o sensibles a diferentes productos químicos. Por ejemplo, el policarbonato es muy resistente a los ácidos, mientras que el poliestireno es sensible a algunos disolventes orgánicos (Beltrán & Marcilla, 2020).

Transparencia: Algunos plásticos, como el policarbonato, son transparentes y permiten una transmitancia a la luz que puede ser superior al 90%. Otros, como el polipropileno, son opacos (Beltrán & Marcilla, 2020).

Solubilidad: Los polímeros amorfos o que no tienen su estructura regular presentan una mayor solubilidad que los cristalinos. Sin embargo, los polímeros encontrados en el mercado presentan una solubilidad en solventes orgánicos y son insolubles en agua (Prolongo, 1997). A continuación, se presenta el cuadro comparativo “Características fisicoquímicas de los polímeros” elaborado para identificar las características de los polímeros encontrados en el mercado y que hacen parte del estudio realizado (Véase Anexo 2: Características fisicoquímicas de los polímeros):

Tabla 2.

Características fisicoquímicas de los polímeros

PLASTICOS EN EL MERCADO	SIG LA	¿DONDE SE ENCUENTRA EN LAS OBRAS CIVILES?	DENSIDAD (gr/cm ³)	CONDUCTIVIDAD TERMICA - PUNTO DE FUSION (°C)	SOLUBILIDAD	RESISTENCIA A LA TENSION	RESISTENCIA QUIMICA	TRANSPARENCIA	PODER CALORIFICO MJ/kg	ESTABILIDAD TERMICA	COMBUSTIBLE PRODUCIDO	REFERENCIAS
POLIETILENOS	PE	Es el plástico más común en la actualidad y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, como bolsas de plástico, botellas, tuberías, juguetes y envases, entre otros	0.91 - 0.96	110 - 130	No se disuelve en líquidos, pero si en disolventes	Alta	Resistente a ácidos y bases	Transparente y translucido	39-44	Buena estabilizada térmica	Aceite pirolítico (Diesel sintético – Gasolina sintética) Gas (monóxido de carbono, dióxido de carbono y gases volátiles)	Beltrán & Marcilla 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016 (Ramos, 2019)
POLIPROPILENOS	PP	Es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones, como en envases, textiles, automóviles, elementos de señalización y dispositivos médicos, entre otros.	0.895 - 0.92	160 - 170	No se disuelve en líquidos, pero si en disolventes	Alta	Resistente a ácidos y bases	Opaco	36-40	Buena estabilizada térmica	Aceite pirolítico (Diesel sintético – Gasolina sintética) Gas (monóxido de carbono, dióxido de carbono y gases volátiles)	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016

PLASTICOS EN EL MERCADO	SIG LA	¿DONDE SE ENCUENTRA EN LAS OBRAS CIVILES?	DENSIDAD (gr/cm ³)	CONDUCTIVIDAD TERMICA - PUNTO DE FUSION (°C)	SOLUBILIDAD	RESISTENCIA A LA TENSION	RESISTENCIA QUIMICA	TRANSPARENCIA	PODER CALORIFICO MJ/kg	ESTABILIDAD TERMICA	COMBUSTIBLE PRODUCTO	REFERENCIAS
POLICARBONATOS	PC	Se usa en aplicaciones como tejas y recubrimientos de estructuras; se suele usar en aplicaciones donde se requiere alta seguridad, como cascos de protección, gafas de seguridad.	1.2 - 1.4	215 - 230	No se disuelve en líquidos, pero si en disolventes	Muy resistente	Resistente a ácidos y bases	Transparente y translucido	17-21	Buena estabilidad térmica	Aceite pirolítico y gas	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016
POLIESTIRENO	PS	Es un plástico adecuado para su uso en aplicaciones de envasado y exhibición	1.4 - 1.6	70 - 115	El poliestireno es soluble en algunos disolventes orgánicos como la acetona, el etanol y el benceno	Buena resistencia mecánica	Resistente a ácidos y bases	Transparente y brillante	39-43	Es un material que se derrite a bajas temperaturas	Aceite pirolítico y gas	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016
POLIAMIDAS	PA	Es un plástico encontrado en el mercado como el Nylon	1.0 - 1.20	200 - 300	Prácticamente insoluble en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos	Alta	Las poliamidas son resistentes a muchos productos químicos, incluyendo ácidos, bases y	Opaco	24-30	Buena estabilidad térmica Resistencia a rayos UV	Aceite pirolítico y gas	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005

PLASTICOS EN EL MERCADO	SIG LA	¿DONDE SE ENCUENTRA EN LAS OBRAS CIVILES?	DENSIDAD (gr/cm ³)	CONDUCTIVIDAD TERMICA - PUNTO DE FUSION (°C)	SOLUBILIDAD	RESISTENCIA A LA TENSION	RESISTENCIA QUIMICA	TRANSPARENCIA	PODER CALORIFICO MJ/kg	ESTABILIDAD TERMICA	COMBUSTIBLE PRODUCIDO	REFERENCIAS
							disolventes					Askeland, Donald R, 2016
PVC	PVC	Es un plástico adecuado para su uso en aplicaciones de tuberías para obras civiles	1.38 - 1.58	212	Ligeramente soluble en agua; soluble en alcohol etílico y éter dietílico	Buena resistencia mecánica	Resistente a ácidos y bases	Transparente y opaco	17-20	Buena estabilidad térmica	Cloruro de hidrógeno (HCl), dióxido de carbono (CO ₂)	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016
POLIETILENTERE FTALATO	PET	Es un polímero termoplástico o utilizado en una variedad de aplicaciones, especialmente en envases de bebidas y alimentos	1.33 - 1.45	267	El PET es insoluble en solventes orgánicos, aunque presenta una solubilidad en mayor o menor grado a algunos solventes como cetonas, compuestos clorados y alcoholes de cuatro u ocho	Buena resistencia mecánica	Resistente a ácidos y bases	Transparente	25-30	El PET tiene una buena resistencia térmica y puede soportar temperaturas de hasta 70 grados Celsius	Aceite pirolítico y gas	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016

PLASTICOS EN EL MERCADO	SIG LA	¿DONDE SE ENCUENTRA EN LAS OBRAS CIVILES?	DENSIDAD (gr/cm ³)	CONDUCTIVIDAD TERMICA - PUNTO DE FUSION (°C)	SOLUBILIDAD	RESISTENCIA A LA TENSIÓN	RESISTENCIA QUIMICA	TRANSPARENCIA	PODER CALORIFICO MJ/kg	ESTABILIDAD TERMICA	COMBUSTIBLE PRODUCTO	REFERENCIAS
					carbonos, solventes halogenados, aromáticos, cetonas de bajo peso molecular y bases							
POLIMETILMETACRILATO	PMMA	Es un polímero termoplástico o transparente y resistente utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, como ventanas, lentes de gafas, paneles de iluminación, entre otros	1.15 - 1.20	160	Es insoluble en Agua	Buena resistencia mecánica	Buena resistencia a productos químicos	Transparente y translucido	19-25	El PET tiene una buena resistencia térmica y puede soportar temperaturas de hasta 70 grados Celsius	Inflamable metacrilato de metilo	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016
POLIURETANO	PU	Es un polímero termoestable o termoplástico usado en muchas aplicaciones por sus características físicas y químicas únicas.	1.2	290 - 350	Insoluble en Agua	El poliuretano tiene una excelente resistencia mecánica, incluyendo resistencia a la abrasión, al desgarro y	El poliuretano es resistente a muchos productos químicos	Transparente y translucido	28-32	El poliuretano tiene una excelente resistencia térmica y puede soportar temperaturas que van desde -50 °C a 130 °C. Algunos tipos de poliuretano pueden ser especialmente	Aceite pirolítico (Diesel sintético – Gasolina sintética)	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016

PLASTICOS EN EL MERCADO	SIG LA	¿DONDE SE ENCUENTRA EN LAS OBRAS CIVILES?	DENSIDAD (gr/cm ³)	CONDUCTIVIDAD TERMICA - PUNTO DE FUSION (°C)	SOLUBILIDAD	RESISTENCIA A LA TENSION	RESISTENCIA QUIMICA	TRANSPARENCIA	PODER CALORIFICO MJ/kg	ESTABILIDAD TERMICA	COMBUSTIBLE PRODUCTO	REFERENCIAS
						a la flexión				resistentes a la llama		
POLIÉSTER		El poliéster es conocido por su resistencia al desgaste, al rasgado y a la abrasión, lo que lo hace ideal para su uso en aplicaciones de ropa y textiles de obras civiles, así como en la fabricación de piezas moldeadas y otros productos	1.2 - 1.4	265	Insoluble en Agua	El poliéster tiene una buena resistencia mecánica, incluyendo resistencia a la tracción, a la flexión y a la abrasión	El poliéster es resistente a muchos productos químicos, incluyendo ácidos y bases	Transparente y translucido	19-22	El poliéster tiene una buena resistencia térmica y puede soportar temperaturas que van desde -40 °C a 200 °C.	Aceite pirolítico (Diesel)	M Beltrán & A Marcilla, 2020 González-Prolongo, 1997 SHACKEL FORD, JAMES F, 2005 Askeland, Donald R, 2016

Nota. En esta figura se muestran las características fisicoquímicas de los polímeros y la información de dónde y en qué presentación se pueden encontrar en las obras civiles de la ciudad. Esta información es clave, ya que este es el punto de partida para poder realizar la valorización de los residuos de la PLMB.

De acuerdo con la Tabla 5, se puede manifestar que el combustible pretendido en este proyecto puede tener su derivación para producir combustibles líquidos y gaseosos. Por ello, es importante establecer su origen y composición fisicoquímica porque de eso depende su calidad e idoneidad para la combustión.

Según lo verificado en el cuadro de caracterización fisicoquímica, la información de los residuos generados en los proyectos y obras civiles entre los plásticos que pueden ser adecuados para la pirólisis incluyen el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (LDPE) y el poliestireno (PS), ya que tienen puntos de fusión relativamente bajos y pueden facilitar el proceso del pirólisis (Proaño & Crespo, 2009).

De esta manera, y según los resultados de los inventarios de generación de residuos se puede evidenciar que los residuos que se generan en mayor cantidad en la construcción de la PLMB son:

- Polietileno de Baja densidad (HDPE)
- Polietileno de Alta densidad (LDPE)
- Polipropileno (PP)

De acuerdo con, (Flores Iralda et al., 2020; (Proaño & Crespo, 2009), los polímeros más producidos en las ciudades son los de Alta densidad y baja densidad, y debido a su composición fisicoquímica permiten un desarrollo del proceso de pirólisis a temperaturas altas 400°C, lo cual produce hidrocarburos líquidos o aceites pirolíticos con características similares a gasolina, keroseno, diésel.

Por lo contrario, (Olivera, Musso, De León, et al., 2019) manifiesta que el proceso de transformación de polietileno a través del pirólisis tiene unos rendimientos y velocidades de producción óptima utilizando como materia prima polietileno de baja densidad obteniendo, así

como resultado fracciones líquidas de hidrocarburos con propiedades equivalentes a gasolina del proceso de refinería.

Para las experiencias de (Rojas, 2016) el proceso de producción de plásticos a nivel mundial es cada día más grande y nos enfrentamos a un reto de establecer mecanismos de reincorporación de los mismos en cadenas de producción de acuerdo a sus propiedades y tipos de material; en este caso lo más apropiados para descomposición térmica a través de la pirólisis son los polietilenos de alta densidad que en su resultado de producción producen aceites combustibles que después estar a temperatura ambiente se convierten en ceras y los hidrocarburos de baja densidad generan líquidos aceitosos con propiedades combustibles y estables a variables tipos de temperatura. En este caso el más adecuado para el ejercicio estudiado es el polietileno de baja densidad; sin embargo, en la práctica el poliestireno cumple con un menor punto de fusión y tiene una mayor aptitud para la producción de combustible, pero los residuos que se encuentran en el proyecto de la PLMB no se encuentran totalmente limpios y requieren un proceso adicional de lavado y limpieza que requiere de tiempo y recursos adicionales al proceso.

Las propiedades de los residuos plásticos son fundamentales a la hora de seleccionarlos para procesos de transformación química, ya que la materia prima en estado sólido como es el caso del polietileno de alta densidad a con unas temperaturas de más de 330°C puede llegar a producir combustibles líquidos ligeros siguiendo la reacción de pirólisis (Ramos & Pretell, 2021).

El tener la mejor alternativa para realizar el proceso de pirólisis utilizando los residuos plásticos, permite establecer estrategias de cumplimiento económico, ambiental, social y de mercado para los proyectos urbanos de construcción (Hernán et al., 2018a).

3.1.2. FASE 2 “Realizar un análisis del tipo de pirólisis que se llevará a cabo en la planta (Convencional, rápida o flash) para la valorización de residuos poliméricos en la construcción de la PLMB, con base a la economía circular”

Las condiciones técnicas para la valorización de residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB son similares a los residuos poliméricos en general, pero con algunas consideraciones adicionales. Algunas de las condiciones técnicas para la valorización de residuos poliméricos en la construcción de la PLMB son:

Separación y clasificación: Los residuos poliméricos pueden ser de diferentes tipos y mezclados con otros materiales, por lo que es importante separarlos y clasificarlos adecuadamente. Esto permitirá obtener materiales de mejor calidad y con propiedades más uniformes para el proceso de pirólisis (Ojeda & Mercante, 2021).

