

**EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITE
CRUDO PARTIENDO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS
POST INDUSTRIALES TIPO PP (POLIPROPILENO) A TRAVÉS DEL PROCESO
DE PIROLISIS EN LA EMPRESA IPSA S.A.S.**

ALEJANDRA TUTA CASAS

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
BOGOTA D.C
2020**

**EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITE
CRUDO PARTIENDO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS
POST INDUSTRIALES TIPO PP (POLIPROPILENO) A TRAVÉS DEL PROCESO
DE PIROLISIS EN LA EMPRESA IPSA S.A.S.**

ALEJANDRA TUTA CASAS

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
BOGOTA D.C
2020**

Nota de aceptación:

Orientador. Ing.

Jurado 1.

Jurado 2.

Bogotá D.C., Octubre 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARIA CLAUDIA APONTE

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dr. ALEXANDRA MEJIA GUZMÁN

Decano General de la Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. IVAN RAMIREZ MARIN

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

Dedico este trabajo principalmente a mi madre quien me ha apoyado en todos mis propósitos, me ha impulsado y me ha enseñado que es necesario el trabajo duro para alcanzar tus sueños.

A mi hermanita Camila quien me acompaño en todo el proceso de elaboración de este proyecto, por sus pausas activas y sus comidas

A Jonatan, quien siempre ha estado allí para apoyarme en todo lo que he necesitado, por sus consejos que me motivaron a seguir adelante con este proyecto

A todos mis amigos que de una u otra forma me enriquecieron personalmente por sus consejos y momentos de felicidad durante toda la carrera.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y familiares, quienes siempre me acompañaron y respaldaron a lo largo de todo este proceso.

A mi director el Ingeniero Dany José Cárdenas Romay por su colaboración, paciencia y acompañamiento en todo el desarrollo del proyecto.

A la empresa Dr. Calderón Laboratorios por su colaboración y guía en el desarrollo de las pruebas experimentales

A la empresa IPSA S.A.S por suministrar la materia prima necesaria, el acompañamiento y por permitirme crecer en conocimientos de la industria colombiana

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	24
1. MARCO TEORICO	25
1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA	25
1.1.1 Misión de la empresa.	25
1.1.2 Visión de la empresa.	26
1.2 LOS PLASTICOS	26
1.2.1 Polipropileno.	26
1.3 GENERALIDADES DE LA PIROLISIS	31
1.3.1 Pirolisis térmica.	35
1.3.2 Pirolisis catalítica.	35
1.4 TERMOGRAVIMETRIA	39
2. METODOLOGÍA	41
2.1 IDENTIFICACION DE RESIDUOS PLASTICOS EN LA EMPRESA	42
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIPROPILENO POST INDUSTRIAL	43
2.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO	44
2.4 PIROLISIS DEL POLIPROPILENO POST INDUSTRIAL	45
2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL	50
2.5.1 Variables controladas.	50
2.5.2 Variables no controladas.	52
2.5.3 Variable respuesta.	52
2.5.4 Planteamiento de la hipótesis.	53
2.5.5 Elección del diseño experimental	53
2.5.6 Experimentación.	54
2.6 CARACTERIZACION DEL ACEITE PIROLITICO	56
3. RESULTADOS Y ANALISIS	58
3.1 ANÁLISIS DEL POLIPROPILENO COMO MATERIA PRIMA	58
3.1.1 Análisis de humedad.	59
3.1.2 Análisis de cenizas.	59
3.1.3 Análisis de material volátil.	60
3.1.4 Análisis de carbón fijo.	60
3.2 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	60
3.2.1 Análisis estadístico de varianza.	63
3.3 ANÁLISIS DEL ACEITE PIROLITICO	67
3.3.1 Poder calorífico.	68

4. DISEÑO CONCEPTUAL	70
4.1 ANALISIS DE MERCADO DE ACEITE PIROLITICO EN COLOMBIA	70
4.1.1 Cadena de valor.	70
4.1.2 Código de clasificación industrial internacional y código arancelario.	72
4.1.3 Fuerzas de Porter.	72
4.1.4 Identificación de oferta y demanda.	73
4.2 CRITERIOS DE DISEÑO	75
4.2.1 Tipo de pirolisis.	75
4.2.2 Materia prima.	75
4.2.3 Temperatura.	75
4.2.4 Presión.	75
4.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS	77
4.3.3 Unidad de separación.	83
4.3.4 Unidades de almacenamiento.	84
4.4 DESCRIPCION DEL PROCESO	85
4.4.1 Diagrama de bloques.	85
4.4.2 Diagrama de flujo de procesos.	86
4.5 BALANCE DE MASA Y ENERGIA	88
5. ANALISIS FINANCIERO	96
5.1 DETERMINACION DE COSTOS E INVERSIONES	96
5.1.1 Inversiones fijas	96
5.1.2 Inversiones diferidas.	97
5.2 FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO	101
5.2.1 Horizonte de planeación.	101
5.2.2 Ingresos.	101
5.2.3 Flujo de caja.	102
5.3 INDICADORES ECONOMICOS	103
5.3.1 Tasa interna de oportunidad (TIO).	103
5.3.2 Valor presente neto (VPN).	105
5.3.3 Tasa interna de retorno (TIR).	105
6. CONCLUSIONES	106
7. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFIA	108
ANEXOS	114

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Residuos captados por la empresa ipsa s.a.s	42
Tabla 2. Características del polipropileno post industrial	43
Tabla 3. Composición química de la zeolita y pumita	51
Tabla 4. Valores para las variables controladas	54
Tabla 5. Distribución de los bloques para el diseño experimental	56
Tabla 6. Resultados análisis de propiedades	58
Tabla 7. Análisis de varianza ANOVA	63
Tabla 8. Modelo de regresion lineal	65
Tabla 9. Coeficientes del modelo de regresión lineal	65
Tabla 10. Resultados de poder calorífico para aceite pirolitico	68
Tabla 11. Caracterización de combustibles	69
Tabla 12. Código CIIU y arancelario del aceite crudo en Colombia	72
Tabla 13. Producción y ventas de Biodiesel de 2015-2018	74
Tabla 14. Registros históricos de producción y ventas para aceites livianos y otros	74
Tabla 15. Matriz de selección de unidad de reacción	82
Tabla 16. Descripción de equipos	86
Tabla 17. Descripción de las corrientes de proceso del diagrama de flujo de proceso.	88
Tabla 18. Balance de materia para las corrientes de la planta de pirolisis	90
Tabla 19. Valores de capacidad calorífica, entalpia de reacción y entalpia de vaporización del PP	91
Tabla 20. Poder calorífico del Gas natural y Gas de reciclo	92
Tabla 21. Cantidad de Gas Natural requerido en la etapa de arranque del sistema	93
Tabla 22. Cantidad de Gas de reciclo requerido en la etapa de reacción del sistema	93
Tabla 23. Factor de emisiones y densidad del Gas natural y Gas de reciclo	94
Tabla 24. Emisiones producidas durante el proceso de pirolisis	94
Tabla 25. Costos de inversiones fijas	97
Tabla 26. Costos de inversión diferida	97
Tabla 27. Precios de materia prima e insumos	98
Tabla 28. Costos anuales de materia prima e insumos	98
Tabla 19. Incremento anual del S.M.L.V	99
Tabla 30. Costos totales anuales de nomina	100
Tabla 31. Tarifas de servicios públicos para Cali en el año 2020	100
Tabla 32. Proyección de tarifas se servicios públicos.	100

Tabla 33. Costos anuales de servicios públicos	101
Tabla 34. Depreciación de planta de pirolisis.	101
Tabla 35. Precio del aceite pirolítico	102
Tabla 36. Amortización para el financiamiento del proyecto	102
Tabla 37. Flujo de caja del proyecto	103
Tabla 38. Ajuste de indicadores macroeconómicos	104
Tabla 39. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 1	120
Tabla 40. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 2.	121
Tabla 41. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 1.	122
Tabla 42. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 2.	123
Tabla 43. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 1.	124
Tabla 44. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 2.	125
Tabla 45. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 1.	126
Tabla 46. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 2.	127
Tabla 47. Resultado en masa de los productos obtenidos.	128
Tabla 48. Resultado de rendimiento de productos.	128
Tabla 49. Cotización BESTON	129

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura molecular del polipropileno	27
Figura 2. Diferentes métodos de reciclaje químico para el PET	30
Figura 3. Ventajas del proceso de pirolisis	31
Figura 4. Mecanismos de reacción de craqueo térmico	32
Figura 5. Etapas en el proceso de pirolisis	33
Figura 6. Mecanismos de reacción de craqueo catalítico	36
Figura 7. Ceras producidas en el proceso de pirolisis	37
Figura 8. Sitios activos de una zeolita	38
Figura 9. Análisis termogravimétrico	40
Figura 10. Metodología del proyecto	41
Figura 11. Material polimérico.	43
Figura 12. Reactor pirolítico	45
Figura 13. Marmita	46
Figura 14. Condensador en húmedo	47
Figura 15. Tea	47
Figura 16. Manómetro tipo U	48
Figura 17. Controlador de temperatura	48
Figura 18. Tubo conector del reactor al condensador	49
Figura 19. Catalizador utilizado	49
Figura 20. Diagrama del proceso de pirolisis	52
Figura 21. Resultados de los rendimientos de los productos del proceso de pirolisis	61
Figura 22. Resultados del rendimiento del aceite pirolítico	62
Figura 23. Aceites pirolíticos obtenidos	68
Figura 24. Cadena de valor del aceite crudo a partir de polipropileno post industrial	71
Figura 25. Fuerzas de Porter para el aprovechamiento de PP postindustrial	73
Figura 26. Diagrama de un proceso de pirolisis con un reactor de lecho fluidizado	78
Figura 27. Esquema de Reactor de lecho fijo	79
Figura 28. Diagrama de un proceso de pirolisis con reactor de tornillo sin fin	80
Figura 29. Esquema de reactor de horno rotatorio para proceso de pirolisis de Biosólidos	81
Figura 30. Esquema de un separador vertical bifásico	84
Figura 31. Tanque de almacenamiento de aceite pirolítico	84
Figura 32. Diagrama de bloques del proceso	85

Figura 33. Diagrama de flujo de proceso para la obtención de aceite pirolítico

87

LISTA DE GRAFICOS

	pág.
Grafica 1. Interaccion de factores con la variable respuesta	64
Grafica 2. Relacion entre el rendimiento de los productos y la temperatura en ausencia de catalizador	66
Grafica 3. Relacion entre el rendimiento de los productos y la temperatura en presencia de catalizador	67
Grafica 4. Comportamiento de la presión de operación a diferentes temperaturas	76

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Rendimiento del producto	53
Ecuación 2. Cálculo de la distribución de Fisher	54
Ecuación 3. Balance global	56
Ecuación 4. Modelo de regresión lineal	65
Ecuación 5. Ecuación general de balance de materia	88
Ecuación 6. Cálculo de flujo masico a través de rendimientos experimentales	89
Ecuación 7. Cambio entalpico para el proceso de pirolisis en PP	91
Ecuación 8. Cantidad de combustible necesario en el proceso de pirolisis	92
Ecuación 9. Cuantificación de emisiones totales	94
Ecuación 10. Cálculo de la tasa interna de oportunidad	104
Ecuación 11. Cálculo del valor presente neto	105
Ecuación 12. Cálculo de la tasa interna de retorno	106
Ecuación 13. Cálculo del contenido de humedad	116
Ecuación 14. Cálculo del contenido de cenizas	117
Ecuación 15. Cálculo del contenido de material volátil	118
Ecuación 16. Cálculo del porcentaje de pérdida de masa	118
Ecuación 17. Cálculo del porcentaje de carbón fijo	118

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Caracterización de aceite pirolítico	116
Anexo B. Proceso de producción de aceite pirolítico	120
Anexo C. Cotización planta de pirolisis	129

ABREVIATURAS Y UNIDADES

ABREVIATURA/UNIDADES	DESCRIPCIÓN
%p/p	Porcentaje en peso de catalizador
°C	Grados Celsius
Mm	micrómetros
A	Alpha, Representa a los tratamientos en relación a la temperatura
A β	Representa los tratamientos en relación a la interacción de factores
B	Betta, Representa a los tratamientos en relación a la concentración de catalizador
Atm	Atmosferas
B	Columna de coeficientes para la regresión lineal
C	Concentración del catalizador en porcentaje en peso para la ecuación de regresión lineal
CH ₂	Metileno
CH ₃	Metil
Cm	Centímetro
CVC	Corporación autónoma del valle de cauca
G	gramo
Hi	Hipótesis alternativa
Ho	Hipótesis nula
IPSAS.A.S	Empresa ingeniería para soluciones ambientales
K	Grados Kelvin
Kg	Kilogramos
KPa	Kilo pascales
L	Litro
Min	Minutos
mmHg	Milímetros de mercurio
PE	Polietileno
PEAD	Piloetileno de alta densidad
PEBD	Polietileno de baja densidad
PET	polietileno tereftalato
PP	Polipropileno
Pr	Representa la probabilidad en el análisis estadístico de varianza ANOVA
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de vinilo
T	Temperatura en grados Celsius para la ecuación de regresión lineal
TGA	Termogravimetria

GLOSARIO

ACEITE PIROLÍTICO: hidrocarburo líquido producto del proceso de pirólisis a partir de un material

ALCANO: compuestos a partir de hidrogeno y carbono; hidrocarburos saturados ya que carecen de dobles y triples enlaces

ALQUENO: son hidrocarburos insaturados que presentan dobles enlaces carbono-carbono en su molécula

ANOVA: análisis estadístico de varianza, desarrollado por Fisher, constituye la herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores sobre la medida de una variable continua.

ASTM: sociedad americana para pruebas y materiales, por sus siglas en ingles *Amerian Society for Testing and Materials*; es una organización de normas internacionales de para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

CARBÓN FIJO: residuo sólido persistente después de la separación de la humedad, las cenizas y el material volátil del carbón, coque y materiales bituminosos

CARBONILLA: producto sólido del proceso de pirólisis que se desprenden de la combustión; compuesto por hidrocarburos de cadena larga.

CATALIZADOR: compuesto que incrementa o reduce la velocidad de reacción sin intervenir en ella.

CENIZAS: residuos remanentes de la combustión en forma de polvo.

COMBUSTIBLES: material capaz de liberar energía cuando se oxida o pasa por un proceso de combustión, se presenta desprendimiento de calor.

COMBUSTIÓN: es toda reacción exotérmica creada entre el material combustible y el carburante, activados por una cierta cantidad de energía.

CONDENSACIÓN: es el cambio de fase de la materia que se encuentra en forma gaseosa y pasa a una forma líquida, normalmente provocado por el enfriamiento.