Limpieza: Los residuos poliméricos generados en la construcción pueden estar contaminados con otros materiales o sustancias, como tierra, cemento, pinturas, adhesivos, materia orgánica no polimérica, metales, vidrios y otros materiales no combustibles. entre otros. Es necesario limpiarlos para eliminar estas impurezas y mejorar la calidad del material resultante (Ojeda & Mercante, 2021).

Control de la temperatura: la temperatura de pirólisis debe ser controlada cuidadosamente para asegurar que se alcance la temperatura adecuada para cada tipo de residuo polimérico y que no se sobrepasen las temperaturas que puedan generar la liberación de contaminantes (Ecoplas, 2011).

Velocidad de calentamiento: la velocidad de calentamiento es crítica para la eficiencia del proceso, ya que afecta la tasa de descomposición térmica de los residuos poliméricos. En este caso, un calentamiento más rápido puede garantizar la aceleración de la velocidad de la reacción de

pirólisis y un calentamiento más lento puede tener una eficiencia energética óptima, pero puede extender el tiempo de duración del proceso de pirólisis (Daniel et al., 2019).

Tiempo de residencia: el tiempo de residencia, es decir, el tiempo que los residuos poliméricos permanecen en el reactor de pirólisis, también es importante para el proceso, ya que afecta la tasa de descomposición térmica y la calidad de los productos obtenidos (Daniel et al., 2019).

Control de la presión: la presión en el reactor de pirólisis debe ser controlada cuidadosamente para evitar la formación de gases no deseados, como óxidos de nitrógeno o dióxido de carbono (Quezada Lozano, 2021).

Recuperación de productos: Los productos generados en el proceso de pirólisis deben ser recuperados y tratados adecuadamente, como el enfriamiento y la eliminación de impurezas (Mayhua et al., 2022).

Monitoreo y control de emisiones: Durante el proceso de pirólisis, se deben monitorear y controlar las emisiones de gases y compuestos orgánicos volátiles para evitar la liberación de contaminantes peligrosos (Lozano, 2021).

Compatibilidad con otros materiales: Los residuos poliméricos deben ser compatibles con otros materiales con los que se utilizarán, como adhesivos, selladores, entre otros. Esto garantizará que el material tenga las propiedades mecánicas y químicas adecuadas y que sea seguro de utilizar en el proceso de pirólisis (America Rojas, 2016).

Cumplimiento de normas y regulaciones: Es importante garantizar que el proceso de valorización de residuos poliméricos cumpla con las normas y regulaciones establecidas por las autoridades competentes. Esto incluye el manejo, transporte y almacenamiento de residuos (Morillas et al., 2016).

Mercado y viabilidad económica: Es de vital importancia evaluar la viabilidad económica de la valorización de residuos. Se requiere identificar los mercados viables para los productos o materiales generados a partir de los residuos valorizados, así como los costos asociados con el proceso de recolección, clasificación, procesamiento y distribución de los residuos que se pretenden generar a nivel industrial, comercial y/o residencial (Rendón et al., 2018).

Concientización de valorización: Las partes interesadas y los actores deben participar como actores claves para el éxito de la valorización de residuos. La concientización y la educación sobre la importancia de la valorización de residuos, así como la promoción de prácticas sostenibles de gestión de residuos, pueden generar un mayor compromiso y apoyo (Jurado, 2017). En este caso el proyecto de la PLMB debe ser el principal actor a través de la fomentación de estas prácticas educativas.

Ahora bien, con el fin de garantizar condiciones técnicas para la valorización de residuos poliméricos, se establece una matriz de ponderación para determinar la mejor alternativa para la valorización de los residuos generados en la construcción de la PLMB.

Para lograr la valorización de los residuos poliméricos se requieren de condiciones técnicas como:

- Sometimiento a temperaturas para establecer su comportamiento en la evaporación.
- Verificación del octanaje de acuerdo con la temperatura con que se logra la destilación.
- Verificar el tiempo necesario al que debe ser sometido el polímero, para que el combustible sea de mejor calidad.

Todo lo anterior no se realizará mediante pruebas ni experimentos propios, sino que, al contrario, se utilizará bibliografía científica existente considerando que dichos polímeros ya se han sometido a toda suerte de experimentos, por lo que hoy hay abundante material bibliográfico al respecto.

Así mismo, se puede manifestar que el combustible pretendido en este proyecto, según el plástico seleccionado para el proceso, puede ser aceite pirolítico o gas. Por ello, es importante establecer su origen y composición del polietileno a utilizar para el proceso, porque de eso depende su calidad e idoneidad para la combustión.

La valorización energética es un método que toma cada vez más fuerza en el mundo. Hay plásticos como el polietileno y el polipropileno, muy ricos en energía por lo que, sometidos al calor, pueden destilar combustible de gran octanaje. En la industria de la siderurgia (Montoya Rendón et al., 2018), el material sólido resultante del proceso del pirólisis se utiliza como combustible sólido.

En la valorización energética se incluyen otros procesos basados en la descomposición de los polímeros ya sea mediante calor, agentes químicos y/o catalizadores, para obtener productos que pueden ir desde los monómeros iniciales que forman el polímero hasta complejas mezclas de hidrocarburos, y que pueden aplicarse como combustibles (Martín, 2014).

3.1.2.a. Opciones de valorización de residuos plásticos. Además de la pirólisis, existen otras formas de valorización de los residuos plásticos, como, por ejemplo:

- ***Ladrillos y placas prefabricadas***

Esta opción de valorización del plástico, condensado en ladrillos y placas de construcción, se ha convertido en una alternativa viable debido a su bajo costo de producción y efectividad. Ha estado a tal punto idóneo este material que se ha implementado en obras de infraestructura como colegios, casas, bodegas, entre otras. Se ha utilizado en obras del orden público por el ahorro de costos que genera y que es muy eficiente en tanto su durabilidad sortea las afectaciones climáticas, brote de humedad, controla las altas temperaturas, etc.

La producción del material consiste en mezclarlo con elementos comunes utilizados en la construcción, como cemento y arena. Dicho material debe estar completamente limpio para que su interacción con la mezcla sea de calidad y en consecuencia, pueda garantizarse las virtudes del producto (González, 2016).

- ***Madera plástica.***

La madera plástica también ha sido una forma de valorización que ha incurrido fuertemente en el mercado. En todo el territorio se adelantan obras de construcción donde se utiliza este material, por ejemplo, para las estructuras recreacionales de los conjuntos cerrados, parques públicos, bancas, estructuras para obras livianas, etc. Incluso, ha resultado sumamente efectivo como material logístico para operaciones militares. Por su portabilidad y fácil armado y repulsión con la humedad que es apto para campañas geoestratégicas militares donde la versatilidad debe denominar común de dichas estructuras (Ruiz, Ramón, & Domingo, 2020).

Asimismo, son una opción importante para la protección del medio ambiente. Para nadie es un secreto que el plástico es uno de los grandes generadores de contaminación en océanos, fuentes hídricas, ecosistemas boscosos, etc. Por tal razón, con la valorización del plástico en ‘madera’ no solo se apela al uso adecuado de los recursos económicos, sino que también se contribuye en sobremanera a la descontaminación del planeta.

- ***Plástico en hormigón***

Otra opción de valorización es la utilización del plástico en la fabricación de hormigón. De acuerdo con (Sánchez, Oshiro y Positieri, 2014) las pruebas que se han realizado al respecto evidencian un material con óptimas condiciones de resistencia. Las partículas de plástico se mezclan de acuerdo con el tamaño de las partículas; entre más grandes como piedrilla, mayor es su resistencia. Por

ello, de acuerdo con la necesidad de cada proyecto, se dispone de la granulometría requerida. Vale la pena indicar que este tipo de investigaciones hacen referencia a la valorización del plástico que va tomando fuerza en todo el mundo debido a los importantes resultados que ha arrojado el plástico para diversos a partir de su creación.

- ***Producción de combustibles***

Como se ha indicado en precedencia, no sólo la valorización del material plástico se obtiene de forma sólida, también se logra de forma líquida o gaseosa según sea el proceso al que se somete. En ese sentido, el proceso de obtención de combustibles líquidos y gaseosos a partir de residuos plásticos se logra en un primer paso, con el reciclaje de este insumo. Esto permite que la recopilación y almacenamiento del material, extraído de diversas fuentes o recicladoras donde se dispone el material para los menesteres requeridos. Posterior a ello, se hace la clasificación de este material de acuerdo con su calidad y que sea idóneo para la deshidratación y/o producción de combustible. Así mismo, se realiza la respectiva limpieza de manera que no queden partículas contaminantes que alteren la calidad del combustible. Precisamente, de ello depende que el líquido sea propicio para el uso al que se pretende destinar. Una vez sometido el plástico a la máquina, se configura una temperatura posible de deshidratación siendo aparado tal destilación en un recipiente donde se almacena el combustible final (Ramos, Manrique, & Pretell, 2023).

3.1.2.b. Justificación del estudio del proceso de producción de combustible. Como se ha explicado con suficiencia, la pirólisis es un método eficaz para valorizar el plástico mediante el sometimiento al calor que produce un material líquido con características similares al de los gasóleos. Este método de valorización se ha cimentado como una importante opción para la obtención de combustible líquido el cual podría ser funcional para los motores de combustión interna de maquinaria. Debido al bajo costo de la materia prima, pues se obtendría a partir del reciclaje, es una alternativa idónea teniendo en cuenta el alto costo del combustible a base de petróleo.

La obtención de este derivado se hace por lo general, con material de polietileno de alta densidad, poliestireno y polietilentereftalato. Esta materia prima se inserta triturada en una máquina denominada reactor de pirólisis cuya temperatura se logra a través de la energía eléctrica al vacío de manera que no haya combustión (Mancheno y Otros, 2016). El plástico no se quema y este se deshidrata, por eso la obtención del combustible que se hace sin combustión. Dependiendo del material, es el octanaje del líquido y su densidad o pureza. Dicho en palabras de (Díaz, 2022), la pirólisis es “la degradación térmica de macromoléculas en un ambiente ausente de oxígeno con rangos de temperaturas que oscilan de los 400 °C a los 1000 °C produciendo fracciones gaseosas, líquidas y sólidas utilizables. Las fracciones líquidas obtenidas como son metano, el etileno, el propileno o el benceno, se pueden reciclar o utilizar como combustible en la industria petroquímica”.

De la técnica de pirólisis se puede indicar que, según Quiroga, Vildoza, Córdoba, Cruz & Zanoni, la temperatura ideal para la obtención del combustible es de 400 grados pues en menos de esa temperatura no se podría desarrollar a cabalidad el proceso. Es pertinente indicar que ese combustible en estado líquido o gaseoso se usa en maquinaria industrial, lo que significa una importante fuente de energía a un precio menor que el del combustible convencional (Quiroga, Vildoza, Córdoba, Cruz, & Zanoni, 2022).

3.1.2.c. Descripción del proceso de pirólisis. La Pirólisis es un proceso endotérmico que implica la descomposición térmica de la materia orgánica y/o los polímeros que la componen en ausencia de oxígeno o en una cantidad limitada al elevar las temperaturas entre 300 a 800 °C.

Sus subproductos pueden variar en función de parámetros como la presión, los flujos, la carga de materia prima, la velocidad de calentamiento, tamaño de las partículas, tiempo de

exposición, entre otros. Dentro de los subproductos del pirólisis se encuentran: gases condensables, líquidos hidrocarburos y sólido (negro de humo) (López & Martínez, 2022).

Su principio de funcionamiento se explica haciendo uso de la Figura 1 donde la materia prima se inserta en el Reactor Pirolítico

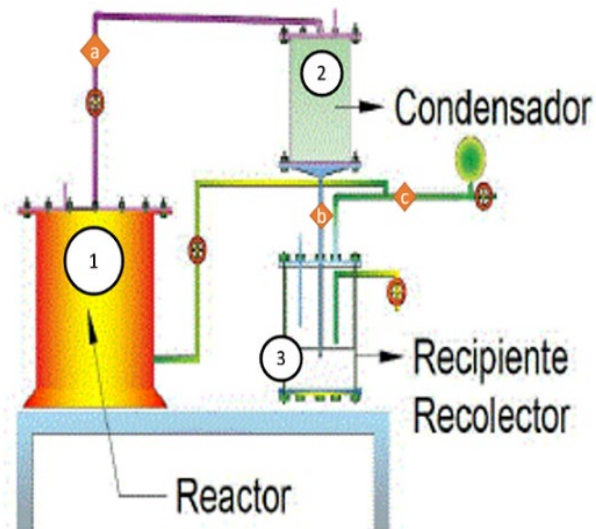
(1), que a medida que incrementa su temperatura hasta el punto de la degradación térmica del material, comienza a liberar sus fracciones por la salida (a), donde fluye la corriente de gas condensado hacia el Condensador

(2), que reduce la temperatura de la corriente de gas de pirólisis y la libera por la salida (b), permitiendo que la fracción que logra condensarse en líquido caiga al recipiente

(3), mientras la fracción de gas liviano continúa su salida hacia una tea (c) o se utiliza como gas para la regeneración del proceso para producir calor en el reactor.

Figura 5.

Modelo básico de un reactor de pirólisis.

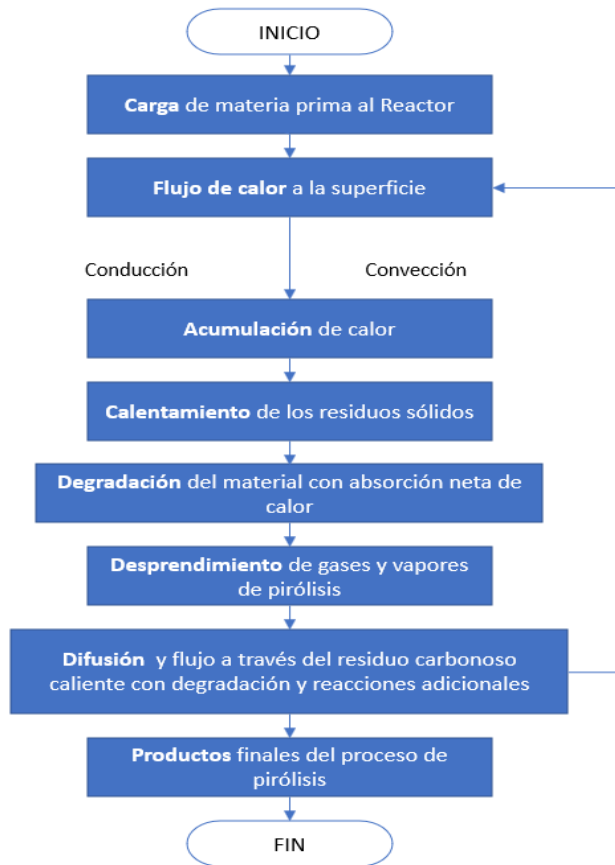


Nota. Diagrama conceptual del proceso de pirólisis. Tomado de: Diseño y construcción de un reactor piloto de pirólisis de neumáticos usados. Lozano, G., Arturo, F., Ávila, R., & Manuel, J. (2016). Análisis cromatográfico de combustibles obtenidos a partir de desechos plásticos (Vol. 2, Issue 1).

Este proceso fisicoquímico ocurre como una etapa previa a la combustión (requiere atmósfera con oxígeno) y la gasificación (requiere mayores temperaturas), dando la posibilidad de obtener productos de usos industriales diferentes y de valor agregado, siguiendo el diagrama de proceso de la siguiente figura:

Figura 6.

Diagrama de procesos de pirólisis.



Nota. Se muestra el Diagrama de proceso de pirólisis. Tomado de: Diseño y construcción de un reactor piloto de pirólisis de neumáticos usados. Lozano, G., Arturo, F., Ávila, R., & Manuel, J. (2016). Análisis cromatográfico de combustibles obtenidos a partir de desechos plásticos (Vol. 2, Issue 1).

Según (López & Martínez, 2022), la forma en la que se realiza el aporte de calor al sistema o básicamente como está diseñado el reactor, divide el pirólisis en dos grandes grupos:

- **Sistemas Alotérmicos (Indirecto).** La transmisión del calor se realiza de forma Indirecta por conducción y radiación de las paredes del reactor, producto de la fuente de energía, que en algunos casos incluye la regeneración del gas producido por el mismo pirólisis para la

radiación. Se hace en ausencia de aire, por lo que el reactor debe tener sus sistemas de válvulas de entrada y salida hermetizadas. Este proceso requiere del uso de intercambiadores de calor para independizar los volátiles y los vapores, mejorando su futura valorización. La máxima temperatura de la pared del reactor debe ser de alrededor de 750°C. El metal del reactor puede sufrir degradación producto de las altas temperaturas y de los gases ácidos disgregados generando estrés en el material (López & Martínez, 2022).

- **Sistemas Autotérmicos (Directo).** La generación de calor se realiza de forma directa o expresada de otra forma mediante la combustión de parte de la carga del mismo reactor. Las reacciones deben realizarse en atmósfera reductora para evitar la combustión descontrolada presentando una mayor eficiencia en la transmisión de calor llegando a temperaturas de funcionamiento de 1250°C, sin embargo, no permite independizar la temperatura de pirólisis a la de la combustión. Los gases de Combustión y del mismo pirólisis se mezclan dentro de la misma unidad.

Pero como punto a favor, a pesar de funcionar a mayores temperaturas se conoce que el reactor de metal no presenta una alta dilatación térmica permitiendo la eliminación de estrés que puede sufrir el material (López & Martínez, 2022).

3.1.2.a.i. Tipos de pirólisis. Según la combinación de las condiciones de operación del equipo, el pirólisis se puede clasificar en tres grandes grupos diferentes: Pirólisis Convencional, Pirólisis Rápida y Pirólisis Flash según se observa su comparación en la siguiente tabla. Entre las condiciones que pueden variar se encuentran: tasa de calentamiento, ambiente de reacción, uso de catalizadores, tiempo de retención, forma de calentamiento (López & Martínez, 2022).

Tabla 3.*Comparación de parámetros de operación de los tipos de pirólisis*

PROCESO	TEMP °C	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO °C/s	TIEMPO RESIDENCIA	PRODUCTO MAYORITARIO
Convencional	500	2	Gases 5s Sólido horas	Char y condensables
Rápida	400 a 800	>2	Gases: < 2 s	A temperaturas moderadas, 500°C, condensables
Instantánea	>600	>200	Gases: < 0,5 s	Gases e hidrocarburos ligeros

Nota. Tabla comparativa entre clasificación de los procesos de pirólisis de acuerdo con sus condiciones de operación. Tomado de: Diseño y construcción de un reactor piloto de pirólisis de neumáticos usados. Lozano, G., Arturo, F., Ávila, R., & Manuel, J. (2016). Análisis cromatográfico de combustibles obtenidos a partir de desechos plásticos (Vol. 2, Issue 1).

De acuerdo con lo anterior, se describen algunas características y cómo afectan la naturaleza de sus subproductos:

- **Pirólisis Convencional:** Implica un proceso de descomposición que favorece la producción de sólido (negro de humo) a temperaturas intermedias-bajas (500°C), debido al largo tiempo de exposición o residencia de los sólidos al calor dentro del reactor, asegurando la homogeneidad de la transformación de manera ordenada, completa y homogénea, además de una alta tasa de condensables, dado el largo tiempo de residencia de la fase de vapor (5 segundos). La velocidad de calentamiento es bastante inferior a los otros procesos, con alrededor de 2 °C/s (Rodríguez López Jairo Andrés & Tunjacipa Martínez Manuel Mauricio, 2022).
- **Pirólisis Rápida:** Su tasa de calentamiento se incrementa a hasta rangos superiores a 2 °C/s y menores a 200°C/s, reduciendo la producción de la fracción sólida y favorece la producción de

condensables (fracción con gas y líquido). Sus temperaturas ocurren en un rango mayor de 400 a 800 °C. El tiempo de residencia de los gases es bajo y favorece la producción de olefinas ligeras, debido a la reducción de la polimerización de las mismas. Requiere de tamaños de grano de neumático de menor tamaño para transmitir de forma ideal el calor (Rodríguez López Jairo Andrés & Tunjacipa Martínez Manuel Mauricio, 2022).

- **Pirólisis Instantánea (Flash):** Utiliza velocidades de calentamiento más rápidas, mayores a 200°C/s, favoreciendo la producción de las fracciones líquidas e hidrocarburos ligeros, debido a la rápida volatilización que ocurre al elevar la temperatura. Sus temperaturas son mayores a 600°C.

El periodo de residencia para los gases es el menor, inferiores a 0,5 segundos (Rodríguez López Jairo Andrés & Tunjacipa Martínez Manuel Mauricio, 2022).

3.1.2.a. Resultado de la matriz de ponderación. Como resultado del ejercicio de aplicación de la Metodología de Matriz de ponderación para la producción de combustible se obtiene el siguiente resultado, el cual puede ser evidenciado en el Anexo 3. Matriz de Ponderación.

Tabla 4.

Resultado Matriz de Ponderación

Criterios	Puntuación ponderada		
	Respuesta Opción A (Polietileno Baja densidad)	Respuesta Opción B (Polietileno Alta Densidad)	Respuesta Opción C (Poliestireno)
Producción de combustible (Poder calorífico)	15	12	9

Criterios	Puntuación ponderada		
	Respuesta Opción A (Polietileno Baja densidad)	Respuesta Opción B (Polietileno Alta Densidad)	Respuesta Opción C (Poliestireno)
<i>¿Qué combustible se produce con los diferentes polímeros y cuál es el poder calorífico del producto final?</i>			
Disponibilidad de residuos para el proceso de fabricación (Cantidades representativas para el proceso de pirólisis)	10	8	8
<i>¿Qué cantidad de polímeros hay disponibles en el proyecto y cuál es su cantidad de disponibilidad en el futuro?</i>			
Rendimiento del proceso - EFICIENCIA	0	0	2
<i>¿Qué cantidad de polímeros (kg) se requiere para producir 1(kg) de combustible?</i>			
Cuál es el polímero que se encuentra con menor dificultad en la construcción de la PLMB	15	9	12

Criterios	Puntuación ponderada		
	Respuesta Opción A (Polietileno Baja densidad)	Respuesta Opción B (Polietileno Alta Densidad)	Respuesta Opción C (Poliestireno)
<i>¿Con cuál de los residuos poliméricos se tiene un menor grado de complejidad para la producción de combustible?</i>			
Tiempos			
<i>¿Qué opción requiere el menor tiempo para su fabricación y/o producción de combustible?</i>	10	6	10
Otros criterios	0	0	0
Puntuación total	50	35	41

Opción(es) seleccionada(s): Opción A

Nota. Después de realizada la matriz de ponderación con los polímeros de la PLMB se establece que la alternativa más viable es la opción A (Polietileno de Baja densidad); siendo así el residuo con las mejores características para la obtención de combustible.

Según el resultado obtenido se puede confirmar que las afirmaciones de (Ojeda & Mercante, 2021), (Jurado, 2017) y (Lozano, 2021), indican que el polietileno de baja densidad cumple con las condiciones ideales para la producción de hidrocarburos; adicional el objeto de estudio de la PLMB cuenta con una generación considerable de estos residuos como es mencionado y descrito en el numeral 3.1.1 de la Fase I de este proyecto de investigación.

El autor (Olivera, Musso, De León, et al., 2019) hace mención de que el uso de polietilenos de baja densidad para el proceso de pirólisis es de mayor velocidad de producción y para ello se

requieren altas temperaturas y un tiempo mínimo para obtener resultados de producción de hidrocarburos.

3.1.3. FASE 3 “Propuesta de valorización de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB”

Una vez obtenido el combustible, producto de la pirólisis, puede utilizarse en motores de combustión interna para los equipos de la PLMB, para su comercialización en otros proyectos. Con la propuesta se busca obtener un combustible de calidad y apto para el uso en las actividades desarrolladas por la PLMB (Maquinaria y equipo), lo que permite una comercialización más amplia, expandida a diferentes sectores del mercado industrial. Así las cosas, se buscará determinar cuál es el residuo más eficiente para la producción de combustible y las cantidades de producción según los residuos poliméricos almacenados en el centro de acopio de la PLMB.

Por supuesto que la propuesta de valorización es la generación de combustible a través de la pirólisis es el método por excelencia que permite la obtención de combustible; método utilizado a lo largo y ancho del mundo. La industria ya ha empezado a darse cuenta de ello, por lo que el futuro del polímero como fuente de energía es un futuro promisorio.

Como es sabido, existen varias formas de valorización como el encapsulamiento, el reciclado químico, la gasificación, la metanólisis, la hidrogenación, etc., pero en este caso, la pirólisis es la técnica que se aplicará en el presente proyecto. Esto se basa en su eficiencia y bajo costo (Montoya, 2017). Además, porque ha tomado gran trascendencia a nivel global no solo por su capacidad de transformarse en combustible líquido sino también, porque es una fuente de energía abundante en el planeta, lo que permite un impacto positivo en la naturaleza al implementarse una economía circular de índole planetaria.

Todo lo anterior no se realizará mediante pruebas ni experimentos propios, sino que, al contrario, se utilizará bibliografía científica existente, considerando que dichos polímeros ya se han sometido a toda suerte de experimentos por lo que hoy hay abundante material bibliográfico al respecto.

¿Qué tipo de residuo sirve más para gasolina y cual para Diesel? De acuerdo con el laboratorio Law Tech (s.f.) El polipropileno es el plástico ideal para la obtención de gasolina. Su composición química lo hace ideal para la producción de este líquido en tanto es un polímero termoplástico obtenido de la polimerización del propileno. Este plástico es común en los elementos domésticos, así como en la industria. Por otro lado, el polietileno es propicio para la producción de combustible Diesel en tanto es el plástico de composición química más simple lo que lo hace muy común en su utilización. Vale la pena indicar que los dos plásticos pueden mezclarse para obtener una variación del combustible.

De acuerdo con (Ramos et al., 2019), en el Perú la industria de la pirólisis ha emprendido un recorrido importante pues el polipropileno, material de uso común en la vida de la sociedad, es el principal plástico utilizado para la pirólisis precisamente, por la calidad de combustible que genera llegando al punto de convertirse en uno de los desechos plásticos potencialmente generadores de combustible de alta calidad. Pese a las impurezas que estos plásticos segregan al momento del proceso en donde se genera el líquido de fácil limpieza dando como resultado un combustible propicio para la combustión. Vale la pena indicar que, no solo es importante este plástico por la calidad de líquido inflamable que genera sino también, porque se encuentra en abundancia debido al uso cotidiano y generalizado dado por la sociedad. En ese sentido, al convertir el polipropileno en fuente de combustible se está contribuyendo a una descontaminación efectiva de los ambientes naturales del planeta.