CONDENSADOR EN HÚMEDO: intercambiador de calor en donde el fluido frío y caliente entran en contacto directo, sin lugar a una reacción entre estos

CRAQUEO TÉRMICO: proceso por el cual se da el rompimiento de moléculas de alto peso molecular por acción del calor sin necesidad de procesos de oxidación o combustión.

DEGRADACIÓN: proceso mediante el cual las moléculas se desestabilizan dando lugar a cadenas más cortas puede ser térmica o catalítica.

DIÉSEL: también llamado gasóleo o gasoil; es un combustible obtenido de la destilación y purificación del petróleo crudo. Este combustible se emplea en los motores Diesel.

FACTOR: unidad variable independiente que se puede fijar en un punto o nivel de operación; cuyo efecto se quiere estudiar en un diseño de experimentos.

FUERZAS DE PORTER: son parte de un modelo de análisis competitivo creado por Michel Porter que tiene como finalidad entender la estructura de un sector económico con base a las cinco fuerzas: proveedores, compradores, sustitutos, competencia y el sector competitivo actual.

HIDROCARBURO: son compuestos orgánicos cuya estructura molecular se forma de la unión entre átomos de hidrógeno y carbono. Los hidrocarburos son la fuente de la que derivan otras sustancias orgánicas como el combustible fósil.

HUMEDAD: cantidad de agua presente en una muestra.

MARMITA: es un recipiente metálico constituido por una resistencia eléctrica para ser calentado y un aislamiento, en donde es alimentada la materia prima para el proceso de pirolisis.

MATERIA VOLATIL: son cada uno de los componentes orgánicos que se liberan al calentarse a altas temperaturas en ausencia de oxígeno

NIVELES: son los tipos o grados específicos del factor que se tendrán que realizar en la experimentación.

PIRÓLISIS: es el proceso térmico de degradación de la biomasa por efecto de la temperatura en ausencia de oxígeno.

PODER CALORÍFICO: es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión de un combustible o material. Su valor es expresado en MJ/Kg o MJ/m³ dependiendo de la naturaleza del combustible.

POLÍMEROS: son macromoléculas que se obtiene por la unión de dos o más monómeros a través de la reacción de polimerización.

POLIPROPILENO: termoplástico que se obtiene por la polimerización del propileno, subproducto gaseoso de la refinación del petróleo.

PUMITA: roca volcánica utilizada como catalizador en el proceso de pirolisis por su semejanza en composición a la zeolita y en su naturaleza a la riolita.

REACTOR DE HORNO ROTATORIO: reactor cilíndrico con orientación horizontal el cual es calentado indirectamente y presenta diversas ventajas en la transferencia de calor durante la reacción.

RECICLAJE MECÁNICO: consiste en trocear el material e introducirlo en una extrusora para fabricar granza reciclada y después transformarla.

RECICLAJE QUÍMICO: es el proceso mediante el cual se produce la descomposición del polímero para obtener los componentes de partida y por medio de esto obtener nuevos productos

REFINACIÓN: proceso por el cual se purifica una sustancia química obtenida a partir de un recurso natural.

RENDIMIENTO: es la utilidad o cantidad de producto obtenido después de una reacción o proceso químico

RESIDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS: forman parte de los residuos sólidos urbanos que se generan en casas, comercios, instituciones, industrias y áreas públicas. Presentan un problema ambiental por el tiempo prolongado de degradación que tienen.

RIOLITA: roca volcánica rica en sílice compuesta principalmente por fenocristales de cuarzo y feldespato. Utilizada como catalizador.

TEA: también llamado quemador de antorcha; utilizado para quemar los gases no condensables del proceso.

TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VITREA: es la temperatura a la cual el polímero adquiere propiedades características de estado vitreo, debido a los movimientos internos de las cadenas poliméricas que componen el plástico.

TERMOPLÁSTICOS: son polímeros que fluyen; al calentarse pasan al estado líquido debido a que su estructura molecular presenta poco o ningún entrecruzamiento.

VISCOSIDAD: es la propiedad que mide la resistencia de un fluido a las deformaciones por tensiones de tracción y tensiones cortantes.

ZEOLITA: mineral no metálico de origen y formación volcánica totalmente natural; con un inmenso poder de absorción y adsorción. Utilizado como catalizador.

RESUMEN

La producción de combustible a partir de plásticos ha generado un avance significativo en el ámbito de las energías renovables, logrando el surgimiento de un gran número de instalaciones de alta tecnología en distintos países como Alemania, Estados Unidos, Inglaterra¹. La implementación de estas tecnologías ha arrojado resultados positivos en el manejo y aprovechamiento de residuos plásticos, ya que no solo se da la eliminación de residuos sino a su vez la valorización de estos.

A partir de la revisión bibliográfica del proceso de pirolisis en plásticos se determinaron los procedimientos más apropiados para realizar la caracterización fisicoquímica del polipropileno post industrial. Dichos análisis consistieron en la determinación del contenido de humedad, contenido de cenizas, material volátil, carbón fijo y en el análisis termo gravimétrico. Las mediciones permitieron establecer la influencia de estas propiedades sobre el rendimiento del proceso. Los resultados mostraron que porcentajes mayores al 10% de contenido de humedad y cenizas disminuyen la producción de aceite.

Posteriormente se realizó el proceso de pirolisis del polipropileno (post industrial) a nivel laboratorio para la obtención del aceite pirolítico, a partir de un diseño experimental tipo factorial (2^2) con dos replicas para cada factor. El rendimiento del producto líquido fue evaluado en concentraciones de 0%p/p y 5%p/p de catalizador (Pumita) a una temperatura de 550°C y 650°C. Bajo estas condiciones de operación se consiguieron rendimientos de hasta un 88.4% de aceite pirolítico al trabajar a una temperatura de 550°C en ausencia de catalizador

A continuación, se caracterizó el aceite pirolítico determinando el poder calorífico y otras propiedades físicas de interés. El poder calorífico resultante fue 43,73 MJ/Kg, dicho valor resulto ser apropiado al ser comparado con el combustible diésel comercial.

A partir de los resultados obtenidos se propuso el diseño conceptual de una planta piloto para el proceso de pirolisis que incluye, el diagrama de flujo de procesos junto con la descripción de cada corriente, la selección de equipos y el balance de masa y energía.

Por último, se determinaron los costos de operación y la inversión necesaria para llevar a cabo el proceso a escala piloto. Los cálculos indicaron que es necesaria una inversión de 306.045.540 COP.

Palabras clave: Pirolisis, polipropileno, zeolita, aceite pirolítico, rendimiento, costos

¹ CALDERON p. 9

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto busca valorar el proceso de pirolisis como un medio de aprovechamiento de residuos plásticos post industriales de polipropileno, produciendo aceite pirolítico como una fuente de combustible alternativo; y una posible oportunidad para la empresa IPSA S.A.S de incursionar en el tratamiento y recuperación de residuos sólidos, como a su vez una solución de la demanda energética y de la acumulación de residuos plásticos.

En Colombia existen pocas prácticas para el aprovechamiento y mitigación del impacto que generan estos residuos, una de ellas es la regulación de bolsas plásticas consolidada con la resolución 668 de 2016, que reglamenta el uso racional de bolsas plásticas, entre otros métodos utilizados se encuentra el reciclaje y la separación de basuras en la fuente, aunque estudios afirman que una mejora en esta actividad permitiría una reducción de entre 15% y 20%² de las emisiones de gases de efecto invernadero, esto solo es posible en una economía de enfoque circular donde la gestión de recursos y residuos sea integrada y sostenible.

La pirolisis es un proceso de descomposición de materia orgánica e inorgánica a través de la degradación térmica en ausencia de oxígeno, que tiene como resultado una fracción gaseosa compuesta por hidrogeno y metano, una fracción líquida compuesta por hidrocarburos y una fracción sólida compuesta por cenizas con alto contenido de carbón³; la pirolisis de polipropileno es una de las más eficaces con rendimientos de aceite pirolítico altos debido a la presencia de ramificaciones en su estructura molecular⁴.

Para el desarrollo del siguiente proyecto se realiza la revisión bibliográfica y contextualización del proceso de pirolisis como también las generalidades de la empresa IPSA S.A.S y las condiciones operativas que se utilizaran en el proceso a escala laboratorio lo cual se evidencia en el capítulo uno. En el capítulo dos se describe la metodología utilizada durante el proyecto para la caracterización del polipropileno (post industrial), para el diseño de experimentos y la experimentación a nivel laboratorio como también para la caracterización por medio de análisis físicos y químicos de los productos obtenidos.

² DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION (DNP), Conpes 3874, política nacional para la gestión de residuos sólidos. En [sitio web], Colombia, 2016 disponible En: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>

³ BASU, Prabir. Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction. En: [Anónimo]2nd ed. ed. London: Academic Press, 2013. p. 65

⁴ Cardona, R. (2016). Análisis de alternativas tecnológicas para la valorización y disposición final de residuos plásticos en la ciudad de Manizales.

En el capítulo tres se presentan y se analizan los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima y de los aceites pirolíticos producidos, también se exponen los rendimientos obtenidos en la experimentación a nivel laboratorio de cada uno de los productos junto con el análisis estadístico de varianza y el ajuste de un modelo de regresión lineal. A partir de los resultados descritos en el capítulo tres se realiza el diseño conceptual de una planta piloto, con su respectivo diagrama de flujo de proceso, selección de equipos principales y balance de masa y energía.

Por último, en el capítulo cinco se muestra un análisis financiero del proyecto el cual incluye las inversiones y costos de operación de la planta piloto en el proceso de obtención de aceite pirolítico, como también el flujo de caja con una proyección de 5 años.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnico financiero la producción de aceite crudo partiendo del aprovechamiento de residuos plásticos post industriales tipo PP (polipropileno) a través del proceso de pirólisis en la empresa IPSA S.A.S.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar las propiedades de los residuos plásticos (tipo PP) que se utilizaran en el proceso de pirólisis.
- Definir las condiciones operativas del proceso de pirólisis que proporcionen el aprovechamiento de los residuos plástico tipo PP.
- Establecer el diseño conceptual de una planta piloto para el proceso de pirólisis en el aprovechamiento de residuos plásticos tipo PP.
- Realizar el análisis financiero del proceso de pirólisis para la producción de aceite crudo.

1. MARCO TEÓRICO

Con el fin de entender la evaluación del proceso de pirolisis para el aprovechamiento de residuos post industriales de polipropileno para la empresa Ingeniería para soluciones ambientales S.A.S; se presenta a continuación las generalidades de la empresa, como también conceptos de los plásticos y sus residuos, y una revisión concisa de los principales procesos físicos y químicos para su aprovechamiento. Se enfatiza en la pirolisis térmica tipo batch ya que es el proceso de interés en este trabajo y por último se describen factores importantes a tener en cuenta a la hora de caracterizar tanto la materia prima como el aceite pirolítico obtenido del proceso.

1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA

IPSA S.A.S es una empresa dedicada a la manipulación de residuos la cual cuenta con una licencia ambiental dada por la corporación autónoma del valle y consolidada por la resolución 0100 No.0710-0429 de 2008 que abarca el desarrollo de actividades como tratamiento, almacenamiento y recuperación de residuos peligrosos⁵; en la actualidad la empresa se encarga de la recuperación de residuos en fase líquida en su mayoría solventes a través de un proceso de destilación, como también sirve de mediadora para la disposición de residuos de distintas industrias.

La empresa no cuenta con un proceso propio para el tratamiento de los residuos sólidos que llegan de las demás industrias, y es allí donde nace la evaluación del proceso de pirolisis como una posible solución a estos residuos, además de ser un proceso que al integrarse podría tener una mayor remuneración para la empresa a comparación con la recibida en la disposición de los residuos actual.

Los residuos seleccionados para esta evaluación fueron los empaques de dulce de la empresa FRUGY S.A, los cuales llegan como residuos post industriales en cargas de una tonelada mensual a la empresa.

1.1.1 Misión de la empresa. Proveer soluciones ambientales integrales de manera permanente, eficiente, profesional, ética y transparente, generando beneficios a través de la oferta de nuestros productos y servicios para la industria, la sociedad y el medio ambiente con economía, variedad, calidad y oportunidad.⁶

⁵ INGENIERIA PARA SOLUCIONES AMBIENTALES S.A.S. Valorización. [sitio web]. Colombia. 2017. Disponible En: <https://www.ipsaingenieriaambiental.com/servicios/#valorizacion>

⁶ INGENIERIA PARA SOLUCIONES AMBIENTALES S.A.S. Nosotros. [sitio web]. Colombia. 2017. Disponible En: <https://www.ipsaingenieriaambiental.com/nosotros/>

1.1.2 Visión de la empresa. Ser líderes en el 2020 como una de las principales empresas del suroccidente colombiano en la venta de productos y servicios a partir de la gestión integral de residuos, que suplan las necesidades de la industria, el gobierno, la sociedad y el medio ambiente.⁷

1.2 LOS PLASTICOS

Los plásticos son en esencia polímeros, que a su vez son grandes moléculas que están formadas por la unión de muchas unidades repetitivas llamadas monómeros; según la naturaleza de los monómeros y forma en la que se da la polimerización puede llegar a tener distintas características⁸, y es por esto que tienen una amplia gama de aplicaciones.

Los plásticos se pueden clasificar de muchas maneras según la propiedad que se esté teniendo en cuenta, por ejemplo, si se clasifican según su comportamiento térmico existen los termoplásticos que son aquellos polímeros que fluyen al calentarse, es decir pasan al estado líquido, y se vuelven a endurecer aun estado sólido al enfriarse; esto se debe a que en su estructura molecular presenta pocos entrecruzamientos, dentro de esta categoría se observa el polietileno, polipropileno, el nylon entre otros⁹. Además de los termoplásticos existen los termorígidos que son aquellos polímeros que no fluyen, en lugar de eso, al calentarse se descomponen químicamente; este comportamiento se debe a una estructura con muchos entrecruzamientos que impiden los desplazamientos relativos de las moléculas, lo cual no permite la fusión¹⁰, en su mayoría son resinas que sirven como adhesivos, aislantes térmicos o lacas.

Las propiedades de cada polímero permiten seleccionar el material óptimo para un proceso en específico dependiendo de los requerimientos de dicho proceso; por lo tanto, es de vital importancia conocer las características y propiedades específicas de la materia prima con la que se vaya a trabajar para así tener un control más preciso del sistema y del producto a obtener.

1.2.1 Polipropileno. El polipropileno es un hidrocarburo de la familia de las poliolefinas y se obtiene de la polimerización del propileno o propeno, el cual es un gas resultante como subproducto de la industria petroquímica, su estructura

⁷ IPSA S.A.S Op. Cit., <https://www.ipsaingenieriaambiental.com/nosotros/>

⁸ LÓPEZ CARRASQUERO, Francisco. Fundamentos de polímeros. Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química. Mérida, 2004, p. 5

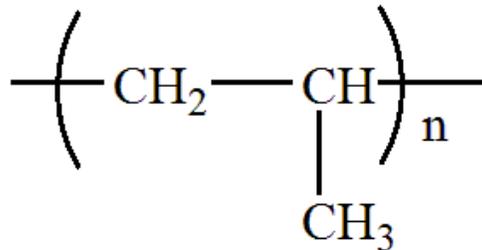
⁹ KRICHELDORF, Hans. Handbook of polymer synthesis. Part B. Nueva York. Marcel Dekker. 1992. 1808 p.