De hecho, los estudios adelantados sobre la pirólisis en el Perú, han concluido que las mascarillas desechables de polipropileno son una fuente importante de obtención de líquido, no solo por la alta presencia de este material producto de la pandemia sino también, por la idoneidad del material para la obtención de un combustible de calidad. “Uno de los residuos sólidos urbanos con potencial para ser fuente de combustibles líquidos son los residuos de las mascarillas desechables”, advierten los mencionados autores.

Así las cosas, de acuerdo con la convergencia de varios autores, el polipropileno es un material propicio para la obtención de un líquido de calidad. A su vez, permite utilizar uno de los materiales más comunes de la vida social humana lo que contribuiría a la descontaminación importante de los ecosistemas terrestres y marítimos y a la modernización industrial de generación de combustibles amigables con el medio ambiente.

Debido a la gran generación de residuos plásticos en Colombia y a la inadecuada disposición final de los mismos, requiere que se busquen alternativas y/o metodologías que permitan que los impactos ambientales generados por estas malas prácticas, se vean reflejados en procesos que eviten la disposición final de los residuos generados y se implementen técnicas de aprovechamiento y valorización (Daniel et al., 2019).

Para el proyecto de la construcción de la PLMB, se elaborará una propuesta de valorización donde se realicen las siguientes actividades las cuales están enmarcadas en garantizar un cumplimiento, un buen desempeño económico con responsabilidad ambiental y socialmente responsable:

- Adecuación del centro de acopio de los residuos poliméricos de la PLMB, garantizando tipos de residuo tales como: Polietileno de Baja densidad (HDPE), Polietileno de Alta densidad (LDPE): De acuerdo con el inventario de residuos realizado a los subcontratistas de obra de la

PLMB, se establece el área de almacenamiento de residuos poliméricos como centro de acopio principal del proyecto, para lo cual se disponen de cubículos de clasificación de residuos por tipo para garantizar la disponibilidad de la materia prima en la zona de desarrollo del proceso de pirólisis.

- Instalación de planta de producción para el reactor de pirólisis: En la distribución en planta del proyecto, se tiene destinada un área para la instalación de la planta de pirólisis seleccionada (200mts), y con las características más apropiadas para el desarrollo del proceso con los residuos clasificados en la zona de almacenamiento.
- Verificación de la operación del reactor de pirólisis: Se plantea tener un control técnico por parte del equipo del departamento ambiental y de calidad para poder verificar la operación del equipo y de su trabajo en línea de producción.
- Resultados de obtención de combustible con los residuos poliméricos de la PLMB: Se verifica que el producto obtenido con la operación del reactor de pirólisis sea óptimo para el uso dentro de las instalaciones del proceso constructivo de la PLMB. Con el proceso de caracterización fisicoquímica realizado previamente, ya se cuenta con información del tipo de combustible a producir según la materia prima utilizada y almacenada en el acopio principal del proyecto.
- Establecimiento de valor comercial y usos apropiados para el combustible obtenido: Según el estudio de mercado realizado, se puede determinar el valor promedio del combustible producido en el proceso de pirólisis.
- Establecer una propuesta para dar a conocer el proceso de pirólisis a la ciudad y de esta forma generar establecimiento de convenios para la recepción de los residuos en el centro de acopio de la PLMB, e incrementar así el proceso productivo: Con esta estratégica de negocio, se deben implementar procesos de recolección y recepción de residuos poliméricos de diferentes

procesos productivos a nivel industrial y domiciliario en el distrito para el apoyo y crecimiento del proyecto.

3.1.4. FASE 4 “Análisis de costos asociados a la propuesta para la valorización de residuos poliméricos generados en los procesos constructivos de la PLMB, para la producción de combustible”

3.1.4.a. Valor de Combustible en el Mercado. Para efectos de ejecución del presente proyecto es importante establecer el costo de producción de un galón de gasolina convencional en Colombia según la Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME en el mes de septiembre de 2023, es de \$14.372,54. (UMPE, 2023).

3.1.4.b. Costo de Equipos de Producción de Pirólisis en el Mercado. Se verificó en el mercado de plantas de producción de pirólisis distribuidas a nivel mundial, para lo que, según el requerimiento de la generación de residuos en el proyecto, se tuvieron en cuenta las plantas con un promedio de producción de 1TON al día. Según la investigación de mercado a nivel mundial y de acuerdo a la sugerencia de los fabricantes, los equipos o reactores de pirólisis se distribuyen en el mercado desde 1 TON hasta 25TON de capacidad de almacenamiento de insumo o materia prima para el proceso de producción de combustibles; por este motivo y según el inventario de residuos realizado en el estudio, el equipo ideal para operación con los residuos generados por la PLMB es el más pequeño del mercado que cuenta con una capacidad de 1TON/Día.

A continuación, se presentan tres empresas líderes en la fabricación de plantas para el procesamiento de residuos poliméricos a través de pirólisis a nivel mundial (Beston Group co, Henan Doing Company, Lvkun Environmental Company), (Véase Anexo 4: Cotización plantas de pirólisis):

3.1.4.b.i. Planta de procesamiento Pirólisis BESTON GROUP CO. BESTON es una empresa de alta tecnología que abarca investigación científica, producción, servicios, importación y exportación, destaca por su tecnología avanzada en el reciclaje de una amplia variedad de residuos.

Esta tecnología recicla basura urbana, lodos residuales y desechos industriales como residuos de caucho, plásticos, aceites, asfalto, biomasa, entre otros, sin causar contaminación ambiental.

El rango de producción de aceite de pirólisis a partir de 1 tonelada del PP/PE puede alcanzar aproximadamente 600 kg.

El costo de la maquinaria tipo pirólisis para una capacidad entre 500 Kg hasta 1 tonelada por día tiene un valor de USD \$77.800.

3.1.4.b.ii. Planta de procesamiento Pirólisis Henan Doing Company. Henan Doing Maquinaria S.L. es un fabricante líder que se especializa en la máquina de reciclaje de neumáticos/plásticos/cauchos de desecho y planta de bio-Diesel ocupando investigación & desarrollo, diseño, fabricación, instalación y puesta en marcha. Se compone Doing Grupo con otras cuatro empresas que son Henan Doing Maquinaria S.L., Henan Doing Tecnología de Ingeniería de Aceite & Grasa S.L. y Xinxiang Leesyn Instalacion de Maquinaria S.L.

El costo de las máquinas de pirólisis de neumáticos depende de las diferentes configuraciones y varía entre USD20,000 a USD700,000.

Según información suministrada por la empresa DOING, el costo de una planta para una capacidad de 1 tonelada se encuentra en U\$50.000.

3.1.4.b.iii.Planta de procesamiento Pirolysis Lvkun Environmental Company. El negocio principal de Lvkun Environmental Protection Technology Co., Ltd. es la investigación y el desarrollo, la producción, las ventas, el servicio y el comercio de importación y exportación de equipos de pirólisis de plástico para llantas de desecho, equipos de eliminación de lodos de desecho, equipos de destilación de aceite lubricante de desecho y pirólisis de desechos domésticos.

Comparación características técnicas planta de pirólisis según la verificación del mercado

Para elegir el proveedor adecuado se considerarán 14 criterios establecidos en la tabla de ponderación que se muestra a continuación:

Tabla 5.

Tabla comparativa de Pirólisis del mercado

EMPRESA	BESTON		DOING		LVKUN COMPANY		Observaciones
Modelo	BLJ-3		DY-1-6		LKP-3		
Capacidad	1T/día	3	1 T/día	3	1 T/día	3	Todos los proveedores cuentan con la misma capacidad de producción diaria.
Porcentaje combustible	60%-70% 0.6T – 0.7T	3	45%-55% 0.4T - 0.5T	1	45%-55% 0.4 T-0,5 T	2	Beston, mantiene el mejor porcentaje de combustible
Método de trabajo	discontinuo	3	discontinuo	3	Discontinuo	3	Todas las empresas tienen el método de trabajo discontinuo
Materias primas	Residuos de plásticos, Neumáticos/Llantas, Caucho, Lodos de Aceite.	3	Los residuos de neumáticos / plástico / caucho	1	Residuos de plásticos, Neumáticos/Llantas, Caucho.	2	Beston tiene una mayor capacidad de recibir varias materias primas.
Negro carbón	30%	1	30% - 35%	3	30%-35%	3	La empresa LVKUN y DOING tiene mayor porcentaje de generación de carbón que se puede aprovechar.
Tamaño del Reactor Diámetro y largo	D1.4m*L5m	1	D 2.2m*L6m	2	D1.2m*L3m	3	La empresa LVKUN tiene un cilindro menor, para lo que requiere menor área en la planta de procesamiento.
Materiales de Calefacción	Fuel Oil, Gas Natural, GLP, etc.	1	Fuel Oil, Gas Natural, GLP, etc.	2	Gas natural/petróleo/madera/carbón/ GLP, etc.	3	La empresa LVKUN tiene más variedad de uso de combustible en el mercado.
Potencia total (KW)	16.65Kw/h	2	19 KW/h	1	15 kW/h	3	La empresa LVKUN consume menos energía en su reactor.
Peso	18T	1	17T	2	16 T	3	El reactor de La empresa LVKUN, tiene un peso

EMPRESA	BESTON	DOING	LVKUN COMPANY	Observaciones			
				inferior lo que permite que no genere inestabilidad al suelo.			
Método de Enfriamiento	Refrigeración por Agua	3	Refrigeración por Agua	3	Refrigeración por Agua	3	Todos los tres cuentan con un sistema de refrigeración por agua, es una característica de estos reactores.
Ruido Db	≤85	2	≤85	2	≤85	2	Los tres cuentan con el mismo nivel de Db, lo cual es nocivo para los trabajadores en un tiempo prolongado de exposición.
Vida de servicio	8 años	3	6 años	2	6 años	2	Beston, tiene una mayor vida de servicio, por lo tanto, tiene una mayor utilidad según el fabricante.
Mano de obra requerida	Dos trabajadores para operar la alimentación y descarga de escoria por turno.	2	Dos trabajadores para operar la alimentación y descarga de escoria por turno.	2	Dos trabajadores para operar la alimentación y descarga de escoria por turno.	2	Todas las plantas requieren dos operarios, lo ideal sería que fuera automatizada, para minimizar el riesgo de exposición al trabajador.
Precio	US\$78.000	1	US\$30.200	3	US\$36.000	2	El precio más bajo del mercado de los tres proveedores, se encuentra la empresa DOING, siendo así las más viable económicamente.
TOTAL, PONDERA DO		29		30		36	

Nota. Después de realizada la matriz comparativa, en su proceso de ponderación con los proveedores de plantas de pirólisis en el mercado, siendo así la planta de LVKUN COMPANY, la cual cuenta con las mejores características para la obtención de combustible según el resultado ponderado. (Véase anexo 4 Cotizaciones reactor pirólisis).

La alternativa más adecuada para la producción de combustible a través de la pirólisis es aquella que presenta el equilibrio óptimo entre factores como el rendimiento de conversión de materias primas en combustible, la eficiencia energética, el costo de inversión, la vida útil del equipo y el cumplimiento de normativas y estándares ambientales. Esta alternativa debe ser económicamente viable, respetuosa con el medio ambiente y adecuada para satisfacer las necesidades de producción específicas del proyecto.

Tras comparar las características ofrecidas por los tres proveedores, se concluyó que la mejor opción para nuestro proyecto es la planta suministrada por el proveedor LVKUN. A pesar de que su precio es más elevado en comparación con la empresa DOING, existen varias razones que respaldan esta elección:

- La empresa LVKUN cuenta con un porcentaje mayor o igual de generación de carbón aprovechable.
- La planta de la empresa LVKUN tiene un cilindro de dimensiones más reducidas, lo que requiere menos espacio en la planta de procesamiento.
- La empresa LVKUN ofrece una mayor variedad de opciones de combustible en el mercado.
- La planta de la empresa LVKUN consume menos energía en su reactor.
- El reactor de la empresa LVKUN tiene un peso inferior, lo que evita posibles problemas de inestabilidad en el suelo.

Cabe destacar que la cantidad de combustible producido no es fijo y depende de factores, como la densidad y tamaño de las partículas de las materias primas, así como la temperatura, la duración y la habilidad del personal operativo en el proceso de pirólisis; por ello y de acuerdo a los

requerimientos del fabricante, el equipo opera con 1Ton de materia prima como capacidad máxima.

3.1.4.a.Costo del Proceso de Pirólisis con la Máquina Seleccionada. Teniendo en cuenta la planta seleccionada de la empresa LVKUN se realiza una descripción de los siguientes costos de producción de la planta para 1 Tonelada:

Tabla 6.

Costo del proceso de pirólisis con el reactor LVKUN

Costos					
Ítems	Unidad	Consumo	Precio Unitario	Precio Total	Observaciones
Materia Prima	Plásticos recolectados	1T/Día	\$0	\$0	No tiene precio, ya que estos residuos se encuentran almacenados en el acopio principal de la PLMB.
Combustible	Gas Natural	200M ³ /Día	\$2.496,55/M ³	\$499.310 / Día	El gas propano es suministrado por proveedores externos.
Electricidad	15 KW/h	8 horas	\$981,381 /KWH	\$117.765 / Día	El valor corresponde al consumo diario de operación de 8 horas del equipo
Mano de Obra	2 personas	1 día	\$53.300/Persona/Día	\$106.666 / Día	El valor corresponde al precio del mercado a precio de un trabajador de \$1.600.000 mensual.
TOTAL, COSTOS				\$723.741 / Día	

Aceite de pirólisis	45%	0.45T/Día 450kg/Día 692,30lts/Día 182,88 gal/Día	\$14.372,54	\$2'628.450 /Día	\$ Producción de combustible diario
---------------------	-----	---	-------------	------------------	-------------------------------------

Nota. Se describe en la figura anterior los costos de producción del reactor de pirólisis LVKUN el cual fue seleccionado como la alternativa más viable para la valorización de los residuos poliméricos de la PLMB debido a sus características de operación y producción de combustible.

3.1.4.b. Costo de Producción con los Residuos Generados por la PLMB. Basándonos en Tabla 1 donde se encuentra el Inventario de residuos generados por la PLMB, inicialmente se registra un inventario anual de 1.592,78 kg de residuos de (PE) polietileno de alta y baja densidad y (PP) polipropileno para el periodo enero de 2022 a febrero de 2023.

Para calcular el aumento en la generación de residuos plásticos, comenzamos con los datos de los 9 contratistas inicialmente considerados como muestra. En vista del avance de la construcción de la primera línea del metro, realizamos una proyección de 250 contratistas y 10000 trabajadores en la generación de residuos cada año durante 5 años.

Tabla 7.

Inventario de residuos poliméricos y proyecciones del proyecto

Inventario residuos poliméricos del proyecto PLMB					
Residuos Poliméricos en el Proyecto PLMB		Cantidades Actuales / Cantidades Proyectadas de Material			
Tipo	Usos y/o Residuos generados en el Proyecto	Cantidades generadas actuales en Kg. (enero 2022 a marzo 2023) 4 frentes de Trabajo; 1200 trabajadores promedio de 36 Contratistas)	Cantidades de generación proyectadas en Kg. (5 Años de construcción por 8 frentes de trabajo; 10000 trabajadores promedio de 250 contratistas)	Proyección promedio mensual en Kg. (Etapa de Construcción)	Proyección promedio diario en Kg. (Etapa de Construcción)
PET o PETE (Tereftalato de Polietileno)	Botellas de Bebidas y Agua consumo diario Envases de Productos químicos utilizados en los procesos constructivos Envases de medicamentos encontrados en procesos de descapote, limpieza y excavación	521,2	16740	279	13,95

Inventario residuos poliméricos del proyecto PLMB

Residuos Poliméricos en el Proyecto PLMB		Cantidades Actuales / Cantidades Proyectadas de Material			
Tipo	Usos y/o Residuos generados en el Proyecto	Cantidades generadas actuales en Kg. (enero 2022 a marzo 2023) 4 frentes de Trabajo; 1200 trabajadores promedio de 36 Contratistas)	Cantidades de generación proyectadas en Kg. (5 Años de construcción por 8 frentes de trabajo; 10000 trabajadores promedio de 250 contratistas)	Proyección promedio mensual en Kg. (Etapa de Construcción)	Proyección promedio diario en Kg. (Etapa de Construcción)
HDPE o PEAD (Polietileno de Alta Densidad)	Envases de Productos químicos utilizados en los procesos constructivos Envases para alimentos Envases de productos de aseo Señalizadores tubulares Barreras de señalización Canecas de Señalización Cadena de señalización Residuos de Elementos de protección Personal como cascos de seguridad	654,78	18480	308	15,4
PVC o V (Cloruro de polivinilo)	Residuos de Juguetes, zapatos, cables extraídos en procesos de descapote, limpieza y excavación Tuberías para conducción de redes húmedas y secas Residuos de Elementos de Protección Personal Conos de Señalización	65	5520	92	4,6
LDPE o PEBD (Polietileno de Baja Densidad)	Bolsas para envolturas de materiales, equipos, alimentos y otros. Elementos desechables como vasos, platos y cubiertos Cinta de señalización Plástico Negro para cubrimiento de materiales	824	29160	486	24,3

Inventario residuos poliméricos del proyecto PLMB

Residuos Poliméricos en el Proyecto PLMB		Cantidades Actuales / Cantidades Proyectadas de Material			
Tipo	Usos y/o Residuos generados en el Proyecto	Cantidades generadas actuales en Kg. (enero 2022 a marzo 2023) 4 frentes de Trabajo; 1200 trabajadores promedio de 36 Contratistas)	Cantidades de generación proyectadas en Kg. (5 Años de construcción por 8 frentes de trabajo; 10000 trabajadores promedio de 250 contratistas)	Proyección promedio mensual en Kg. (Etapa de Construcción)	Proyección promedio diario en Kg. (Etapa de Construcción)
PP (Polipropileno)	Señalización Tubos, mallas Recipientes para comidas y bebidas Envases, jeringas u otros encontrados en procesos de descapote, limpieza y excavación	114	3240	54	2,7

Nota. Esta tabla muestra los tipos de residuos poliméricos, los tipos de residuos poliméricos y cantidades y cantidades generadas en el proyecto generadas en el proyecto PLMB. Tomado de Metro Línea 1; Frentes de Trabajo y operaciones relacionadas que se llevan a cabo en el sitio de construcción, para la Construcción de la Primera línea del Metro de Bogotá (Se tendrán 8 frentes de trabajo a lo largo de los 23.9 Km de proyecto).

Para la operación del reactor LVKUN, se tienen en cuenta los siguientes residuos proyectados en la tabla anterior de generación diaria:

- HDPE o PEAD (Polietileno de Alta Densidad) = 15,4kg
- LDPE o PEBD (Polietileno de Baja Densidad) = 24,3kg
- PP (Polipropileno) = 2,7kg

Para un total de = 42,4kg/Día

En el proceso de producción de combustible con la alternativa seleccionada del proveedor LVKUN se tendrían unos costos de producción que se pueden evidenciar en la siguiente tabla:

Tabla 8.

Costo de proceso de producción de planta de pirólisis LVKUN.

Costos					
Ítems	Unidad	Consumo	Precio Unitario	Precio Total	Observaciones
Materia Prima	Plásticos recolectados	0,046Ton/Día 42,4kg/Día	\$0	\$0	No tiene precio, ya que estos residuos se encuentran almacenados en el acopio principal de la PLMB.
Combustible	Gas Natural	9,2M ³ /Día	\$2.496,55/M ³	\$22.968,26 / Día	El gas propano es suministrado por proveedores externos.
Electricidad	15 KW/h	0,368 horas (22,08 minutos)	\$981,381 /KWH	\$361,14 / Día	El valor corresponde al consumo diario de operación de trabajo del equipo. (Producción)
Mano de Obra	2 personas	1 día	\$53.300/Persona/Día	\$106.666 / Día	El valor corresponde al precio del mercado a precio de un trabajador de \$1.600.000 mensual.
TOTAL, COSTOS				\$129.995 / Día	
Aceite de pirólisis	45%	0,046T/Día 42,4 kg/Día 65,23 lats/Día 17,23 gal/Día	\$14.372,54	\$247.638 /Día	\$ Producción de combustible diario

Nota. Se realiza el cálculo del proceso de producción con los residuos promedio generados en la construcción de la PLMB. Esta información está basada en la proyección de residuos a generar en 5 Años de construcción por 8 frentes de trabajo; 10000 trabajadores promedio de 250 contratistas. Los residuos poliméricos tales como PVC y PET que se tuvieron en cuenta en el inventario de residuos de la PLMB tendrán una disposición final a través de gestores de residuos o gremios recicladores quienes realizaran su proceso de reincorporación a cadenas productivas de otro tipo,

esto teniendo en cuenta que estos residuos no son aptos para la producción de combustible a través de la pirólisis.

3.1.4.c. Evaluación de Alternativas de Inversión del Proyecto (Costos de Inversión y Costos de Operación). Para determinar las alternativas de inversión de este proyecto, se considerarán diversos parámetros clave, incluyendo el costo del terreno, el valor de la maquinaria y los gastos relacionados con las construcciones y edificaciones.

Esta información económica es esencial para introducir los valores de las variables de entrada necesarias para un análisis financiero preciso del proyecto.

El análisis de indicadores de bondad financiera se llevó a cabo mediante la evaluación de los datos económicos recopilados. El objetivo fue identificar, valorar y comparar los costos asociados a la producción de combustibles a partir de los residuos poliméricos generados en la construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá.

3.1.4.c.i. Costos de Inversión. A continuación, se muestran los costos de inversión del proyecto:

- Distribución de la planta (Terreno)

La planta de producción estará organizada en cuatro zonas específicas, que abarcarán todo el terreno establecido para la distribución de las áreas de trabajo. Estas áreas se dividirán de la siguiente manera: una zona administrativa, una zona destinada a las materias primas, otra para la producción y finalmente, una zona de almacenamiento para los productos terminados. Cada zona tendrá 200 metros cuadrados, sumando 800 metros cuadrados en total para la distribución en Planta.

La planta estará en Bosa, en el predio el Corzo. El terreno pertenece a la concesión de la PLMB, por tal motivo no aplica este rubro económico en los costos fijos.

- Construcciones y edificaciones

Según el catálogo del presupuesto para tipologías constructivas del IGAC, el costo de las construcciones y edificaciones se calculó considerando un valor de COP\$1.200.000 por metro cuadrado (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018).

También se considerarán las depreciaciones, tanto de las construcciones y edificaciones, aplicando una tasa de depreciación de la infraestructura anual del 2,22%, según lo establecido en el artículo 137 del Estatuto Tributario y una vida útil a 50 años. En cuanto a la maquinaria y los equipos, se aplicó una tasa de depreciación del 10% con una vida útil estimada de 8 años, si se cumple con los mantenimientos establecidos por el fabricante.

- Planta de pirólisis LVKUN

Henan Lvkun Environmental Protection Technology Co., Ltd., elabora principales Equipos de pirólisis de residuos (plásticos para neumáticos o barro, etc.) y equipos de destilación de petróleo, con una experiencia de 16 años, con una cobertura en el mercado del 20% en Asia, 20% Sur Asia, 18% en Europa, 15% en África, 8% en América latina. Según información de la empresa Lvkun, el valor de compra de una planta de pirolisis para una capacidad de 1 Tonelada es de U\$ 36.000.

De acuerdo con las especificaciones técnicas proporcionadas por el proveedor seleccionado (LVKUN ENVIRONMENTAL), El proceso en la planta de pirólisis se divide en varias etapas, cada una con su respectivo tiempo requerido:

1. Alimentación: Esta fase toma 1 hora.
2. Precalentamiento: Se necesitan 2 horas para alcanzar la temperatura adecuada.
3. Producción: Esta etapa se desarrolla en 3 horas, teniendo en cuenta la capacidad total del lote (1 Ton).

4. Enfriamiento: Se requieren 1.30 horas para enfriar las piezas a temperaturas de 100 -120 grados.

5. Descarga: La fase de descarga se completa en 30 minutos.

Según lo anterior, el proceso completo toma 8 horas para terminar un lote. Es importante destacar que, durante la fase de descarga, no es necesario abrir ninguna compuerta de la línea de trabajo. Contamos con un sistema automático de descarga de tornillo en carbono que no solo previene la contaminación de las cenizas volantes, sino que también mejora la seguridad de los trabajadores y contribuye a la protección del medio ambiente.

- Trituradora de plásticos

Para alimentar el reactor de pirólisis, se requiere un equipo de trituración del material polimérico almacenado en el centro de acopio. La selección del equipo se realiza a través del estudio de mercado internacional de venta de equipos de este tipo y que cumpla con la necesidad de triturar los residuos antes del proceso de alimentación del reactor. (Véase Anexo 5 Cotización equipos de trituración).

Tabla 9.

Costos de inversión para planta de pirólisis

Ítem	Tipo Activo	Cant	Precio (\$)	Valor total (\$)	Vida útil (años)	Depreciación (\$)	Fuente
Construcciones y Edificaciones	Inmueble	1 und	\$500.000.000	\$500.000.000	50	\$10.000.000	(Instituto Geographic Agustín Codazzi, 2018)
Planta de pirólisis LVKUN	Máquina y equipos	1 und	\$144.000.000	\$144.000.000	8	\$18.000.000	Cotización LVKUN
Trituradora de plásticos	Máquinas y equipos	1 und	\$30.000.000	\$30.000.000	5	\$6.000.000	Cotización TRITURADO RA PAC

TOTAL	\$674.000.000	\$34.000.000
--------------	---------------	--------------

Nota. Se refiere a la información de costos fijos, construcción de la bodega de instalación del reactor de pirólisis y equipo triturador de plásticos.

Tras los cálculos necesarios, se determina que los costos de inversión inicial suman un total de COP\$674.000.000; no se considera el valor del terreno, ya que están bajo concesión con el distrito en el contrato de construcción de la PLMB.

3.1.4.c.ii. Costos de Operación. A continuación, se presentan los costos de operación de proyecto:

- **Costos de insumos**

Para estimar los costos del proceso de producción de biocombustibles a partir de los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB, resulta esencial tener información sobre el costo de la materia prima, así como los costos relacionados con la energía y la mano de obra requeridas para llevar a cabo el proceso.

Tabla 10.