¹⁰ KRICHELDORF, Ibid., p. 1808

molecular consiste de un grupo metilo unido a un grupo vinilo.¹¹ Es un termoplástico semicristalino que se produce en presencia de un catalizador estéreo específico. El polipropileno tiene un peso específico entre 0,9 g/cm³ y 0,91 g/cm³ y una temperatura de reblandecimiento más baja que el polietileno.¹²

Se identifica con el número cinco (5) del sistema de identificación de plásticos SPI y su estructura se observa en la figura 1. El monómero es el propileno que será la unidad repetitiva que se polimerizará para formar el polipropileno, la cual se encuentra entre paréntesis.

Figura 1. Estructura molecular del polipropileno



Fuente: BELTRÁN RICO, Maribel y MARCILLA GOMIS, Antonio. Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Universidad de Alicante. 2012. p. 19.

El polipropileno es un material compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento y aún más con aquellas que se necesitan de altas temperaturas debido a su alto grado de resistencia al calor.¹³

Es ampliamente utilizado para la producción de plásticos moldeados debido a la excelente combinación de propiedades que presenta como peso ligero y resistencia al impacto, por ello se ha logrado convertir en un fenómeno para la producción de múltiples aplicaciones mediante el uso de técnicas de extrusión, inyección y termo conformado¹⁴ sus aplicaciones van desde empaques para alimentos hasta tejidos, muebles, sogas, plásticos, tela verde, empaques de lona, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas semitransparentes.

¹¹ BILLMEYER, F. La ciencia de las macromoléculas. En: Ciencia de los polímeros. 2 ed. New York. Reverté. 2004. p. 22.

¹² CALDERON, Felipe. Producción De Combustibles Vehiculares a Partir De Plásticos De Desecho. Bogotá: 2016b

¹³ INTRATEC SOLUTIONS. Technology Economics: Polypropylene production vía gas phase process. Pag 70 2013.

¹⁴ CAICEDO, carolina, CRESPO-DELGADO, Lina Marcela, CRUZ-RODRÍGUEZ y colaboradores, Norman Andrés. (2017). Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante la procesamiento. Ingeniería, investigación y tecnología, 18(3), 245-252).

1.2.3 Residuos plásticos. Los residuos plásticos son un conjunto de materiales plásticos, resinas o productos poliméricos que deben ser reprocesados para su utilización.¹⁵ Los residuos pueden ser generados en cualquiera de las etapas del ciclo de los plásticos, incluyendo en el proceso de producción, fabricación, transformación, transporte, distribución y consumo. Alrededor del 60% de los residuos generados provienen de productos de envasados es decir residuos post consumo; los residuos de plásticos provenientes de la industria son llamados residuos post industria y representan el 17% del total de residuos plásticos¹⁶; el resto consisten en materiales de larga vida, como tuberías, cables, piezas de automóviles entre otras.

Existen muchas maneras de clasificar los residuos plásticos, pero para simplificar pueden ser divididos en los siguientes¹⁷:

- Plásticos poco degradables y limpios, que pueden ser reincorporados en el proceso de donde se originan en poco tiempo
- Plásticos poco degradables que han sido contaminados y no pueden ser re integrados al proceso de origen, por lo que han de ser procesados para diferente uso final y aplicación.
- Mezcla de plásticos con composición conocida y esencialmente libre de componentes no poliméricos
- Residuos sólidos urbanos que están contaminados de componentes no poliméricos

Actualmente la demanda exponencial de los diferentes plásticos en el mercado, ha aumentado de manera proporcional sus residuos; y debido a que existen muchas clases de plásticos y no todos ellos están constituidos cien por ciento de compuestos poliméricos, a la hora de evaluar su disposición y aprovechamiento es realmente difícil; el reciclaje de plásticos es uno de los métodos más reconocidos para el aprovechamiento de estos materiales, el cual es un proceso donde el material es recuperado y tratado con el fin de conseguir un producto o algún beneficio. Existe el reciclaje primario que se refiere a la incorporación del material reciclado en el ciclo de producción del que proviene y el reciclaje secundario que es aquel en el que es aprovechado el material reciclado en procesos de fabricación de nuevos productos.¹⁸

El problema ambiental a través de los años se ha vuelto tan crítico que se han desarrollado nuevas formas para disponer estos residuos a través de métodos que

¹⁵ CONESA, Juan A. Estudio de la Pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. 1996.

¹⁶ CONESA. Op. Cit., p 15

¹⁷ CONESA, Op. cit., p. 26

¹⁸ Ibid., p. 28

no sean contaminantes o que generen formas alternativas de energía, están se han clasificado en técnicas de reciclaje mecánico y químico¹⁹.

- **Reciclaje mecánico:** Es aquel proceso que transforma el material físicamente sin cambiar su estructura química como por ejemplo la disminución de tamaño y el moldeo del material a través de calor para la obtención de un nuevo producto²⁰. Este proceso incluye algunos pasos que pueden ocurrir en orden diferentes como lo son la recolección, clasificación, lavado y triturado del material²¹.

Aunque la tasa de reutilización y reciclaje de plásticos aumente, todavía se verterá una cantidad inmensurable de residuos siendo casi la mitad de la cantidad producida a nivel mundial maso menos 150 mega toneladas anuales²². Esta cantidad es bastante considerable y con un alto potencial para utilizarse como materia prima de productos valiosos o para la recuperación de energía.

El contenido energético del plástico es comparable con el de fuentes de hidrocarburos con un poder calorífico de 443,5 MJ/Kg²³, por lo tanto, podría ser utilizado como combustible secundario, sin embargo, la incineración de plástico puede producir un gran impacto desde el punto de vista medioambiental por los gases producidos en el proceso. Estos inconvenientes han llevado al manejo de métodos de reciclaje químico

- **Reciclaje químico:** Este método consiste en el cambio de la estructura química del material, ya que lo que se busca es la disminución de la cadena polimérica con el fin de generar nuevos productos menos contaminantes o que tendrán un uso diferente en la industria²⁴. A diferencia de la biomasa los residuos plásticos y en específico los pertenecientes a la familia de las poliolefinas no contienen cantidad de oxígeno significativas lo que hace esperar una mayor eficiencia de carbono²⁵.

¹⁹ MILIOS, Leonidas, et al. Plastic recycling in the Nordics: A value chain market analysis. En: WaManagement. Junio, 2018. Vol. 76. p. 180-189.

²⁰ MIANDAD, R, et al. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. En: International biodeterioration & biodegradation. Abril, 2017. Vol. 119. p. 239-252

²¹ RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens y VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. En: Waste Management. Julio, 2017. P. 4

²² Ibid., p. 4

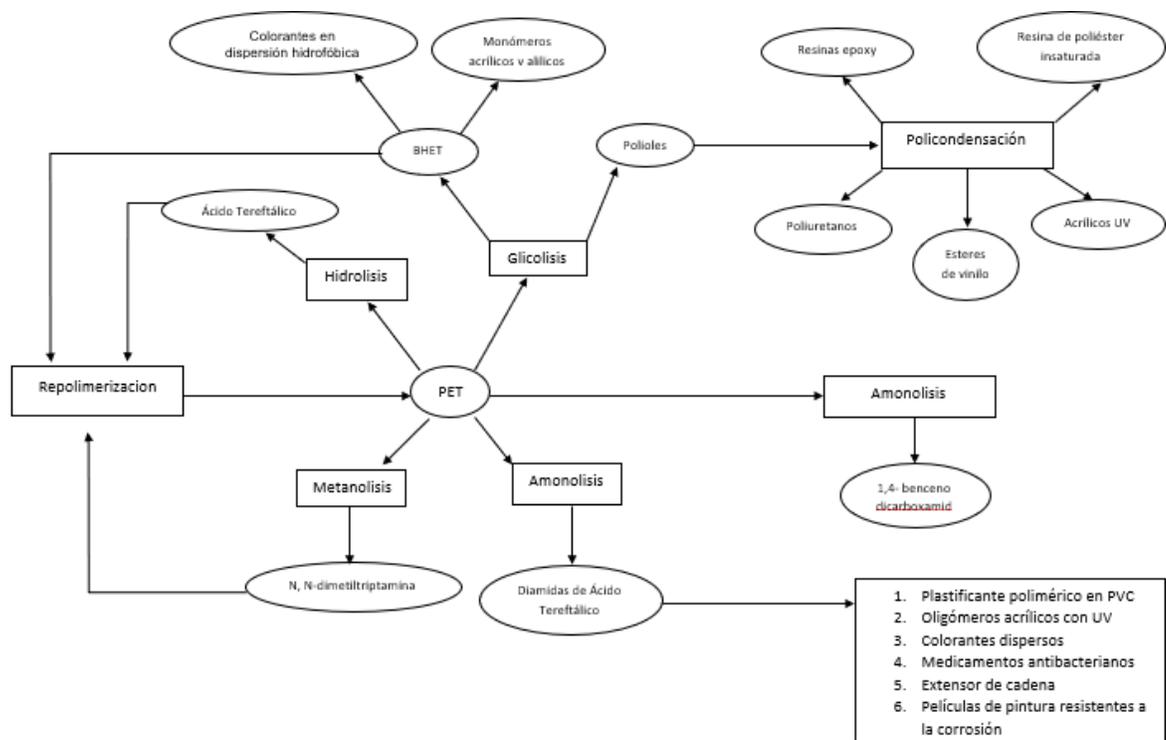
²³ KUMAR, S, Pnada. A.K., Singh, R. A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. Resour. Conserv. Recycl. 55 p. 893-910

²⁴ RAGAERT, Op. Cit., p. 35

²⁵ Ibid., p. 35

Entre los procesos más reconocidos dentro del reciclaje químico se encuentra la gasificación, la pirolisis, el craqueo catalítico fluido y el hidrocraqueo, siendo este último el método más complejo debido a la disposición de residuos debido a las reacciones que se presentan durante el proceso y a los factores que deben ser controlados en este. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la figura 2 donde se desglosan los diferentes métodos de reciclaje químico para el PET (tereftalato de polietileno) como lo son la hidrolisis, glicolisis, metanolisis y amonolisis, junto con sus respectivos productos.

Figura 2. Diferentes métodos de reciclaje químico para el PET

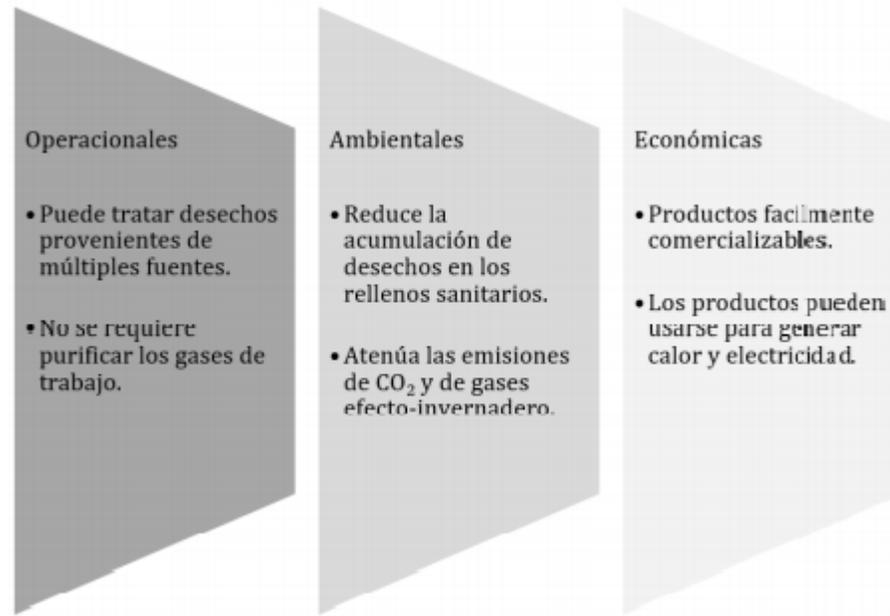


Fuente: RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens y VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. En: Waste Management. Julio, 2017. P. 35 modificada por el autor

Uno de los procesos más destacados del reciclaje químico es la pirolisis, ya que representa una tecnología interesante para los residuos plásticos que no se pueden despolimerizar y que actualmente no se reciclan sino se incineran como lo son el Polietileno (PE) , Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS); el reciclaje químico ya no representa una opción posible y se necesitan de métodos más duros como lo es el proceso de pirolisis ya que mediante este se puede manejar residuos triturados de

automóviles altamente contaminados y mezclas de plásticos heterogéneos.²⁶ Otras de sus ventajas son presentadas en la figura 3 donde se clasifican en operacionales, ambientales y económicas:

Figura 3. Ventajas del proceso de pirolisis



Fuente: SERNA M., Edgar Desarrollo e innovación en Ingeniería (ed. 3) Agosto, 2018 p 8

1.3 GENERALIDADES DE LA PIROLISIS

La pirolisis se conoce como la degradación térmica de los residuos plásticos en ausencia de oxígeno o con muy bajo nivel del mismo. Por medio de la pirolisis las macromoléculas presentes en los plásticos, termofijos y termoplásticos, son reducidas a compuestos de bajo peso molecular.²⁷

En cuanto a la materia prima que se puede implementar en este proceso está la biomasa, cauchos, textiles y plásticos, donde los últimos abarcan una gran variedad

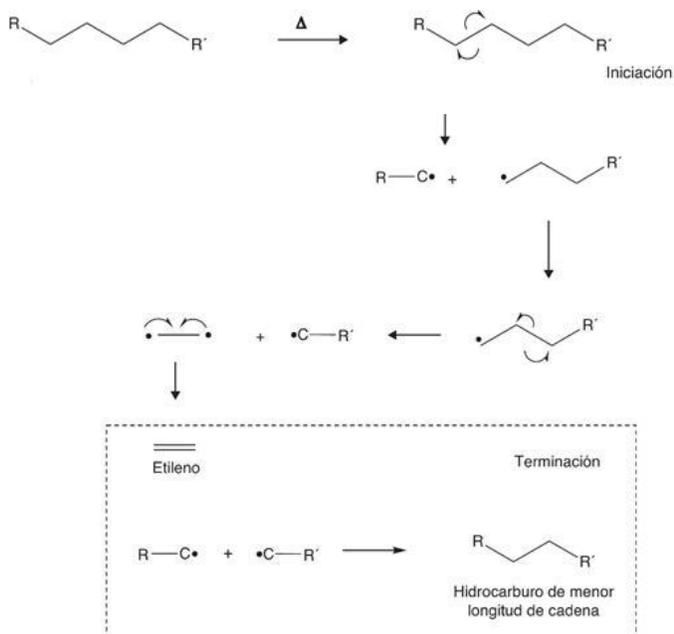
²⁶ VERMEULEN, L. VAN CANEGHEM, J. BLOCK, C. BAEYENS, J. Automotive shredder residue (ASR): reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling. Energy or chemicals valorisation. J. Hazard. Mater 2011. P 8-27

²⁷ Cardona, R. (2016). Análisis de alternativas tecnológicas para la valorización y disposición final de residuos plásticos en la ciudad de Manizales.

que pueden ir desde polietileno (PE), polipropileno (PP), poli estireno (PS) y poliuretano (PU).²⁸

Este proceso se lleva a cabo por medio del calentamiento a altas temperaturas del material reciclado con el objetivo de romper las moléculas poliméricas y convertirlas en compuestos de cadena más corta que corresponden a hidrocarburos combustibles. Las altas temperaturas permitirán que la energía cinética que contienen los enlaces moleculares aumente tanto que produzca el rompimiento de la molécula a cadenas más cortas; las cuales serán condensadas para separar los compuestos gaseoso de los líquidos a temperatura ambiente²⁹. También se debe tener en cuenta que se realiza en ausencia de oxígeno y esto es debido a que no se desea la reacción entre el oxígeno y las moléculas que se van formando ya que provocaría una combustión peligrosa, además de que no se formarían los productos deseados³⁰, los cuales se pueden obtener a partir de residuos de PE y el PP ya que son cadenas poliméricas de carbono e hidrogeno que al romperse permiten la formación de cadenas de hidrocarburos como se observa en la figura 4.