Costos de Insumos del reactor de pirólisis

Ítem	Cant	Precio (\$)	Valor total (\$)	Valor total (\$) mes	Fuente
Agua	1 M ³	\$4.511,39	\$4.511,39 /Día	\$90.227,8	https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/atencion-al-usuario/tarifas/tarifas2023
Combustible (Gas Natural)	9,2 M ³ /día	\$2.496,55/ M ³	\$22.968,26 / Día	\$459.365,2	Cotización LVKUN y los residuos poliméricos proyectados en el desarrollo del proyecto.
Residuos plásticos de la PLMB	42,4k g/Día	\$0	\$0	\$0	Se tiene en cuenta que los residuos generados en la PLMB se almacenan en el centro de acopio del proyecto. Se establece un valor de cero pesos (\$0,00) a los residuos poliméricos generados en la construcción de la primera línea del metro de Bogotá. El precio se establece porque los residuos

Ítem	Cant	Precio (\$)	Valor total (\$)	Valor total (\$) mes	Fuente
poliméricos se entregan gratis antes de su procesamiento en el lugar de disposición final.					
TOTAL			\$549.590		

Nota. Se describen los costos asociados a la operación del reactor de pirólisis seleccionados del análisis de mercado mundial, junto con sus características diarias según la cantidad de residuos plásticos generados en la PLMB.

- **Costos energéticos**

Para analizar los costos energéticos del sistema de producción de biocombustibles a partir de residuos poliméricos generados en la construcción de la primera línea del metro de Bogotá, se consideraron los consumos de energía eléctrica del molino de trituración y la planta de pirolisis.

Se considerarán las tarifas de energía eléctrica en (\$/kWh), que fueron proporcionadas por Enel-Codensa en el mes de septiembre de 2023. Estas tarifas representan la información más actualizada disponible hasta la fecha.

Tabla 11.

Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh).

Modalidad (Todo consumo)	Propiedad de Codensa (\$/kWh)	Propiedad del Cliente (\$/kWh)
E1	817.8182	762.3665
E2	817.8182	762.3665
E3	817.8182	762.3665
E4	817.8182	762.3665

E5, E6, Industrial y Comercial	981.3818	914.8398
Exenta de contribución	817.8182	762.3665

Nota. Las tarifas de energía eléctrica de la empresa Enel-Codensa para el mes de septiembre del año 2023. Tomado de: Enel Codensa, “Tarifas de energía”. Grupo Enel Colombia, (2023).

Para este proyecto, se utilizó el valor correspondiente a las tarifas no residenciales, es decir, las categorías Industrial y Comercial. Se supuso que el sistema eléctrico es propiedad de Codensa, y, por lo tanto, se aplicó una tarifa de COP\$981,3818

Para calcular el consumo de energía de la planta de pirolisis LVKUN COMPANY y determinar su costo correspondiente, se basó en la información proporcionada por los fabricantes y las fichas técnicas que se presentan en el documento.

De acuerdo con estos datos, se descubrió que la planta consume 15 kWh por tonelada y el molino de trituración 3,7 kWh. La tabla de costos energéticos mensuales proporciona un desglose de los gastos mensuales de energía relacionados con el funcionamiento de la planta.

Tabla 12.

Costos energéticos mensuales

Equipo	Consumo energético (kWh)	Costo energético hora. (\$981,3818)	Costo energético (3,5208) (\$/diario)	Costo mensual de funcionamiento (\$/mes)
Planta LVKUN	15	\$14.720	\$51.826,176	\$1.036.523
Trituradora de plásticos	3,7	\$3.631	\$12.784,42	\$255.688,42
TOTAL				\$1.292.211,43

Nota. El costo energético es tomado con base al valor a la tarifa de Codensa, para una categoría industrial y comercial; y el tiempo de operación de la planta de pirolisis, (1 hora de alimentación, 2 horas de precalentamiento y 22,08 minutos de producción y 30 minutos enfriamiento), y con una operación de 20 días de la planta de pirolisis.

Según la información de la tabla anterior, se puede concluir que los costos energéticos mensuales para producir combustibles mediante el proceso de pirólisis utilizando como materia prima los residuos sólidos poliméricos de la PLMB corresponden a COP\$1.292.211,43.

- **Mano de obra**

Los costos de mano de obra se refieren a los pagos efectuados por la empresa para remunerar a todos sus empleados. En el contexto de este caso, estos costos se derivan del cálculo de la cantidad de empleados necesarios para operar los equipos involucrados en el proceso de producción de combustible.

La jornada laboral consiste en un único turno diurno de 8 horas al día, suma 48 horas semanales por empleado.

Tabla 13.

Costos mano de obra

Equipo	Trabajadores	Costo SMMLV	Costo Mano de obra (\$/mes)	Observaciones
Planta LVKUN	2	\$1'160.000=	\$2.320.000=	Según el fabricante, se requieren 2 operarios para el funcionamiento del reactor
Trituradora de plásticos	1	\$1'160.000=	\$1'160.000=	Según el fabricante, se requiere 1 operario para el funcionamiento del equipo
TOTAL			\$3.480.000	

Nota. El costo de la mano de obra a utilizar se basa en el salario mínimo legal vigente para el año 2023, establecido por el gobierno nacional colombiano.

Con respecto a la información presentada en la tabla anterior, se tiene que el costo de mano de obra para la planta de producción y la operación del reactor de pirólisis es de COP\$3.480.000=.

3.1.4.d. Costos de Inversión y Costos de Operación. De acuerdo con la información presentada en los anteriores numerales, se tiene que el costo de inversión del proyecto es el siguiente:

Tabla 14.

Costos de inversión y costos de operación

Etapa - Costo	Equipo	Costo
INVERSION	Construcciones y Edificaciones	\$500.000.000=
	Planta de pirolisis LVKUN	\$144.000.000=
	Trituradora de plásticos	\$30.000.000=
OPERACION	Agua	\$90.227,8=
	Combustible	\$459.365,2=
	Energía Planta LVKUN	\$1.036.523=
	Energía Trituradora de plásticos	\$255.688,42=
	Operario Planta LVKUN	\$2.320.000=
	Operario Trituradora de plásticos	\$1'160.000=
TOTAL		\$679'321.804,42=

Nota. El valor de los costos de inversión y costos de operación es la sumatoria de la información recolectada de descripción de operación de equipos e insumos necesarios para la operación de la planta de producción.

3.1.4.e. Ingresos Económicos. El proceso de producción de la planta de pirólisis tiene un ingreso diario según lo calculado en la figura 9, esta información se encuentra basada en la proyección de residuos a generar en 5 Años de construcción por 8 frentes de trabajo; 10000 trabajadores promedio de 250 contratistas.

Tabla 15.

Ingresos económicos

Producto	Costo	Costo Mensual	Costo anual
Aceite de pirólisis	\$247.638 /Día	\$6'190.950 /mes	\$74'291.400 /año
TOTAL			\$74'291.400=

Nota. El valor de los ingresos económicos corresponde al valor de la producción de la planta de pirólisis con respecto a los residuos almacenados de la PLMB.

3.1.4.f. Análisis de Indicadores de Bondad Financiera. Para el retorno de la inversión inicial se realiza el cálculo promedio anual, según los residuos generados por la PLMB y que se utilizarán

en el reactor de pirólisis, este cálculo se realiza considerando el porcentaje de incremento operacional de un 30% y un porcentaje de costos de operación con flujos que se traen a valor presente teniendo en cuenta que la inflación es = 10%, el DTF = 8% y la rentabilidad mínima es = 15% para un total de = 33%.

Tabla 16.

Flujo de Caja

AÑO	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Operacionales		\$74'291.400	\$96'578.820	\$125'552.466	\$163'218.205,8	\$212'183.667,5
EGRESOS						
Costos de operación		\$63'861.653.04	\$84'935.998.54	\$112'964.878,1	\$150'243.278,8	\$199'823.572,8
Inversión	\$674.000.000					
FLUJO NETO	\$674.000.000	\$10'429.746,96	\$11'642.821,5	\$12'587.587,9	\$12'974.918	\$12'360.094,7
ACUMULADO		\$10'429.746,96	\$22'072.568,42	\$34'660.156,35	\$47'635.074,33	\$59'995.169,07

Nota. El valor de los ingresos anuales de la planta de pirólisis corresponde a la operación del reactor y cada año va incrementando su valor de acuerdo con el porcentaje de incremento operacional del 30% y el porcentaje de costos de operación correspondiente a la rentabilidad mínima, DTF e inflación = 33%, estos tres elementos sumados configuran la tasa de interés de oportunidad, esta tasa será la que se usa para evaluar el proyecto y de esta forma se estará castigando teniendo en cuenta la inflación, el DTS para evaluar el contexto económico.

Se realiza el cálculo del VPN valor presente neto con la siguiente formula, para poderlo traer al valor presente en el año 0 descontando la tasa del 12% anual:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{(F E t)}{(1+k)^t} - F E 0$$

$$VPN = \sum \frac{(F E t)}{(1+k)^t} - F E 0 + \sum_{t=1}^n \frac{(F E t)}{(1+k)^t} - F E 0$$

Nota: Tomado de Montenegro Robles, R. A. (Ed.). (2023). Matemáticas financieras: aplicaciones en ingeniería, administración y economía. Publicaciones Universidad de América. Roberto Montenegro. 2023.

$$\text{VPN} = - \$628'902.314,30 =$$

Luego se calcula la **TIR** Tasa interna de retorno con la siguiente formula:

$$\text{VPN} = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + \text{TIR})^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + \text{TIR})} + \frac{F_2}{(1 + \text{TIR})^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + \text{TIR})^n} = 0$$

Nota: Tomado de Montenegro Robles, R. A. (Ed.). (2023). Matemáticas financieras: aplicaciones en ingeniería, administración y economía. Publicaciones Universidad de América. Roberto Montenegro. 2023.

$$\text{TIR} = - 48\%$$

Debido al Valor presente neto **VPN** de la producción del reactor de pirólisis, se puede evidenciar que tiene un valor negativo y que la tasa de retorno de la inversión de la ejecución y puesta en marcha del proyecto es del **-20 %** (*Véase Anexo 6 – VPN, TIR – 5 años*), en este caso financieramente el proyecto no es viable; por lo tanto, es necesario presentar esta propuesta a los proyectos urbanos desarrollados en el Distrito Capital y que hacen parte del crecimiento urbanístico del distrito (Instituto de Desarrollo Urbano IDU, Instituto de Recreación y deporte IDRD, Unidad de Mantenimiento Vial UMV y alcaldías locales), de esta forma la propuesta de valorización recolectaría residuos poliméricos adicionales lo cual incrementaría la capacidad del centro de acopio y de esta forma el proceso de producción del reactor pirolítico.

Adicional, como fortalecimiento adicional a la estrategia de negocio, se plantea tener un acercamiento a la ciudadanía en general, al comercio y al gremio industrial para poder almacenar en el centro de acopio la mayor cantidad de residuos poliméricos de todas sus actividades para incrementar el volumen de provisión de residuos en la PLMB y de esta manera aumentar la materia prima para la realización del proceso de pirólisis en el reactor LVKUN.

Con esta estrategia se pretende recolectar alrededor de 20 toneladas de residuos poliméricos mensuales, lo que nos permite tener unos rendimientos de producción de aproximadamente un 40%, y de esta forma tener una tasa de retorno de la inversión para que aproximadamente en el 11vo año de operación se pueda recuperar la inversión inicial del proyecto con los siguientes resultados (*Véase Anexo 6 – VPN, TIR – 11 años*):

$$\text{VPN} = \$629'252.064,79 =$$

$$\text{TIR} = 19\%$$

La estrategia para dar cumplimiento a la recolección de residuos plásticos de las obras civiles de los proyectos desarrollados en la ciudad de Bogotá se basa en la revisión bibliográfica de generación de residuos sólidos en la ciudad de Bogotá, donde diariamente se generan 7500 Toneladas de residuos y se reciclan aproximadamente el 15% de ellos (Carolina & Osorio, 2020), adicionalmente la generación de residuos plásticos de la obras de construcción en la ciudad es de 20653 Toneladas al año que representan 1721 Toneladas al mes (Porrás Chavez et al., 2014), para lo cual el reto del proyecto es poder tener aproximadamente 20 Toneladas de estos proyectos para poder realizar la óptima operación del reactor de pirólisis instalado en la PLMB.

Para financiar el proyecto, Propuesta de Valorización de los Residuos Poliméricos Generados en la Construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá con Enfoque en la Economía Circular, se pueden explorar diversas fuentes de financiamiento y modelos de negocio. Aquí hay algunas opciones:

Subvenciones y fondos gubernamentales: El gobierno de Bogotá, entidades gubernamentales nacionales o internacionales y organizaciones relacionadas con la sostenibilidad y el medio ambiente pueden ofrecer ayudas económicas y fondos específicos para proyectos que promuevan la economía circular y la gestión sostenible de residuos (Hernán et al., 2018b).

Inversión privada: Empresas privadas interesadas en la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social corporativa pueden invertir en el proyecto a cambio de participación en los beneficios o como parte de su estrategia de mitigación de impacto ambiental (Hernán et al., 2018b).

Alianzas público-privadas (APP): La colaboración entre el sector público y el privado puede ser clave para financiar proyectos de esta naturaleza. Mediante acuerdos de asociación, se pueden compartir costos, recursos y riesgos entre ambas partes (Hernán et al., 2018b).

Financiamiento por impacto: Inversionistas y fondos especializados en financiamiento por impacto podrían estar interesados en apoyar proyectos que generen beneficios sociales y ambientales medibles, como la reducción de residuos y la promoción de la economía circular (Hernán et al., 2018b).

Financiamiento basado en resultados: Se podría estructurar el financiamiento del proyecto en función de los resultados alcanzados, como la cantidad de residuos poliméricos valorizados o los beneficios ambientales obtenidos. Esto podría atraer a inversores interesados en resultados tangibles y medibles (Hernán et al., 2018b).

Donaciones: A través de plataformas en línea puede ser una opción para involucrar a la comunidad y a individuos interesados en apoyar iniciativas de economía circular y gestión de residuos (Hernán et al., 2018b).