Figura 4. Mecanismos de reacción de craqueo térmico



Fuente: ALVARADO, José Gregorio, *et al.* Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.

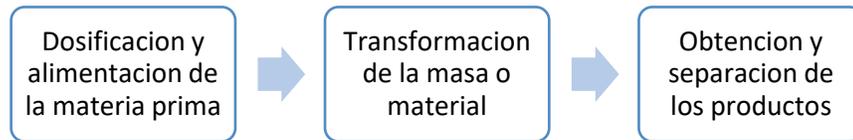
²⁸ CZAJCZYŃSKA, D., *et al.* Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. En: Thermal Science and Engineering Progress. Sep. vol. 3, p. 2

²⁹MORAIS ARAÚJO, Aruzza Mabel, *et al.* Thermal and catalytic pyrolysis of sunflower oil using AIMCM-41. En: Renewable Energy. Febrero, 2017. Vol. 101. p. 900-906.

³⁰ RAGAERT. Op. cit., p. 35

El proceso de pirolisis en general considera tres etapas. Como se ilustra en la figura 5.³¹

Figura 5. Etapas en el proceso de pirolisis



Fuente: CARDONA, R. (2016). Análisis de alternativas tecnológicas para la valorización y disposición final de residuos plásticos en la ciudad de Manizales

- En la primera etapa se produce una descomposición lenta con producción de pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrogeno y metano, esto a consecuencia de la ruptura de enlaces debido a la alta temperatura.
- La segunda etapa se conoce como descomposición térmica activa y se da entre 360°C y 560°C ya que al aumentar la temperatura se da una ruptura más profunda de las moléculas formando de esta manera hidrocarburos condensables y alquitranes.
- La última etapa, ocurre a temperaturas superiores a 600°C se caracteriza por la eliminación gradual del hidrogeno y otros heteroátomos.³²

Durante este proceso se obtienen diversos productos, cuya naturaleza depende de las condiciones de operación algunos de ellos podrían ser hidrocarburos de doble enlace debido a la reacción de craqueo térmico, pero en su mayoría se espera obtener productos de cadena corta, los cuales se clasifican en tres tipos diferentes:

- **Sólido:** El coque o también llamado cenizas es la fracción de hidrocarburo que no alcanza a convertirse en vapor durante el proceso, está compuesto por un 85% por carbón, aunque también puede contener oxígeno e hidrogeno³³; se puede describir como una masa negra residual que queda dentro del reactor al terminar el proceso.

³¹ GÓMEZ, Alexander. Pirolisis de biomasa: cuesco de palma de aceite. kassel university press GmbH, 2008

³²CARDONA, Op. cit., p. 16

³³ BASU, Prabir. Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction. En: [Anónimo]2nd ed. ed. London: Academic Press, 2013. p70

- **Líquido:** También llamado bioaceite es un líquido viscoso de color amarillo marrón de alto contenido energético cuya composición química es compleja³⁴, ya que contiene moléculas de hasta treinta y cinco (35) carbonos lo cual describe una amplia gama de hidrocarburos que pueden ir desde ceras y parafinas hasta olefinas, naftenos y aromáticos³⁵.

Este aceite puede ser refinado para la obtención de un combustible, donde la viscosidad, el contenido de oxígeno y otras propiedades cambiarán de acuerdo a la materia prima que se utilice durante el proceso de pirolisis junto con las condiciones empleadas.³⁶

- **Gas:** Es un producto cuyo rendimiento puede ir desde un 9% hasta un 70% en relación a la producción de los otros productos, está conformado por las moléculas más pequeñas que se separan de la cadena polimérica, es decir, que dicho gas estará compuesto por pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrogeno y metano³⁷. A nivel ambiental presenta una implicación desfavorable ya que son gases de efecto invernadero.

El control de las condiciones de operación fundamentalmente de la temperatura final y la velocidad de calentamiento, permite dirigir el proceso a la obtención prioritaria de uno de los tres productos, si bien la formación de los otros dos ocurre inevitablemente será en menor medida.

La pirolisis es un proceso endotérmico y la energía para poder llevarla a cabo suele proporcionarse mediante la combustión parcial o total de alguna de las fracciones de producto generadas en el proceso y/o de la materia prima³⁸, debido a esto existen varios tipos de pirolisis como lo son:

- **Pirolisis lenta:** La cual se da a bajas tasa de calentamiento entre 5 K/min -100 K/min y a temperaturas entre 400°C - 600 °C y se caracterizan por la alta producción de biocarbón con un porcentaje entre 60-70% y entre 10-15% de bioaceite.

³⁴ ARBELÁEZ, J. I. M., Janna, F. C., GUTIÉRREZ, C. A. G., RENTERÍA, C. F. V, ... & Chaparro, J. A. S. (2013). Pirólisis rápido de biomasa. Universidad Nacional de Colombia.

³⁵ CASTELLS, Xavier Elías y VELO GARCÍA, Enric. La pirólisis. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos. España. 2013. 88 p

³⁶GIORDANO, Maxime. Production of Infrastructure-Ready Fuel Via Fast Pyrolysis and Hydroprocessing of Biomass. Hauppauge: Nova, 2013.

³⁷ANUAR, Shafferina. Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled p 4

³⁸ ARAUZO, J., Serrano, F. B., Ábrego, J., Sánchez, J. L., & Gonzalo, A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. Boletín del Grupo Español del Carbón, (33), 2-6.

- **Pirolisis rápida o flash:** Caracterizada por la alta tasa de calentamiento (>1000°C/s) y por tener temperaturas entre 300- 500 °C, este tipo también se diferencia por su rápido enfriamiento de condensables para la producción de bioaceite.³⁹

La pirolisis también se puede clasificar según la forma en la que se lleve a cabo el proceso, es decir, cuando se lleva a cabo a través de un calentamiento en ausencia de oxígeno se llama pirolisis térmica y cuando se tienen esas mismas condiciones y se le agrega un catalizador se le denomina pirolisis catalítica.

1.3.1 Pirolisis térmica. La temperatura es la variable más importante durante este proceso ya que no se va a tener ningún acelerador de reacción que interfiera durante el mecanismo; además de ser un proceso endotérmico, se ha determinado que no hay una temperatura óptima establecida, sino que esta depende del material procesado⁴⁰.

Todos los procesos de pirolisis térmica se encuentran dentro de un rango de temperaturas entre 300°C y 900°C. Se ha evidenciado que al realizar el proceso en temperaturas bajas (menores a 500) se favorece la producción de aceite pirolítico, mientras que altas temperaturas (mayores a 600°C) se favorecerán los productos gaseosos⁴¹. Otros factores importantes a tener en cuenta durante la pirolisis térmica son el tiempo de residencia, la presión y la composición del material que se usará en el proceso⁴².

El mecanismo de reacción del craqueo térmico se caracteriza por que, al romperse los enlaces debido a las altas temperaturas, se crean moléculas con radicales libres que provocan inestabilidad en la estructura y como consecuencia de esto las moléculas buscarán la unión con otras moléculas o la creación de dobles enlaces buscando recuperar la estabilidad perdida⁴³.

1.3.2 Pirolisis catalítica. La pirolisis requiere de altas temperaturas y posee un amplio espectro de productos. En pro de reducir la demanda energética y lograr un mayor control del rendimiento de los productos obtenibles, se da origen a la pirolisis catalítica donde se procura operar a temperaturas bajas y adicionalmente el aumento de la velocidad de reacción disminuye el volumen del reactor.⁴⁴

³⁹ ARBELAEZ, Op. cit., p. 17

⁴⁰ CALDERON. Op. Cit., p.40

⁴¹ ANUAR, Op. cit., p. 320

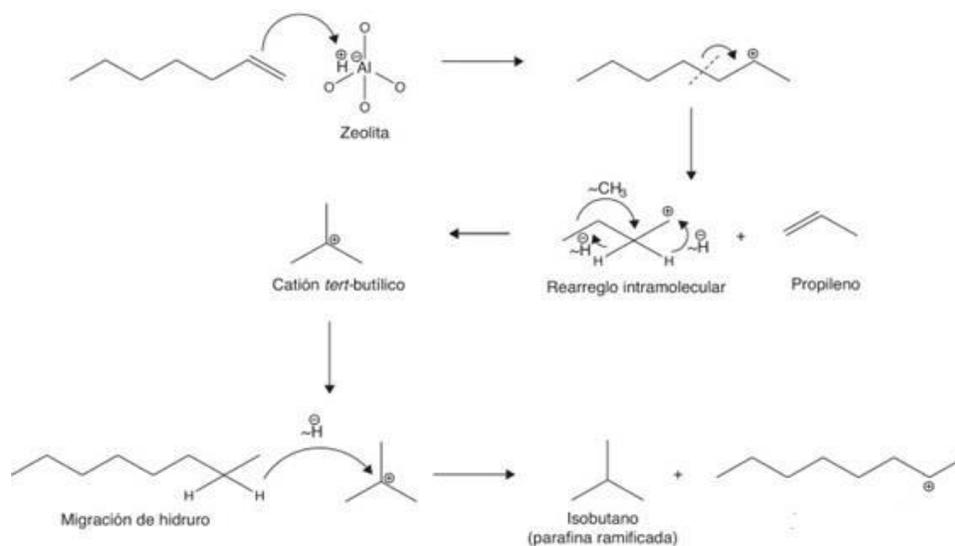
⁴² CALDERON Op. Cit., p. 44

⁴³ MORAIS ARAÚJO, Op. cit., p. 900

⁴⁴ SERNA M., Edgar Desarrollo e innovación en Ingeniería (ed. 3) Agosto, 2018 p 8

En estudios anteriores⁴⁵⁴⁶ se ha evidenciado que el uso de la pirolisis catalítica aumenta el rendimiento en la producción de aceite pirolítico y gases incondensables, además de que permite obtener aceites de mejor calidad a temperaturas y tiempos de residencia menores⁴⁷. En la pirolisis catalítica la formación de compuestos dependerá de la interacción del catalizador con las moléculas de hidrocarburos que se vayan creando durante el proceso como se muestra en la figura 6, se rompe una cadena de polipropileno por efecto de la temperatura y el electrón que se libera es atraído a un protón del catalizador (zeolita), posteriormente la olefina queda inestable se rompe formando una molécula de cadena más corta.

Figura 6. Mecanismos de reacción de craqueo catalítico



Fuente: ALVARADO, José Gregorio, *et al.* Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.

En la figura 6. También se observa que la cadena hidrocarbonada cede un electrón para equilibrar las cargas y formar el doble enlace del propileno, razón por la cual la poliolefina sufre un arreglo intermolecular que la convierte en un catión ramificado o catión tert-butílico⁴⁸. Finalmente, el catión busca en la molécula hidrocarbonada un electrón para estabilizarse y convertirse en una parafina ramificada

⁴⁵ AL-SALEM, S. M., *et al.* A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). En: Journal of environmental management. Julio, 2017. Vol. 197. p. 177-198.

⁴⁶ CALDERON Op. Cit., p. 66

⁴⁷ MIANDAD, Op. cit., p. 330

⁴⁸ ALVARADO, José Gregorio, *et al.* Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.

consecuentemente la molécula hidrocarbonada quedara cargada positivamente propensa a sufrir un proceso similar al descrito anteriormente.

Uno de los objetivos en la pirolisis catalítica es la disminución de la formación de ceras que pueden llevar al taponamiento del condensador⁴⁹, ya que al disminuir su temperatura el aceite se solidifica Este fenómeno puede observarse en la figura 7, donde el aceite pirolítico solidifica.

Figura 7. Ceras producidas en el proceso de pirolisis



Fuente: CALDERON, Felipe. Producción De Combustibles Vehiculares a Partir De Plásticos De Desecho. Bogotá: 2016 p. 101

Estas ceras se deben a la presencia de cadenas lineales de alcanos, estas parafinas se cristalizan a medida que disminuye la temperatura⁵⁰. Esta complicación puede ser resuelta por el control de la temperatura durante el proceso o a través de la adición de catalizadores con dosis entre el 25 y 50 % de la carga⁵¹.

La utilización de un catalizador persigue la selectividad a productos del máximo interés bien como combustibles o como materias primas de la petroquímica. Se puede clasificar las rutas de trabajo que tiene el craqueo catalítico como⁵²:

- El craqueo catalítico directo de los plásticos, que son fundidos en el mismo reactor
- El craqueo catalítico (reformado) en línea del producto gaseoso de pirolisis
- El reformado del producto liquido de pirolisis, en un segundo reactor catalítico
- El craqueo catalítico de los plásticos disueltos

Los catalizadores ácidos sólidos son aquellos que están basados en sistemas de silicatos y aluminosilicatos.⁵³ De ellos, las zeolitas destacan por tener una alta actividad catalítica, un alto intercambio iónico, ser térmicamente estable y altamente

⁴⁹ ANUAR, Op. cit., p. 4

⁵⁰ SCHEIRS, Jonh. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. Walter Kaminsky, 2006b. p. 387

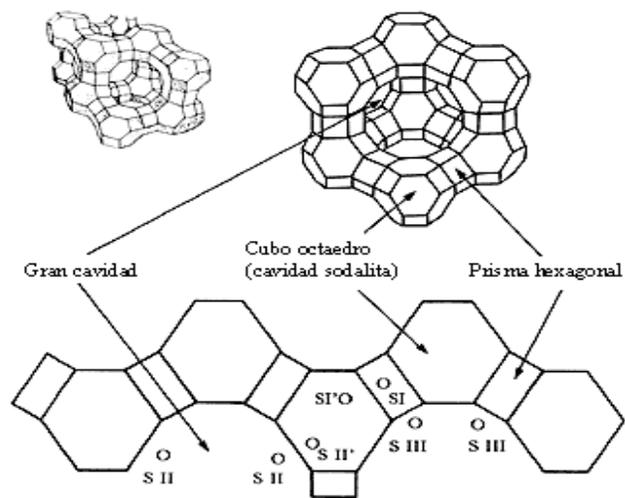
⁵¹ CALDERON, Op. cit., p 216

⁵² ARANDES, J. M., Bilbao, J., & López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. revista Iberoamericana de Polímeros, 5(1), 28-45.

⁵³ SERNA M, Op. cit., p. 8

selectiva.⁵⁴ En las zeolitas los centros básicos de la estructura son los oxígenos, estos se encuentran en la superficie de los tetraedros que están cargados negativamente, estos oxígenos son accesibles en estructuras abiertas debido a que ocupan posiciones fijas en la red y por ello serán las moléculas reaccionantes las que tienen que aproximarse, produciendo así una situación que es favorable para la formación de intermedios de reacción.⁵⁵ En la Figura 8. Se puede observar la estructura convencional de una zeolita además de la identificación de los sitios activos nombrados anteriormente.

Figura 8. Sitios activos de una zeolita



Fuente: INSTITUTO LATINOAMERICANO DE LA COMUNICACIÓN EDUCATIVA. Ciencia volumen 1 zeolitas [sitio web]. Colombia.

Disponible En:

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/zeolita.htm>

Las zeolitas naturales se han encontrado en una gran variedad de aplicaciones en la adsorción, catálisis, la industria de la construcción, la agricultura, la recuperación del suelo y la energía; estas son abundantes y de bajo costo representando así una aplicabilidad a nivel industrial.⁵⁶ La zeolita natural está presente en la roca volcánica o riolita, siendo uno de los materiales más comunes en estos procesos ya que su

⁵⁴ Ibid., p. 9

⁵⁵ GÓMEZ, J. M. Op. cit., p. 23

⁵⁶ QUIROZ, H. P., Dussan, A., LÓPEZ, S. M., CALDERÓN, J. A., Otálora, J. H., & CHICA, R. (2014). Caracterización estructural de ceniza volcánica del nevado del Ruiz: Identificación fase Zeolita. MOMENTO, (48E), 1-13.

origen la hace resistente a altas temperaturas y su composición es muy similar a la de una zeolita industrial.⁵⁷

1.4 TERMOGRAVIMETRIA

La termogravimetría hace parte de un conjunto de análisis térmicos que son utilizados para la identificación y medición de cambios físicos y químicos, que sufren los compuestos bajo variaciones de temperatura controladas⁵⁸. Es una técnica que se basa en la medida de variación de la masa ya sea su pérdida o ganancia, durante su calentamiento en una atmosfera controlada.

Los análisis termo gravimétricos han sido ampliamente utilizados en el estudio de reacciones de descomposición de sólidos y líquidos, también permiten el análisis de procesos de desorción, adsorción y reacciones de descomposición en atmosferas controladas como lo es la descomposición térmica de polímeros a través del proceso de pirolisis.⁵⁹ Existen dos tipos de procedimiento termogravimétrico⁶⁰ el análisis dinámico que consiste en la medición de la masa del material en estudio mientras se varia la temperatura con una tasa de calentamiento constante y el análisis isotérmico en el cual la temperatura se mantendrá constante por un tiempo establecido. Como resultado de este análisis se obtendrán el cambio de masa con respecto a la temperatura y un termograma que es una gráfica que representas las variaciones porcentuales de la masa.

Este método no permite conocer la composición química del material ni tampoco identificar los cambios térmicos que no estén asociados con la variación de la masa como lo son la cristalización y la temperatura de transición vítrea.⁶¹

En la figura 9 se puede observar una curva termogravimétrica de diferentes materiales poliméricos, en la cual se analiza la degradación de los polímeros provocada por el aumento de la temperatura; la descomposición del polipropileno inicia en una temperatura cercana a los 300°C y es completada a los 500°C⁶². Estos resultados son tomados como referentes para el diseño experimental. Se inicia con una temperatura de 500°C en la prueba de pirolisis para lograr durante la reacción

⁵⁷ QUIROZ Op. Cit., p6

⁵⁸ RODRÍGUEZ, E., & VILLEGAS, E. (2012). Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. *Métodos y materiales*, 2(1), p 26.

⁵⁹ FERRERO, J. A. C. 2014. Curso básico de análisis térmico. Editorial Club Universitario. P 20-21

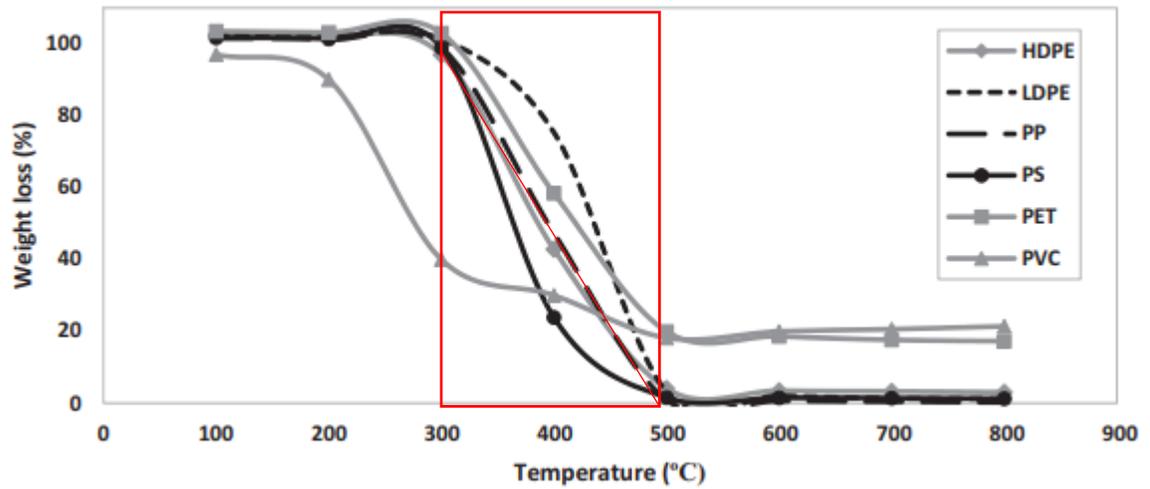
⁶⁰ RODRÍGUEZ, E., & Villegas, E. Op, cit, p. 26

⁶¹ RODRÍGUEZ, E., & Villegas, E. Op, cit, p. 28

⁶² ANUAR. Op. Cit, p. 4

una pérdida de peso significativa del material polimérico y su respectiva degradación.

Figura 9. Análisis termogravimétrico

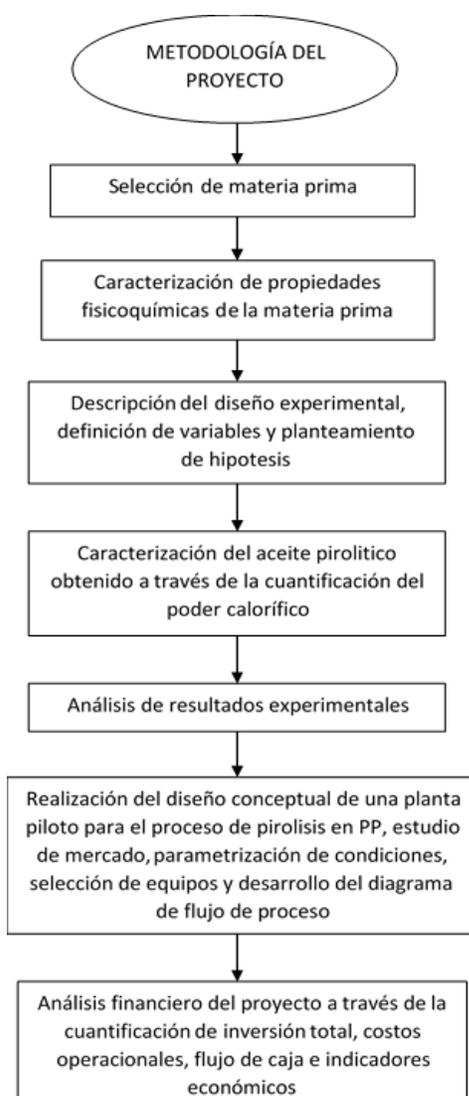


Fuente: Artículo Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste de Shafferina Anuar y Colaboradores, año 2017.

2. METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se expondrá la elección del residuo plástico que fue usado como materia prima en el proceso de pirolisis, junto con algunas características físicas como color, textura y olor; al igual que el procedimiento para su caracterización posterior. Consecutivamente se explicarán las consideraciones previas al diseño experimental como la definición de las variables, el planteamiento de las hipótesis y el tipo de diseño experimental. Por último, se presenta el método de análisis del aceite pirolítico obtenido. En la figura 10 se presenta la metodología utilizada en el proyecto:

Figura 10. Metodología del proyecto



Fuente: elaboración propia

2.1 IDENTIFICACION DE RESIDUOS PLASTICOS EN LA EMPRESA

La empresa IPSA S.A.S es una empresa del sur occidente colombiano dedicada a la recuperación, tratamiento y fabricación de productos base solvente⁶³; dentro de sus servicios se encuentra la valorización de excedentes industriales el cual incluye la compra de residuos tales como cartón, papel, residuos de madera, plásticos, cauchos, aceites usados y en general todos aquellos residuos peligrosos y comunes a los que se les deba dar una adecuada gestión⁶⁴.

La gestión de este tipo de residuos comprende actividades de embalaje, recolección, transporte, almacenamiento y entrega a gestores autorizados por la Corporación Autónoma del Valle (CVC) para cada tipo de residuo. Los residuos plásticos que llegan mensualmente a la empresa equivalen a 60 toneladas, los cuales equivalen a diferentes residuos como se muestra en la tabla 1. Aunque se tienen picos en los meses de junio y diciembre casi del doble del valor normal de los residuos captados por la empresa.

Tabla 1. Residuos captados por la empresa IPSA S.A.S

Tipo de residuo	Cantidad (ton/mensuales)
Polietileno	30
Polipropileno	20
Estibas plásticas	10

Fuente: Ingeniería para soluciones ambientales, compra de residuos; modificado por autor

Actualmente la empresa no cuenta con un método de aprovechamiento de este tipo de materiales debido a que su principal proceso es la recuperación de solventes y solo actúa como mediadora en el aprovechamiento de estos residuos, aunque la empresa en los últimos años ha tenido el deseo de diversificar con respecto a este servicio no cuenta con la infraestructura y el conocimiento previo de un proceso como lo es la pirolisis de plásticos.

⁶³ INGENIERIA PARA SOLUCIONES AMBIENTALES S.A.S. Nosotros. [sitio web]. Colombia.2017 Disponible En: <https://www.ipsaingenieriaambiental.com/nosotros/>

⁶⁴ INGENIERIA PARA SOLUCIONES AMBIENTALES S.A.S. Valorización. [sitio web]. Colombia. 2017. Disponible en: <https://www.ipsaingenieriaambiental.com/servicios/#valorizacion>

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIPROPILENO POST INDUSTRIAL

Para la caracterización del plástico obtenido, se recolectan pequeñas cantidades de 5 kg cada semana con el fin de evaluar la uniformidad de las propiedades en las diferentes cargas de plástico que llegan a la empresa, en la figura 11 se puede observar el material polimérico recibido cada semana. El cual es proveniente de una empresa dedicada a la fabricación de empaques de dulce.

Figura 11. Material polimérico.



Fuente: elaboración propia

En la siguiente tabla se presentan las características físicas recolectadas que posee el material polimérico, el cual fue brindado por la empresa IPSA S.A.S, con el cual se va a alimentar el reactor para el proceso de pirólisis. Cabe aclarar que estas características fueron uniformes durante las semanas en las que se tomaron los datos.

Tabla 2. Características del polipropileno post industrial

Características	Descripción	Imagen
Color	El material es de color transparente con pequeñas partes de color rojo, morado y negro que pertenecen al logo del empaque del dulce.	
Textura	Presenta una forma de pequeñas tirillas delgadas y largas con una textura lisa	
Olor	No presenta ningún olor	

Fuente: elaboración propia.

2.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO

El material polimérico posee ciertas propiedades que pueden afectar o beneficiar el proceso de pirolisis, por ello se realizó una revisión bibliográfica de las características más relevantes en el rendimiento del aceite pirolítico como lo son el contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbón fijo en el polipropileno; con el fin de consolidar los rangos óptimos en los que debe estar cada una de las propiedades.

- **Contenido de humedad** La humedad de la materia prima de un proceso de pirolisis es un factor importante a tener en cuenta debido a que reduce el rendimiento y aumenta la demanda energética; ya que el calor latente de vaporización del agua en general es mucho mayor al calor necesario para la fusión, cracking y vaporización de hidrocarburos por lo cual aumenta la necesidad de transferencia de calor. Uno de los métodos más utilizados para su determinación se encuentra en la norma ASTM-D3173⁶⁵
- **Contenido de cenizas** Este porcentaje de cenizas indica la fracción de residuos inorgánicos que quedan luego de la combustión completa de la materia orgánica, un porcentaje alto de cenizas en la materia prima de un proceso de pirolisis provoca una disminución en el rendimiento del aceite pirolítico además de incitar un aumento de la temperatura inestabilizando el sistema. Uno de los métodos más utilizados para su determinación es a través de la norma ASTM-D3174-12⁶⁶, la cual establece al contenido de cenizas como el residuo remanente después de quemar la muestra bajo condiciones de temperatura, tiempo y presión controladas; donde la incineración provoca la expulsión del agua que contiene el material⁶⁷
- **Contenido de material volátil** Se considera material volátil al conjunto de compuesto de la biomasa o materia prima, que se desprende cuando son calentados, es decir, es la pérdida de masa corregida por el contenido de humedad que se evapora al aumentar la temperatura, estas partículas pueden provenir de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos en el caso del proceso de pirolisis en polipropileno serán todo los gases provenientes del reactor y que después de la condensación y separación se convertirán en aceite

⁶⁵ CALDERON, Op. cit., p. 88

⁶⁶ ASTM D3174-12, Standard Test Method for Ash, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org

⁶⁷ Ibid., www.astm.org

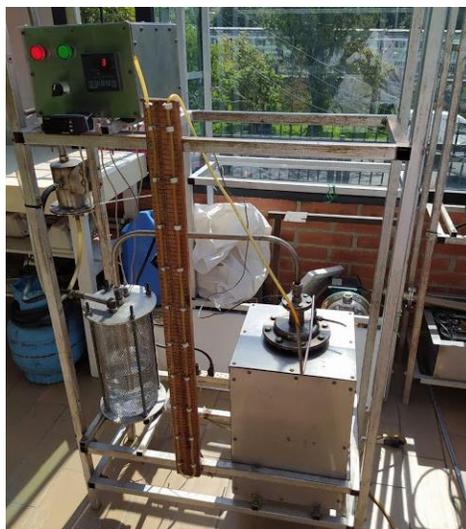
pirolítico y gases de reciclo. Para poder realizar esta caracterización se encuentra la norma ASTM-D3175-20,⁶⁸ la cual establece la diferencia entre la cantidad de masa perdida de la muestra y el porcentaje de humedad en condiciones controladas de temperatura, tiempo y presión.