Programas de incentivos fiscales: El gobierno de Bogotá podría implementar programas de incentivos fiscales para empresas que inviertan en proyectos de economía circular y gestión de residuos, ofreciendo beneficios como exenciones fiscales o deducciones de impuestos (Hernán et al., 2018b).

Préstamos y financiamiento bancario: Instituciones financieras pueden ofrecer préstamos con condiciones favorables para proyectos sostenibles, especialmente si el proyecto demuestra viabilidad económica y ambiental (Hernán et al., 2018b).

3.1.4.g. Beneficios Medio Ambientales del Proceso de Producción de Combustible. Los procesos de valorización de residuos en los proyectos y obras civiles de la ciudad son alternativas medioambientales para minimizar los impactos generados y de esta forma contribuir con soluciones a estos problemas. El poderle dar valor económico a los residuos de los distintos procesos de construcción, puede evitar su disposición final en rellenos sanitarios y se puede garantizar el uso adecuado de estos residuos como materia prima de diferentes procesos productivos tales como la pirolisis para producir combustibles. (America Eilen Mendoza Rojas, 2016).

Hoy en día el proceso de participación de las personas en las técnicas de clasificación y selección de residuos que pueden aprovecharse como materia prima es bastante importante en las compañías; ya que el proceso educativo y de formación hace que desde el sector formal e informal sean participes en la recolección y clasificación de residuos en los procesos de producción, siendo así un logro importante para la sociedad donde los miembros de cada una de las empresas tiene responsabilidad medio ambiental y económica (Hernán et al., 2018a).

Debido a las obligaciones contractuales de las obras civiles dentro del Distrito Capital, se permite tener iniciativas de desarrollo de economía circular donde todos los residuos de construcción generados cuenten con su debido proceso de reutilización, reciclaje y/o disposición final. Para ello se deben contar con rutas de empleabilidad, donde se requiere de personal para garantizar y/o fomentar los procesos de selección y clasificación en la fuente; de esta forma garantizamos una

participación social en temas de vinculación laboral a personas para realizar una clasificación oportuna de los residuos plásticos generados en la PLMB (Mendoza Quiroga et al., 2020).

La posibilidad de establecer un sistema de carácter industrial para reincorporar residuos a un proceso productivo es un reto que garantiza preservar, mejorar el recurso natural, optimizar el rendimiento de recursos y fomentar eficacia del sistema. De esta forma el proyecto de construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá PLMB demuestra una transición hacia la economía circular generando beneficios económicos, ambientales y sociales que pueden ser extendidos hacia todo el Distrito Capital.

La aplicación de la economía circular en una planta de pirolisis que trabaja con residuos plásticos generados en el proyecto de la primera línea del metro de Bogotá puede implicar varios enfoques:

Reciclaje de plásticos: En lugar de desechar los residuos plásticos generados en el proyecto de la construcción de la primera línea del metro de Bogotá, se pueden recoger y enviar a la planta de pirolisis para su procesamiento. La pirolisis descompone el plástico en productos útiles como el combustible líquido, biocarbón, y gases, que pueden ser reutilizados en diversas aplicaciones.

Producción de materiales para la construcción: Los productos resultantes de la pirolisis, como el biocarbón, pueden ser utilizados como materia prima en la fabricación de materiales de construcción sostenibles, como ladrillos ecológicos, asfalto modificado con combustible líquido, o mezclas para suelo estabilizado con biocarbón. Esto cerraría el ciclo de los materiales utilizados en el proyecto de la construcción de la primera línea del metro de Bogotá.

Reducción de residuos y emisiones: La pirolisis puede contribuir a la reducción de la cantidad de residuos plásticos enviados a vertederos y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con su descomposición. Al convertir los residuos plásticos en productos

útiles, se evita la contaminación ambiental y se reduce la huella de carbono del proyecto de la construcción de la primera línea del metro de Bogotá.

Colaboración con otras industrias: Se pueden establecer alianzas con otras industrias que puedan beneficiarse de los productos resultantes de la pirolisis, como la industria de la energía para utilizar el biogás como combustible o la industria de la construcción para emplear los materiales reciclados en nuevos proyectos.

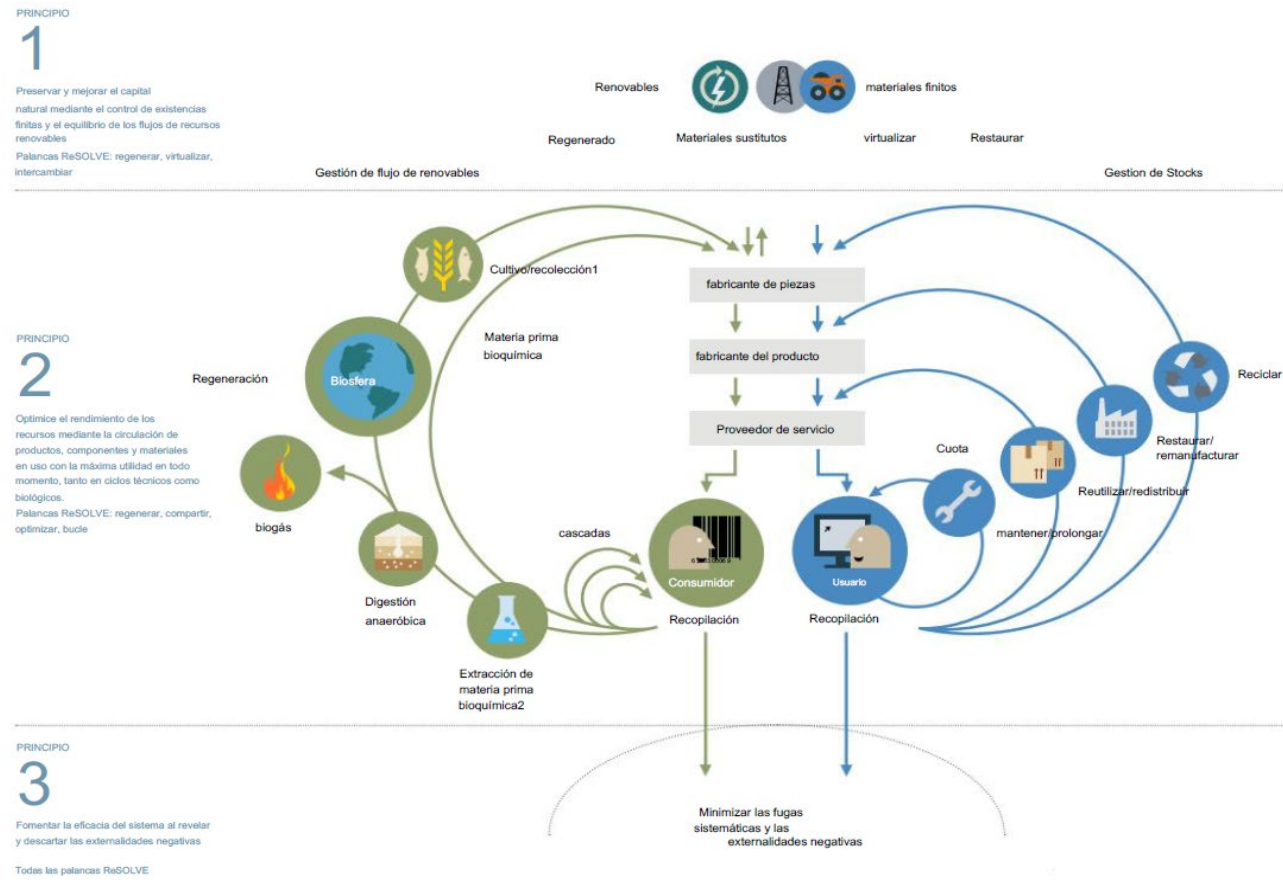
Educación y concienciación: Promover la economía circular en proyectos de construcción de infraestructura vial mediante la sensibilización y la educación sobre la importancia de la gestión sostenible de los residuos y la adopción de prácticas que fomenten la reutilización y el reciclaje.

La aplicación de la economía circular en la planta de pirolisis que trabaja con residuos plásticos generados en el proyecto de la construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá implica aprovechar los subproductos de la pirolisis para cerrar el ciclo de materiales, reducir residuos y emisiones, y promover la colaboración entre diferentes sectores industriales.

Como se muestra en la siguiente figura, se puede fomentar la eficacia del sistema, optimizar el rendimiento de los recursos o materia prima para el proceso de pirolisis y de esta forma establecer y/o producir materiales sustitutos para garantizar la minimización de consumo de recursos renovables, de esta manera el proyecto generaría la posibilidad de empleo de mano de obra no calificada en el proceso de consecución de materia prima para el proceso de pirolisis (Residuos poliméricos) (MacArthur, 2016).

Figura 7.

Esquema de economía circular



Nota. Fundación Ellen MacArthur, SUN y McKinsey Center for Business and Environment; Tomado de : MacArthur, E. F. (2016). *La nueva economía del plástico: plásticos y acción catalizadora repensar el futuro de.*

4. CONCLUSIONES

Según el muestreo y el diagnóstico inicial realizado en el inventario de residuos sólidos plásticos generados por los contratistas de la PLMB, se observa que los principales residuos generados en la obra son el polietileno de alta densidad, con un total de 654,78 kg, seguido por el polietileno de baja densidad, que alcanza 824 kg. Estos dos tipos de plástico son generados durante el periodo de enero de 2022 a febrero de 2023.

En las caracterización fisicoquímica de los polímeros, se han identificado plásticos particularmente adecuados para el proceso de pirólisis, en concreto, el polietileno de baja y alta densidad, así como el poliestireno. Estos dos primeros polímeros presentan propiedades que facilitan su descomposición térmica, lo que resulta ser una materia prima con un menor consumo de energía durante el proceso de pirólisis. Este ahorro de tiempo y recursos económicos hace que sean opciones altamente eficientes en el proceso.

Hay que considerar que tanto el poliestireno como el PVC, que se encuentran dentro del inventario de residuos de la PLMB, no son adecuados para el proceso de pirólisis, de acuerdo a su composición química y las sustancias tóxicas que se liberan al descomponerse a altas temperaturas. Durante el proceso de pirólisis, el poliestireno y el PVC puede desprender gases ácidos clorhídricos, monóxido de carbono y dióxido de azufre, que son peligrosos y pueden afectar la operación del reactor y afectar la calidad del producto final. Además, los subproductos de la pirólisis suelen contener contaminantes nocivos para el medio ambiente y riesgos para la salud. Debido a estas dificultades, el poliestireno y el PVC no son la mejor opción para la pirólisis en comparación con otros plásticos más fácilmente pirolizables, como el polietileno o el polipropileno.

La verificación de las alternativas de valorización de residuos plásticos después del proceso de investigación destacan su versatilidad y su capacidad para abordar desafíos ambientales y económicos. La creación de ladrillos, placas, madera plástica, la incorporación en hormigón y la conversión en combustibles líquidos y gaseosos ofrecen soluciones prácticas y sostenibles en diversos campos. Estas prácticas no solo son económicamente atractivas, sino que también contribuyen a reducir la contaminación y fomentan una gestión más responsable de los recursos. Así, la pirólisis se destaca como un proceso innovador al transformar plásticos en combustible mediante la deshidratación a altas temperaturas, en ausencia de oxígeno. Este enfoque optimiza recursos comunes y proporciona un combustible altamente competitivo y funcional en la industria, subrayando su papel esencial en la promoción de la economía circular y la gestión sostenible de residuos, marcando un hito significativo en la búsqueda de soluciones ambientalmente responsables.

La aplicación de la Metodología de Matriz de ponderación para la producción de combustible ha proporcionado resultados para la valorización de residuos que confirman las afirmaciones respaldadas por estudios previos (Ojeda & Mercante, 2021), (Palacios Jurado, 2017), y (Quezada Lozano, 2021). Se ha demostrado que el polietileno de baja densidad cumple con las condiciones óptimas para la producción de hidrocarburos; además, en el contexto del objeto de estudio de la Primera Línea del Metro de Bogotá se genera una cantidad significativa de estos residuos poliméricos como se detalla en la Fase I de este proyecto de investigación. Estos hallazgos respaldan la viabilidad y pertinencia de utilizar estos residuos como materia prima en el proceso de producción de combustible, lo que representa un avance significativo en la gestión sostenible de recursos y la economía circular.

La propuesta de valorización de residuos plásticos para la obtención de combustible líquido en el contexto de la construcción de la PLMB representa un enfoque sólido y prometedor para abordar los desafíos ambientales y económicos. Su énfasis en la modernización industrial, la generación de combustibles líquidos sostenibles y la colaboración con otros proyectos urbanos son pasos significativos hacia la promoción de una economía circular y una gestión más responsable de los residuos en Colombia. La implementación exitosa de esta propuesta no solo contribuirá a reducir la disposición final inadecuada de polímeros, sino que también ofrecerá beneficios económicos y ambientales, allanando el camino para un futuro más sostenible en el país. Este enfoque representa un ejemplo inspirador de cómo abordar las dificultades medioambientales y económicas de los proyectos mediante la innovación y la colaboración en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

El proceso de pirólisis planteado como método de aprovechamiento de residuos plásticos en la construcción de la primera Línea del Metro de Bogotá implica costos considerables y una proyección de ingresos. Tras analizarlos estos aspectos, se determinó que el proyecto de producción de combustibles a partir de los residuos plásticos generados en la construcción de la PLMB presenta una tasa interna de retorno relativamente baja del -20 %. Este hallazgo sugiere que la perspectiva de rentabilidad a largo plazo para esta iniciativa sea limitada.