- **Contenido de carbón fijo** El carbón fijo es la parte no volátil, que se encuentra en el residuo que queda en la capsula luego de determinar el contenido de material volátil. Si a este residuo se le resta la cantidad de cenizas se va a obtener el contenido de carbón fijo, por lo tanto, el carbón fijo es un valor calculado resultante de la suma del porcentaje de humedad, cenizas y material volátil restado de 100.⁶⁹

2.4 PIROLISIS DEL POLIPROPILENO POST INDUSTRIAL

Luego de la identificación de los residuos plásticos en la empresa su selección y caracterización se procede a realizar el proceso de pirolisis, la cual se realiza en una planta de pirolisis a nivel laboratorio como se observa en la figura 12. La planta cuenta con un reactor batch con capacidad de 1kg sin corrientes de oxígeno o algún otro gas inerte y una condensación directa de los gases calientes a un líquido frío.

Figura 12. Reactor pirolítico



Fuente: elaboración propia

⁶⁸ ASTM D3175-20, Standard Test Method for Volatile Matter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org

⁶⁹ASTM D7582-15, Standard Test Method for Proximate Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org

El equipo cuenta con un controlador de temperatura, un medidor de presión del sistema y un medidor de la temperatura de los gases que salen del reactor junto con otras unidades que tienen funciones específicas para el buen funcionamiento y monitoreo del proceso. A continuación, se describen cada una de las unidades que componen el equipo:

- **Marmita:** Se denomina así al reactor pirolítico ya que es allí donde se carga la materia prima junto con el catalizador y se lleva a cabo el craqueo catalítico o térmico según sea la presencia o ausencia de catalizador respectivamente.⁷⁰ Es un cilindro vertical de acero inoxidable con capacidad de dos litros como se puede observar en la figura 13. Esta marmita es colocada en una unidad rectangular con 38,4 cm de profundidad y 23,1 cm de diámetro que cuenta con una resistencia eléctrica en la parte inferior.

Figura 13. Marmita



Fuente: elaboración propia

- **Condensador:** Es un recipiente de vidrio en forma cilíndrica con un diámetro de 15,5 cm y 35 cm de profundidad como se observa en la figura 14. El cual se llena con 2,5 L de agua y es colocado en un soporte metálico y cubierto por una malla de seguridad, cuenta con un empaque de goma entre la boca del cilindro y la tapa, la cual esta unidad a la marmita para permitir el paso de los vapores calientes, esto con el fin de proporcionar un sellado hermético⁷¹.

Este tipo de condensador en húmedo tiene como principal característica de funcionamiento el contacto directo de los vapores calientes que salen del reactor con el agua a temperatura ambiente permitiendo de esta manera el cambio de fase de los compuestos condensables o también llamado aceite pirolítico forman una fase líquida inmiscible con el agua debido a que presentan una densidad

⁷⁰ CALDERON Op. Cit., p. 38

⁷¹ CALDERON Op. Cit., p. 53

menor. Por otro lado, los gases incondensables son dirigidos hacia arriba y quemados en la Tea.

Figura 14. Condensador en húmedo



Fuente: elaboración propia

- **Tea:** En la parte superior del condensador se encuentra un quemador de gases el cual se observa en la figura 15. Cuyo objetivo es evacuar los gases incondensables y así evitar un aumento excesivo de presión, ya que los gases pirolíticos no condensables están compuestos por su mayoría de butano, propano y metano; aunque también pueden contener trazas de hidrogeno y monóxido de carbono, los cuales son altamente contaminantes y peligrosos al ser inhaladas⁷², por lo tanto, no pueden ser ventados a la atmosfera sino quemados en el dispositivo.

Figura 15. Tea

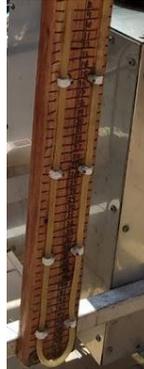


Fuente: elaboración propia

⁷² CALDERON Op. Cit., p. 53

- **Manómetro tipo U:** Es un instrumento que permite la medición de la presión dentro del reactor en todo momento. (ver figura 16). Uno de sus orificios se encuentra conectado a la marmita y el otro se deja libre a la presión atmosférica, de tal manera que, la diferencia de estas dos presiones permite obtener la presión en centímetro de columna de agua.⁷³

Figura 16. Manómetro tipo U



Fuente: elaboración propia

- **Controlador de temperatura:** Es el dispositivo encargado del arranque del proceso de pirólisis (ver figura 17)⁷⁴, controla la temperatura de la resistencia eléctrica mencionada anteriormente dando inicio así al proceso de craqueo dentro de la marmita. Al encender el controlador se ajusta la temperatura hasta alcanzar el valor programado y se mantiene constante hasta finalizar el proceso.

Figura 17. Controlador de temperatura



Fuente: elaboración propia

- **Termocupla:** Es un dispositivo colocado en la parte superior de la marmita y cuyo objetivo es medir la temperatura de los vapores generados por la reacción de craqueo, los cuales son transmitidos a una pantalla donde se puede observar el valor de la temperatura medido.

⁷³ Ibid., p.53

⁷⁴ Ibid., p. 53

- **Tubos y empaques:** Son elementos adicionales que permiten el desarrollo correcto del proceso de pirolisis, entre estos se encuentra, el tubo conector entre la marmita y el condensador que permite el paso de los vapores calientes de una unidad a otra (ver figura 18). También es utilizado un empaque de cartón entre la boca de la marmita y la tapa de la misma para reducir las posibles fugas de vapores que se puedan presentar.

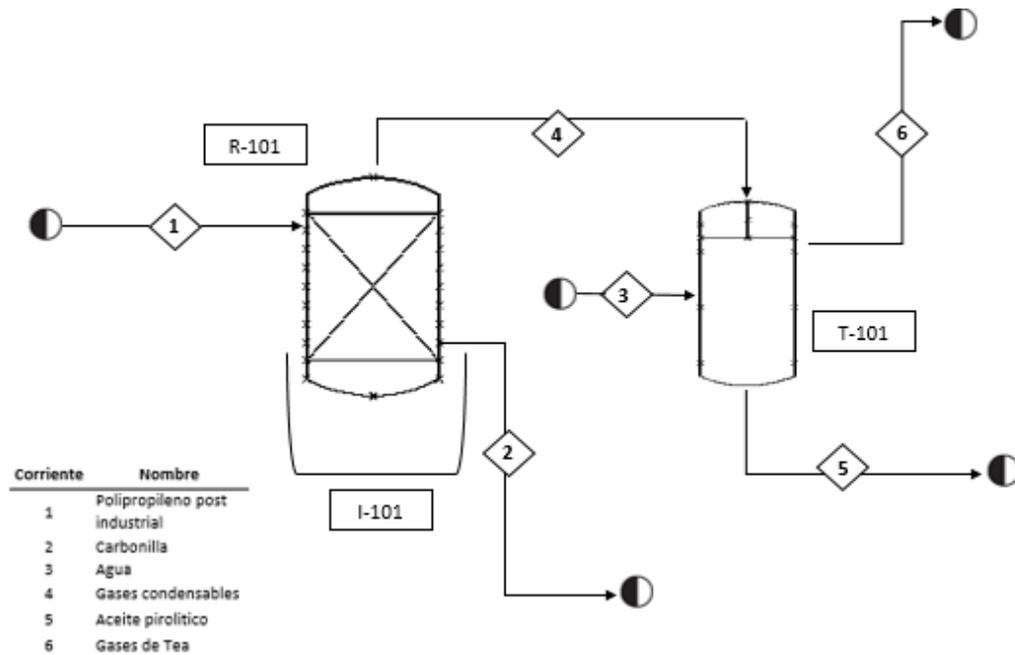
Figura 18. Tubo conector del reactor al condensador



Fuente: elaboración propia

Para una mejor visualización y entendimiento de la planta de pirolisis a nivel laboratorio se presenta la figura 19. En la cual se observa el diagrama de flujo de proceso para la pirolisis a nivel laboratorio, donde se encuentran los equipos mencionados anteriormente junto con la resistencia eléctrica que hace parte del reactor; además de la identificación de las corrientes del proceso.

Figura19. Diagrama de flujo de proceso planta a nivel laboratorio



Fuente: elaboración propia

2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para una correcta evaluación del proceso de pirolisis es necesario definir las condiciones a las cuales se llevará a cabo y de esta manera plantear los parámetros en los que se desarrollará el diseño de experimentos. Para este proyecto se evaluará un proceso con catalizador y otro en ausencia de catalizador, es importante aclarar que dentro del proceso con presencia de catalizador no fue posible determinar la conversión total de carbonilla ya que no fue posible la separación catalizador-carbonilla. También es importante mencionar que al ser un proceso novedoso se desconoce la cinética del proceso y por lo tanto no se sabe con exactitud la cantidad de catalizador consumido durante la reacción, por esto no se ha incluido la conversión de este en los procesos que incluyan craqueo catalítico.

2.5.1 Variables controladas. Son aquellas que se pueden controlar durante el proceso ya que no dependen de otros parámetros. Las variables controladas fueron la temperatura, la concentración de catalizador, la cantidad de materia y el tiempo de residencia; las cuales fueron seleccionadas a partir de la revisión bibliográfica⁷⁵
^{76 77}.

- **Cantidad de materia.** El proceso de pirolisis es un proceso que se puede desarrollar con diversos tipos de materia primas y con cualquier cantidad de esta⁷⁸. El reactor batch con el que se desarrollaran las pruebas tiene una capacidad máxima de 1 kg, pero debido a que el plástico ocupa un gran volumen se decidió usar una carga de 500 g, es decir por cada pirolisis ingresaran 500g del polipropileno post industrial.
- **Tiempo de residencia.** Las cadenas de material polimérico requieren de largos tiempos para poder romperse debido a que la mayoría están constituidas por anillos aromáticos como CH₂ y CH₃.⁷⁹ Además de que el tiempo que dura este proceso de despolimerización, depende de diversos factores como cantidad y tipo de carga, diseño del reactor, catalizadores, etc.⁸⁰ Un tiempo de residencia largo favorecerá la completa descomposición del material polimérico y por consiguiente favorecerá el

⁷⁵ ANUAR, Shafferina. Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled p. 4

⁷⁶ CALDERON Op. Cit., p. 44

⁷⁷ MORENO Torres, A. K., & Sáenz Castañeda, P. C. (2018). Evaluación de la obtención de diésel a nivel laboratorio mediante pirólisis a partir de residuos plásticos provenientes del proceso de empaquetado en la empresa Atlantic FS SAS, Fundación Universidad de América. p 62

⁷⁸ AL-SALEM, S. M., et al. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). En: Journal of environmental management. Julio, 2017. Vol. 197. p. 177-198.

⁷⁹ SCHEIRS, Op. cit., p. 56

⁸⁰ CALDERON, Op. cit., p. 148

rendimiento del aceite pirolítico. Con base a la revisión bibliográfica el tiempo de residencia establecido para este proyecto fue de cuatro (4) horas⁸¹.

A continuación, se definirán los niveles que se evaluarán tanto para la temperatura como para la concentración de catalizador. El tiempo de residencia y la cantidad de materia se mantendrá constante durante toda la fase experimental.

- **Temperatura:** La temperatura como se mencionó en el capítulo anterior es una de las variables más importantes dentro del proceso de pirolisis, ya que es la encargada de dar comienzo a la degradación del material, debido a esto la temperatura optima del proceso varía según el tipo de material. Se ha encontrado que para el polietileno y polipropileno los rangos de temperaturas más usados están entre 500°C y 600°C⁸². Partiendo de la curva TGA⁸³ se puede fijar como temperatura de inicio 500°C ya que es a esta temperatura que el polímero se descompone. Se eligieron dos niveles de temperatura de 550 y 650 °C las cuales están por encima de la temperatura estipulada de 500°C para poder lograr el rendimiento esperado.
- **Concentración de catalizador:** En el capítulo anterior se mencionó que las zeolitas son los catalizadores más usados en el proceso de pirolisis por su alta actividad catalítica, un alto intercambio iónico, estabilidad térmica y alta selectividad, sin embargo, este compuesto tiene un costo elevado sin mencionar su difícil acceso, por lo tanto, será sustituido por una roca volcánica llamada pumita ya que cuenta con una composición similar a la de las zeolitas que fue evidenciado en investigaciones previas⁸⁴ como lo muestra la tabla 3.

Tabla 3. Composición química de la zeolita y pumita

Composición	Zeolita	Pumita
SiO ₂	66	74
AlO ₂	10,1	12,6
Fe ₂ O ₃	1,69	1,20
Ni	1,60	2,10
MgO	0,40	0,30

Fuente: VIZCAINO RAMÓN, Blanca Estela. Identificación y caracterización de la zeolita natural tipo clinoptilolita. Trabajo de grado metrología de la radiación. [s.l.]. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1998. p. 83

⁸¹ CALDERON Op. Cit., p. 44

⁸² ANUAR. Op. cit., p. 308-326.

⁸³ ANUAR SHAFFERINA. Op. Cit., p. 4

⁸⁴ VIZCAINO RAMÓN, Blanca Estela. Identificación y caracterización de la zeolita natural tipo clinoptilolita. Trabajo de grado metrología de la radiación. [s.l.]. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1998. p. 83

Figura 20. Catalizador utilizado



Fuente: elaboración propia

En estudios realizados para otras investigaciones⁸⁵ se encuentra que la concentración de catalizador presente en el proceso va del 5 a 15 % en relación con la cantidad de materia prima que ingresa en el mismo, logrando mayores rendimientos de gases incondensables y aceite pirolítico. A su vez se evidencio en trabajos anteriores ⁸⁶ como el uso de la pumita en un porcentaje del 5% logros mejores resultados en el proceso de pirolisis en plásticos, por consiguiente se eligen dos niveles de concentración de catalizador el primero sin el uso de catalizador es decir cero por ciento de catalizador en el proceso, esto con el fin de evaluar si se observan variaciones considerables en el rendimiento del aceite pirolítico y el segundo introduciendo 5% de catalizador en relación con la cantidad de materia prima que ingres es decir 25 g.

2.5.2 Variables no controladas. Son aquellas variables que tienen influencia dentro del proceso, pero al ser dependientes de otros parámetros no pueden ser controladas, en esta investigación la presión es una variable que depende de la temperatura, por lo tanto, solo será medida durante la fase experimental.

2.5.3 Variable respuesta. La variable respuesta o variable dependiente está representada por los resultados medibles que arrojaron los diferentes tratamientos⁸⁷. En este caso la variable respuesta es el rendimiento del aceite pirolítico quien dará respuesta a el efecto que tiene la temperatura y concentración de catalizador sobre este. El rendimiento del aceite pirolítico estará dado por la siguiente ecuación:

⁸⁵ MIANDAD, Op. cit., p. 822-838.

⁸⁶ MORENO. Op. Cit., p. 62

⁸⁷ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México D.F. McGraw Hill Publishing Co. 2012. 487 p.

Ecuación 1. Rendimiento del producto ⁸⁸

$$\text{Rendimiento del producto \%} = \frac{\text{producto deseado (g)}}{\text{total alimentado (g)}} * 100$$

2.5.4 Planteamiento de la hipótesis. A través de un análisis estadístico de varianza (ANOVA) se plantea la hipótesis correspondiente para medir el efecto de las variables sobre el rendimiento en la producción de aceite pirolítico. El análisis estadístico fue realizado en el programa R studio para Windows versión 3.6.3. e IBM SPSS Statistics version 25⁸⁹

Para cada factor e interacción entre factores existen dos tipos de afirmaciones; una hipótesis nula (H_0) donde se establece que no existe efecto de los factores sobre la variable respuesta y una hipótesis alternativa (H_i) la cual será lo opuesto a la hipótesis nula y será la que se desea demostrar.

• Factor temperatura

- $H_0: \alpha = 0 \rightarrow$ No hay efecto de la temperatura en el rendimiento del aceite pirolítico
- $H_i: \alpha \neq 0 \rightarrow$ Hay efecto de la temperatura en el rendimiento del aceite pirolítico

• Factor concentración de catalizador

- $H_0: \beta = 0 \rightarrow$ No hay efecto del factor concentración del catalizador en el rendimiento del aceite pirolítico.
- $H_i: \beta \neq 0 \rightarrow$ Hay efecto del factor concentración del catalizador en el rendimiento del aceite pirolítico.

• Interacción entre factores

- $H_0: \alpha\beta = 0 \rightarrow$ No hay efecto de la interacción de factores en el rendimiento de aceite pirolítico.
- $H_i: \alpha\beta \neq 0 \rightarrow$ Hay efecto de la interacción de factores en el rendimiento de aceite pirolítico.

2.5.5 Elección del diseño experimental. Para la ejecución de la experimentación se eligió un diseño factorial 2^2 , la temperatura cuenta con dos niveles (550 °C y 650 °C) y la concentración de catalizador con dos niveles (0 y 5 % p/p). De esta manera

⁸⁸ ANUAR. Op cit, p.2

⁸⁹ IBM SPSS SOFTWARE, IBM SPSS Statistics versión 25, [sitio web]. Disponible en: <https://www.ibm.com/co-es/analytics/spss-statistics-software>

se evaluará el efecto de la temperatura y la concentración de catalizador en el rendimiento de aceite pirolítico, además de la interacción entre los dos factores.

Se realiza una repetición en cada tratamiento, es decir que hay un duplicado por cada condición a evaluar; ya que se desea analizar el efecto de cada factor por separado y la interacción entre ellos se combinan los dos niveles de temperatura y concentración de catalizador.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula se utiliza la distribución de Fisher⁹⁰, cuyo objetivo es hallar un $F_{calculado}$ el cual es calculado a partir de los resultados obtenidos de la experimentación; este valor es comparado con un valor teórico tomado de las tablas de fisher. Una hipótesis nula es aceptada cuando $F_{teorico} > F_{calculado}$ y una hipótesis alternativa es aceptada cuando pasa lo contrario. El $F_{calculado}$ se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Cálculo de la distribución de fisher ⁹¹

$$F_{calculado} = \frac{CME_{TR}}{CMD_{ER}}$$

Donde:

CME_{TR} = valor de cuadrados medios entre factores

CMD_{ER} = valor de cuadrados medios dentro de los factores , error residual

2.5.6 Experimentación. Para la evaluación del proceso de pirolisis y el efecto de los factores anteriormente mencionados en el rendimiento del aceite pirolítico se desarrollaron 8 corridas -ver Anexo B- con los valores definidos para las variables controladas como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Valores para las variables controladas

variable	valor	
Cantidad de materia (g)	500	
Tiempo de residencia (h)	4	
Temperatura (°C)	550	650
Concentración de catalizador (%p/p)	0	5

Fuente: elaboración propia

⁹⁰ MONTGOMERY, Douglas. Diseño Y Análisis De Experimentos 2da ed. Arizona: Limusa Wiley, 2004. p. 32

⁹¹ SERRET, Jaime. Manual de estadística universitaria: Madrid, España: ESIC, 1995. p. 204.

Para llevar a cabo el proceso de pirolisis en cada una de las corridas se tuvo en cuenta el proceso dado por Laboratorios Dr. Calderón⁹² (centro de investigación donde opera la planta de pirolisis a nivel laboratorio) el cual se describe a continuación:

1. Pesar 100g de materia prima e introducirlo en la marmita de forma que quede compactado; hacer este mismo procedimiento hasta llegar a los 500 g de materia prima establecidos
2. Colocar el empaque correspondiente en la boca de la marmita y sellar muy bien para evitar fugas
3. Introducir 2,5 L de agua en el condensador y asegurar el equipo fijando bien las piezas para evitar que se aflojen por el calor
4. Verificar que todo se encuentre asegurado y en su sitio; colocar la termocupla, fijar la válvula de alivio y ajustar la manguera de la tea.
5. Encender el equipo, configurar la temperatura deseada y verificar la presión del manómetro
6. Tomar los valores de temperatura y presión cada 10 minutos para el control del proceso hasta completar el tiempo establecido en este caso 4 horas.
7. Finalizado el tiempo establecido se debe apagar el equipo y después de 30 minutos se le retira la válvula de alivio y la manguera de conexión a la tea, esto con el fin de no generar vacío y que los líquidos del condensador se devuelvan a la marmita.
8. El equipo debe llegar a temperatura ambiente para poder ser retirados los productos del condensador y la marmita
9. Extraer el producto líquido que se encuentra en el condensador por diferencia de fases saliendo primero el agua en otro recipiente dejando la fase aceitosa (aceite pirolítico).
10. Retirar la carbonilla residual que se encuentra en la marmita
11. Determinar el peso de cada uno de los productos.

Con el fin de poder determinar los rendimientos de cada uno de los productos obtenidos se tuvo en cuenta el diagrama de flujo de proceso para la planta a nivel laboratorio que se observa en la figura 19. A partir de este diagrama se establece una ecuación del balance global del proceso, donde el agua se anula dentro de la ecuación ya que lo que la cantidad que entra al proceso de esta es igual a la cantidad que sale.

Ecuación 3. Balance global

$$M_{H_2O} + M_p + M_{cat} = M_{ac} + M_g + M_c + M_{H_2O}$$

⁹² CALDERON Op. Cit., p. 44

Donde:

Entradas

M_p = masa del polipropileno

M_{cat} = masa del catalizador

M_{H_2O} = masa de agua

Salidas

M_{ac} = masa de aceite pirolítico

M_g = masa de gases (calculada)

M_c = masa de carbonilla

M_{H_2O} = masa de agua

Una vez se ha realizado la respectiva experimentación, se calcula el rendimiento del aceite pirolítico teniendo en cuenta la distribución de bloques establecidas para el diseño experimental como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Distribución de los bloques para el diseño experimental

Bloque	Temperatura (°C)	Concentración de catalizador (% p/p)
1	550	0
1	650	0
1	550	5
1	650	5
2	550	0
2	650	0
2	550	5
2	650	5

Fuente: elaboración propia

2.6 CARACTERIZACION DEL ACEITE PIROLITICO

Con el fin de realizar un análisis completo del proceso se realiza la caracterización de las ocho muestras de aceite pirolítico obtenido, a través de la cuantificación del poder calorífico con sus respectivas replicas.

- **Determinación del poder calorífico**

El poder calorífico es una característica importante en un aceite pirolítico ya que este cuantifica la cantidad de calor que entrega una unidad másica o volumétrica

de la muestra al oxidarse de forma completa⁹³, es decir, la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión. Por lo tanto, esta propiedad se podría considerar como un parámetro a tener en cuenta en la consideración del aceite pirolítico como un posible combustible. El poder calorífico se clasifica en dos tipos; el poder calorífico inferior y superior, donde la diferencia se encuentra en que el primero incluye la energía empleada para vaporizar el agua contenida en el material original o formada durante la combustión del proceso y el segundo la excluye⁹⁴.

Para los combustibles líquidos como lo es el aceite pirolítico se presentan distintos métodos para su determinación, el más utilizado se basa en la norma DIN 51900-3⁹⁵, donde se utiliza una bomba calorimétrica para la determinación del poder calorífico superior.

⁹³ FUENTES PÉREZ, Alfonso. Herramienta para el cálculo de la combustión en generadores térmicos: combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. 2015. p. 18

⁹⁴ LOPEZ, armando; MALDONADO, Yadira; GUARDADO, juan y colaboradores. Determinación del poder calorífico de combustibles líquidos y sólidos. México. 2018

⁹⁵ DIN 51900-3, Testing of solid and liquid fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value - Part 3: Method using adiabatic jacket, 2020, www.standards.globalspec.com

3. RESULTADOS Y ANALISIS

En el siguiente capítulo se exponen los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima y su efecto en el rendimiento del aceite pirolítico; de igual manera se muestran los resultados del diseño experimental, con el desarrollo del ANOVA y su análisis respetivo, también se presenta los rendimientos de aceite pirolítico obtenidos y su posterior caracterización.

3.1 ANÁLISIS DEL POLIPROPILENO COMO MATERIA PRIMA

La caracterización de la materia prima se realizó a través de una revisión bibliográfica de diferentes artículos ^{96, 97, 98, 99}, en los cuales se observan los resultados obtenidos del análisis del polipropileno considerando variables el contenido de humedad, el porcentaje de cenizas, el material volátil y el carbón fijo, ya que como se mencionó anteriormente son factores primordiales que tienen efecto significativo en el rendimiento del aceite pirolítico.

A continuación, en la tabla 6, se muestra el consolidado de los resultados reportados en los diferentes artículos.

Tabla 6. Resultados análisis de propiedades

Autor	Articulo	% Humedad	% Cenizas	% Material volátil	% Carbón fijo	% Aceite pirolítico
SHAFFERINA	1	0	0,36	99,64	0	87
FAISAL	2	0,15	3,55	95,08	1,22	80
ABOULKAS	3	0	0,4	99,6	0	88
AHMAD	4	0	0,01	99,9	0,09	81

Fuente: elaboración propia

En el primer artículo se puede evidenciar un bajo porcentaje casi nulo de contenido de humedad el cual beneficiará la densidad resultante del aceite pirolítico, también

⁹⁶ SHAFFERINA Dayana ANUAR Sharuddin, FAISAL Abnisa, Wan Mohd Ashri Wan Daud, Mohamed Kheireddine Aroua. Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste.

⁹⁷ FAISAL Abnisa, A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil

⁹⁸ ABOULKAS A, HARFI K, BOUADILI A. Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. Energy Convers Manage

⁹⁹ AHMAD Imtiaz, KHAN Ismail, KHAN Hizbullah, TARIQ Razia, GUL Kashif y AHMAD Waqas. Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene in to premium oil products

se observa un porcentaje de cero de carbón fijo, un porcentaje de casi el 100% de material volátil lo cual contribuirá a un crecimiento en el rendimiento del aceite pirolítico obtenido y por último se observa un porcentaje de cenizas menor al 10% lo que corrobora el alto rendimiento obtenido de aceite pirolítico.

En el segundo artículo se puede evidenciar un registro porcentual de 0,15% en la cantidad de humedad y 1,22 % de carbón fijo presente en la muestra de polipropileno, este último causa la disminución de material volátil y por consiguiente se obtiene un menor rendimiento de aceite pirolítico en el artículo 2. El porcentaje de cenizas es mayor al del artículo anterior pero no sobre pasa el 10% por lo tanto no va a influir negativamente en el rendimiento del aceite.

El artículo número 3 evidencia una similitud importante con el artículo 1, donde el porcentaje de humedad y el porcentaje de carbón fijo tiene un valor de cero y a su vez se evidencia un porcentaje de rendimiento de aceite pirolítico alto al igual que en el artículo 1.

Para el artículo 4 se puede observar como el porcentaje de humedad y el de carbón fijo se asemeja a los obtenidos en los artículos 1 y 3, donde tiene un valor de cero y a su vez un valor cercano al 100% de material volátil proporcionando de esta manera altos rendimientos de aceite pirolítico.

3.1.1 Análisis de humedad. La revisión bibliográfica anteriormente analizada muestra un porcentaje de humedad entre el 0 y 0,15%, donde tres de los artículos tenían un valor de cero lo cual es favorable para la obtención de aceite en el proceso de pirólisis, el contenido máximo de agua en la materia prima debe ser del 10% ya que la reacción pirolítica generará un 2% de humedad, es decir un 12% de agua en el proceso de pirólisis¹⁰⁰, si se supera este contenido de humedad el aceite pirolítico obtenido tendrá una viscosidad baja como consecuencia de exceso de agua dentro de la composición del aceite crudo.

3.1.2 Análisis de cenizas. Un alto contenido de cenizas causa una disminución en el rendimiento del aceite pirolítico ya que provoca el aumento de temperatura del sistema generando más calor sin control inestabilizando el equipo¹⁰¹. El alto contenido de cenizas puede incrementar la producción de gases y carbón, como también la composición del aceite y su rendimiento debido a que son metales alcalinos¹⁰².

¹⁰⁰ BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. En: Biomass and Bioenergy. Mar. vol. 38, p. 68-94

¹⁰¹ ASADULLAH, M., et al. Jute stick pyrolysis for bio-oil production in fluidized bed reactor. En: Bioresource Technology. vol. 99, no. 1, p. 44-50

¹⁰² FAHMI, R., et al. The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability. En: Fuel. vol. 87, no. 7, p. 1230-1240

En los resultados reportados en los artículos anteriores se observó un porcentaje de cenizas entre 0,01 y 3.55% los cuales pueden considerarse bajos ya que está por debajo del 10%. Estos porcentajes benefician el proceso ya que se pueden obtener altos rendimientos de producto líquido y a su vez se evita la contaminación por metales¹⁰³.