La propuesta de aprovechamiento de residuos plásticos a través del proceso de pirólisis en la construcción de la PLMB enfrenta retos financieros que hacen que la tasa de retorno de la inversión sea inviable en su forma actual. No obstante, se plantea una estrategia prometedora al presentar esta propuesta a otros proyectos urbanos en el Distrito Capital que contribuirían en el aumento de la cantidad de residuos plásticos recolectados y almacenados en el centro de acopio. Esto, a su vez, aumentaría el rendimiento de producción en un 40% y con el tiempo sería posible alcanzar una

tasa de retorno de la inversión que permitiría recuperar la inversión inicial del proyecto. Este enfoque puede hacer que la iniciativa sea financieramente viable y contribuiría significativamente a la gestión sostenible de residuos y al desarrollo de una economía circular en la ciudad de Bogotá.

REFERENCIAS

- Amar Gil, S., Ardila Arias, A. N., & Barrera Zapata, R. (2022). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(02), 306–326. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>
- America Eilen Mendoza Rojas. (2016a). *Caracterización del proceso de conversión de residuos plásticos en combustible por medio de pirólisis*.
- America Eilen Mendoza Rojas. (2016b). *Caracterización del proceso de conversión de residuos plásticos en combustible por medio de pirólisis*.
- Carolina, D., & Osorio, M. (2020). *Estudio Del Manejo De Residuos Plásticos En Colombia*.
- Chicas Sierra, S. M., & Arias Vera, J. A. (2022). Valor compartido a través de la economía circular. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 18(35). <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v18i35.4032>
- Correa Laverde, M. C., & Angulo Argote, R. (2015). *Prefactibilidad económica de la construcción de un sistema para obtención de biocarbón y valorización de material orgánico a través del proceso de pirólisis*.
- Daniel, J., Villa, G., Gallego, M. G., Mejía, A., Milena, S., & Ocampo, G. (2019). *Evaluación de efectividad del proceso de pirólisis como método de disposición final de residuos sólidos aplicado a zona rural del Oriente Antioqueño-Colombia*.
- Daza N Lady Johanna, & Pineda J Vicente Sebastián. (2017). *Proyecto Investigación de Mercados enfocada al Aprovechamiento de Residuos Plásticos*.
- Delgado Melo, carlos, Mutis castillo, G., & Noguera García, L. J. C. (2022). De la economía lineal a la economía circular, transformaciones en el manejo de los residuos sólidos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 52–82. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2516
- Ecoplas. (2011). *Valorización de los residuos plásticos*.

- Flores Iralda, J. R., Mayté Gómez Gómez, G., Conejo Rodríguez, L. A., Ulises, X., Jacobo, H., Nava Sosa, D., Manuel, J., & Ávila, R. (2020). *Propiedades fisicoquímicas de combustibles alternativos obtenidos mediante pirólisis de residuos*. www.jóvenesenciencia.ugto.mx
- Francisco, J., & García, A. (2020). *La economía circular en el Derecho ambiental* (Vol. 102, Issue 2).
- Galvis Gonzalez, J. A. (2016). *Residuos sólidos: problema, conceptos básicos y algunas estrategias de solución*.
- González-Prolongo. (1997). *Propiedades químicas y físicas de polímeros*.
- Greenpeace, & Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud pública MASP. (2019). *Situación Actual De Los Plásticos En Colombia Y Su Impacto En El Medio Ambiente*.
- Hernán, C., Ramírez, C., César, M., & Pérez, M. (2018a). *Modelos más utilizados de reciclaje y reutilización de productos plásticos, y estrategias de recuperación más utilizadas en Colombia*.
- Hernán, C., Ramírez, C., César, M., & Pérez, M. (2018b). *Modelos Más Utilizados De Reciclaje Y Reutilización De Productos Plásticos, Y Estrategias De Recuperación Mas Utilizadas En Colombia*.
- Iacovidoub, E., & Gerassimidouc, S. (2020). *Residuos plásticos en una economía circular*.
- IDU 2022. (2022). *INFORME DE RESULTADOS 2020 - 2021*. www.idu.gov.co
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). *Tipologías Constructivas del IGAC*.
- Lamagni, D. M., Marinsalda, R. M., Martinez, M. L., & Megevand, M. M. (2020). *Proyecto de ahorro de costos mediante tratamiento y inserción de residuos en Villa Carlos Paz*.
- Loor Calderón, M., Andrade, F., Lizarzaburu, L., & Masache, M. (2017). *Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador*.
- Lozano, G., Arturo, F., Ávila, R., & Manuel, J. (2016). *Análisis cromatográfico de combustibles obtenidos a partir de desechos plásticos* (Vol. 2, Issue 1).

- Luis Miguel Reyes Castillo. (2008). *Reciclado de plástico para la agricultura*.
- M Beltran, & A Marcilla. (2020). *Estructura y propiedades de los polímeros*.
- MacArthur, E. F. (2016). *LA NUEVA ECONOMÍA DEL PLÁSTICO: PLÁSTICOS Y ACCIÓN CATALIZADORA REPENSAR EL FUTURO DE*.
- Mancheno Cárdenas, M. X., Arévalo, P., Romero, J., Malo, I., Matute, D., & Ramos, R. (2017). Análisis fisicoquímico de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado. *La Granja*, 26(2), 106. <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.09>
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, 23(1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>
- Martínez, A. N., & Porcelli, A. M. (2018). Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (primera parte). *LEX*, 16(22). <https://doi.org/10.21503/lex.v16i22.1659>
- Mayhua, V., Steve, E., Chavez, Z., Milagro, V., & Rosario, D. (2022). *Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS)*.
- Mendoza Quiroga, A. R., Fabregas Villegas, J., & Buelvas Castro, E. M. (2020a). *Analysis of the value chain of plastic recycling. A case study of the department of Atlantico (Colombia)*. <https://www.researchgate.net/publication/343599147>
- Mendoza Quiroga, A. R., Fabregas Villegas, J., & Buelvas Castro, E. M. (2020b). *Analysis of the value chain of plastic recycling. A case study of the department of Atlantico (Colombia)*. <https://www.researchgate.net/publication/343599147>
- Meroño, A. C. (2016). *Diseño y propuesta a punto de un protocolo para determinar el poder calorífico de sólidos (Aplicación a residuos plásticos)*.
- Metro Línea 1 SAS. (2023). *Actualización del Estudio de Impacto ambiental y social (EIAS) DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB) – TOMO 1*.

- Montoya Rendón, A. F., Valencia Hurtado, S. H., Sánchez Mesa, A. M., & Gonzalez Velez, J. M. (2018). *Valoración de los residuos sólidos de la Comuna Dos de Bello (Antioquia), como sistema alternativo de aprovechamiento*.
- Nones Faria E. (2019). *Gestión y técnicas de reciclaje polimérico*.
- Ojeda, J. P., & Mercante, I. T. (2021). Recycling plastic waste to produce lightweight aggregates. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 37, 489–499. <https://doi.org/10.20937/RICA.54081>
- Olivera, M., Musso, M., De León, A., Tancredi, N., Amaya, A., Volonterio, E., & Bussi, J. (2019). *Producción de hidrocarburos por pirólisis de plásticos*.
- Ortega Pegalajar, C. (2020). *Valorización de residuos plásticos de la industria de la automoción en mezclas asfálticas*.
- Palacios Jurado, M. J. (2017). *Valoración de los residuos generados en una planta industrial de plásticos tang s.a. de la ciudad de Durán y su reuso como sustitutos de materias primas*.
- Perez Cespedes, J. M., & Naranjo Hernandez, M. M. (2018). *Identificación y clasificación de residuos plásticos generados en el desensamble de vehículos en el Centro Nacional de Salvamentos SURA*.
- PlascticsEurope. (2021). *Plásticos - Situación en 2020*.
- Porras Chavez, A., Palacio Leon, O., & Guarín Cortes, N. L. (2014). *Unidad Logística De Recuperación De Residuos De Construcción Y Demolición: Estudio De Caso Bogotá D.C.*
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación Circular economy: Relationship with the evolution of the concept of sustainability and strategies for its implementation. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*, 15.
- Proaño, O., & Crespo, S. (2009). *Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos*.
- Qian, K., Tian, W., Li, W., Wu, S., Chen, D., & Feng, Y. (2022). Catalytic Pyrolysis of Waste Plastics over Industrial Organic Solid-Waste-Derived Activated Carbon: Impacts of Activation Agents. *Processes*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/pr10122668>

- Quezada Lozano, L. M. (2021). *Desarrollo de tratamientos térmicos sostenibles para la valorización del plástico procedente de la fracción rechazo de las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos.*
- Quiroga, A., Dayan, ;, Vildoza, A. ;, Córdoba, A.-T., Cruz, S., Zaroni, H. ;, & Raúl, H. (2022). *Obtención de combustibles mediante pirólisis de plásticos.*
- Ramírez Vargas, C. A., Paredes, D., & Guerrero, J. (2014). *Sostenibilidad financiera y económica de plantas de manejo de residuos sólidos urbanos en Colombia Financial and economic sustainability of urban solid waste recovery facilities in Colombia* (Vol. 16, Issue 2).
- Ramos, W., & Pretell, V. (2021). Optimization and Characterization of Liquid Fuels Obtained from Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July.*
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.95>
- Rodríguez López Jairo Andres, & Tunjacipa Martínez Manuel Mauricio. (2022). *Proyecto de grado - Diseño y construcción de un reactor piloto de pirólisis de neumáticos usados.*
- Ruiz Cruz, A. de J. (2014). *Evaluación de plan de negocio para aprovechamiento y valorización de plásticos con el uso nuevas tecnologías en CHATARRERIA LA 23 S.A.*
- Ruiz, L., Alberto, L., Ramón, R., & Alberto López Ruiz, L. (2020). *The Circular Economy In The Construction And Demolition Waste Sector: A Review Of Initiatives In Spain.*
- Santiago, M., Rubí Medin, L. S., Romero Irene Merí Ana García-Arranz, G., & Guerrero, H. (2018). *La Gestión de residuos y economía circular.*
- Tessini, C., Segura, C., & Berg, A. (2013). *Pirólisis rápida de biomasa.*
<https://www.researchgate.net/publication/309733974>
- Urien Pinedo Andrea. (2013). *Obtención De Biocarbones Y Biocombustibles Mediante Pirólisis De Biomasa Residual".*
- Valdeavellano Navarro, P. A. (2013). *Instalación de una planta de pirólisis para la valoración de neumáticos fuera de uso para la empresa REINVENT.*

- Vázquez Morillas, A., Velasco Pérez, M., Espinosa Valdemar, R., Morales Contreras, M., Hernández Islas, S., Ordaz Guillén, M. Y. L., & Almeida Filgueira, H. J. (2016). Generación, legislación y valorización de residuos plásticos en iberoamérica. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(EspecialResiduosSolidos), 63–76. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.05>
- Velarde, R., Artemio, J., Lazarte, G., Enrique, C., Rodriguez, D., & Luis, J. (2018). *Plan de negocio para la implementación de una planta de reciclaje de llantas usadas mediante el proceso de Pirolisis*. <http://hdl.handle.net/10757/624919>;
- Vidal Caicedo Diana Lucia. (2018). *Manual Unico de seguimiento - IDU* (Issue 2).
- Angumba, P. (2016) “Ladrillos elaborados con plástico reciclado (PET), para mampostería no portante”. Universidad de Cuenca. Maestría en construcciones. Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/25297/1/tesis.pdf>
- Díaz, K. (2022) Análisis del proceso de pirolisis para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos. Universidad Antonio Nariño. Programa Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil. Bogotá D.C, Colombia. Recuperado: http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/7473/1/2023_Kellys%20Diaz%20Marimon.pdf
- Ruiz, J; Lozano, D. y González, J. (2019) Propiedades físicas y mecánicas de la madera plástica para uso en estructura de atención y prevención de desastres de la “Esmic”. *Ingeniare*, Año 15, 27 de diciembre de 2019. pp. 31 39. Recuperado de: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-PropiedadesFisicasYMecanicasDeLaMaderaPlasticaPara-7527271.pdf>
- Sánchez, Y; Oshiro, A. y Positieri, M. (2014) Uso del plástico reciclado en el hormigón. Una alternativa para reducir la huella ecológica. *Revista de la Construcción* vol.13 no.3 Santiago dic. 2014. Recuperado de: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2014000300003&script=sci_arttext

Mancheno, M; Astudillo, S; Arévalo, P; y Naranjo, T. (2016) Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. La Granja. Revista de Ciencias de la Vida, vol. 23, núm. 1, pp. 60-67, 2016. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/4760/476051461008/html/>

Montenegro Robles, R. A. (Ed.). (2023). Matemáticas financieras: aplicaciones en ingeniería, administración y economía. Publicaciones Universidad de América.
<https://doi.org/10.29097/9786289517675> (Original work published 11 de abril de 2023)

ANEXOS

Anexo 1. Declaración de residuos de la PLMB (Ver carpeta Anexo 1)

Anexo 2. Características físico-químicas de los polímeros (Ver carpeta Anexo 2)

Anexo 3. Matriz de ponderación (Ver carpeta Anexo 3)

Anexo 4. Cotización plantas de pirólisis (Ver carpeta Anexo 4)

Anexo 5. Cotizaciones trituradoras (Ver carpeta Anexo 5)

Anexo 6. Resultados VPN_TIR (Ver carpeta Anexo 6)