3.1.3 Análisis de material volátil. Los resultados reportados en los artículos anteriores presentan valores entre 95,08 y 99.9% de material volátil, por consiguiente, se va a favorecer el rendimiento de producto líquido durante el proceso debido al alto contenido de material volátil¹⁰⁴. A su vez se ha evidenciado que altos porcentajes como los que se mencionaron anteriormente suelen convertirse en bioaceite después del proceso de condensación¹⁰⁵.

3.1.4 Análisis de carbón fijo. El contenido de carbón fijo es dependiente de las variables anteriores. Las concentraciones altas no favorecen la producción de aceite pirólítico, es decir, un porcentaje mínimo favorecerá el rendimiento del mismo¹⁰⁶. El valor máximo alcanzado de carbón fijo en los artículos anteriores fue de 1,22% siendo un porcentaje mínimo favorecerá el rendimiento del aceite pirólítico.

3.2 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizaron 8 experimentos como se había planteado en la tabla 5 en la que se observa la distribución de los bloques para el diseño experimental. A partir de estos experimentos y el uso de la ecuación 3 del balance global se obtiene los resultados de los rendimientos para cada producto.

En la Figura 21 se presentan los rendimientos de los productos del proceso de pirólisis. Los valores reportados se cuantifican como el promedio de los resultados experimentales incluyendo las réplicas.

En la figura 21. se puede observar que el rendimiento más alto de aceite pirólítico obtenido fue de 88,4% el cual se obtuvo a una temperatura de 550 °C y en ausencia de catalizador. También se observa que los rendimientos más altos de aceite pirólítico se obtuvieron en la ausencia del catalizador, por lo tanto la presencia del catalizador no aumentó el rendimiento del aceite pirólítico sino por el contrario lo disminuyó lo que a su vez aumentó el rendimiento de gases no condensables que

¹⁰³ AHMAD, Imtiaz, et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green Energy. Jul 3. vol. 12, no. 7, p. 663-671

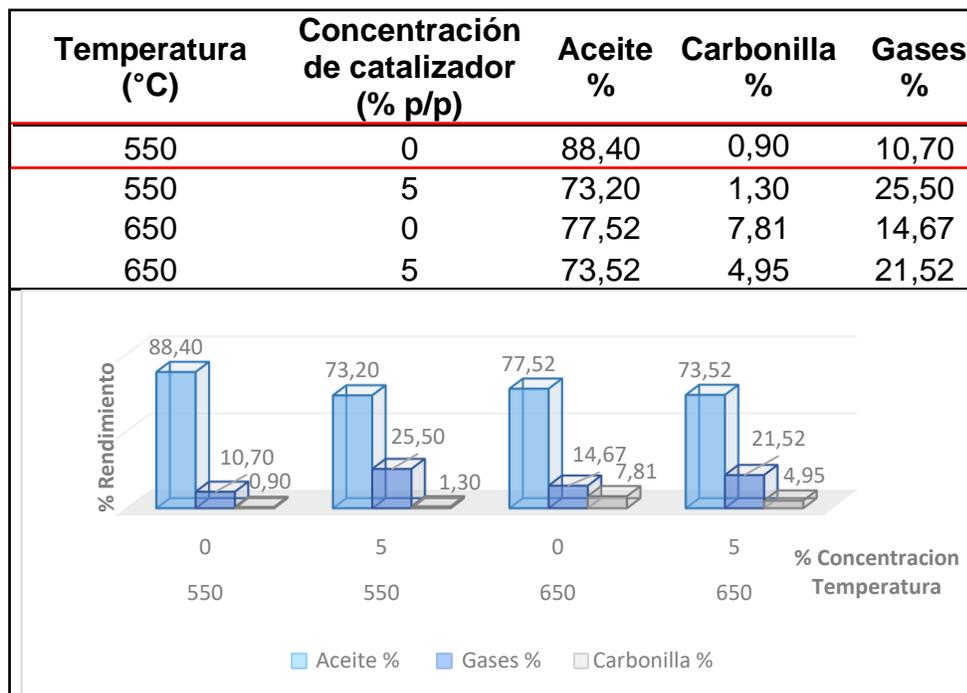
¹⁰⁴ ANUAR, Op. cit., p. 2

¹⁰⁵ ABNISA, Op. cit., p. 3

¹⁰⁶ Ibid., p. 5

paso de un 10.70% a 14.67% en la temperatura de 550°C y de un 14% a 15,43% en la temperatura de 650 °C.

Figura 21. Resultados de los rendimientos de los productos del proceso de pirólisis



Fuente: elaboración propia

El efecto que presenta el catalizador durante el proceso no es el esperado y esto puede justificarse debido a que el plástico alcanza la temperatura de cracking térmico mucho antes de ser lo suficientemente líquido como para tener un buen contacto con el catalizador; es allí donde la transferencia de masa y el contacto íntimo es muy precaria.¹⁰⁷

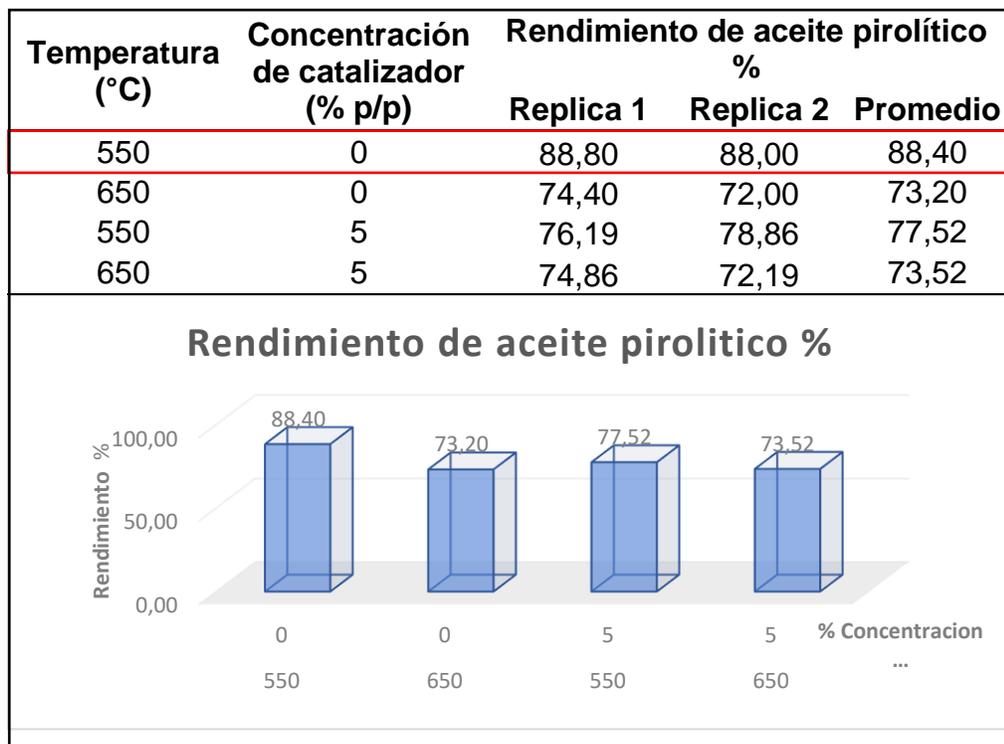
En los experimentos realizados con presencia de catalizador se observa una mayor producción de carbonilla debido a los residuos de pumita que no se degradaron completamente. Igualmente, durante este proceso se observó durante la fase experimental una mayor tasa de calentamiento y un aumento de la presión,

Dentro del diseño de experimentos se estableció como variable respuesta el rendimiento del aceite pirolítico, ya que es el producto del proceso con mayor interés; debido a su posible uso como combustible alternativo, por lo tanto, se

¹⁰⁷ CALDERON, Op. Cit., p. 103

muestra a continuación (ver figura 22) el rendimiento del aceite pirolítico para cada corrida con el fin de un análisis más específico.

Figura 22. Resultados del rendimiento del aceite pirolítico



Fuente: elaboración propia

El rendimiento del aceite pirolítico obtenido experimentalmente se encuentra entre el 88 y 76% lo cual coincide con investigaciones anteriores¹⁰⁸¹⁰⁹ las cuales presentaban al polipropileno como la materia prima con mejor rendimiento y comportamiento del proceso. También se puede observar que existe una gran similitud entre las réplicas realizadas evidenciando uniformidad en el craqueo del polipropileno post industrial.

Con el fin de comprobar el efecto que tienen los factores y la interacción entre ellos en el rendimiento del aceite pirolítico se lleva a cabo un análisis estadístico de varianza ANOVA mediante el cual se podrán negar o aceptar las hipótesis planteadas anteriormente y a través de una regresión lineal múltiple de los datos

¹⁰⁸ ABOULKAS A, HARFI K, BOUADILI A Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. Energy Convers Manage

¹⁰⁹ AHMAD, Imtiaz, et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green Energy. Jul 3. vol. 12, no. 7, p. 663-671

obtenidos se pueda dar un ajuste a un modelo matemático que permita predecir el valor de la variable dependiente en función de la temperatura y la concentración de catalizador.

3.2.1 Análisis estadístico de varianza. Después del planteamiento de hipótesis y la obtención de los datos del diseño de experimentos descritos en las Figuras 21 y 22, se dispone a la realización de la tabla ANOVA mediante el programa estadístico R studio versión 3.6.3¹¹⁰ e IBM SPSS Statistics version 25¹¹¹ cuyos datos se observan en la tabla 7 que se presenta a continuación:

Tabla 7. Análisis de varianza ANOVA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temperatura	1	184.3	184.3	71.38	0.001075
Catalizador	1	55.65	55.65	21.55	0.009717
Temperatura: Catalizador	1	62.72	62.72	24.29	0.007882

Fuente: R studio 2019, R studio para Windows, versión 3.6.3

La tabla ANOVA muestra los resultados del análisis estadístico para la temperatura, concentración de catalizador y la interacción entre los dos factores. Se tuvo en cuenta un nivel de significancia α de 0,05 el cual representa la probabilidad de cometer errores dentro de la experimentación siendo un valor significativo. La interpretación de este tipo de análisis se realiza normalmente a través de la comparación del valor de F calculado con el F establecido en tablas, pero en este caso el programa R studio versión 3.6.3 ¹¹²genera una columna de probabilidad (Pr) que permite rechazar la hipótesis nula si este valor se encuentra por debajo del nivel de significancia escogido.

Se puede observar que los valores obtenidos en la columna de probabilidad se encuentran por debajo del valor de 0.05 que es el nivel de significancia escogido para este diseño de experimentos, por lo tanto, la hipótesis nula se rechaza para ambos factores incluyendo la interacción entre ambos, es decir que la temperatura, la concentración de catalizador y la interacción entre estos dos factores tienen efecto significativo en el rendimiento del aceite pirolítico así como también, siendo

¹¹⁰R STUDIO TEAM, R Studio, [sitio web]. Disponible en:

<https://rstudio.com/products/rstudio/download/>

¹¹¹ IBM SPSS SOFTWARE, IBM SPSS Statistics versión 25, [sitio web]. Disponible en:

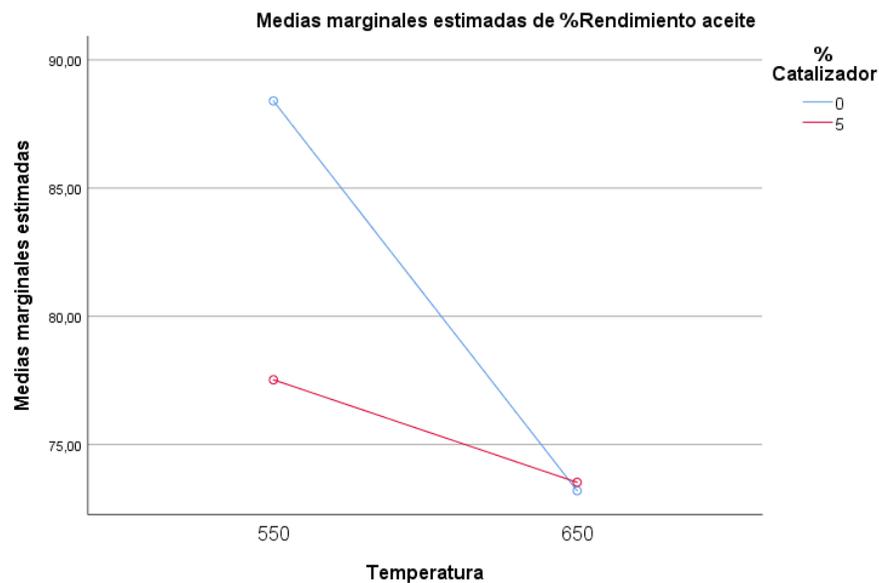
<https://www.ibm.com/co-es/analytics/spss-statistics-software>

¹¹² R STUDIO. Op. Cit., <https://rstudio.com/products/rstudio/download/>

la temperatura la variable con mayor significancia ya que obtuvo el menor valor de Pr de las reportadas en la Tabla 7.

En la grafica 1 se observa la tendencia de los datos experimentales del rendimiento del aceite pirolitico, donde se evidencia que el aumento de la temperatura arroja valores bajos de rendimiento de aceite, además al aumentar la concentración de catalizador el rendimiento es menor

Grafica 1. Interaccion de factores con la variable respuesta



Fuente: IBM Corp.2019, IBM SPSS Statistics, Version 25

Para poder describir el efecto que tienen los factores en el rendimiento del aceite pirolitico de una forma numérica, se busca el ajuste de los datos experimentales a un modelo de regresión lineal, donde a través de este se podrá predecir el rendimiento del aceite a partir de la temperatura y concentración de catalizador.

Con el objetivo de confirmar el ajuste de los datos experimentales al modelo se calcula un R cuadrado el cual es una medida estadística que representa que tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada donde altos porcentajes indica que el modelo explica toda la variabilidad de los datos¹¹³. Como se observa en la tabla 8, se obtuvo un valor para R cuadrado de 96,7% el cual indica el

¹¹³ Editor, M., 2020. Análisis De Regresión: Interpretar El R-Cuadrado Y Evaluar La Bondad De Ajuste [sitio web] Disponible en: <https://blog.minitab.com/es/analisis-de-regresion-como-puedo-interpretar-el-r-cuadrado-y-evaluar-la-bondad-de-ajuste>

porcentaje de varianza del rendimiento del aceite pirolítico. Como el valor obtenido es mayor del 95% la regresión lineal es un modelo que se ajusta adecuadamente a los datos experimentales.

En los modelos de regresión lineal múltiple como es el caso se cuenta con más de una variable independiente, por lo tanto, es necesario el cálculo de un R cuadrado ajustado el cual permite verificar la efectividad que tienen las variables independientes de explicar la dependiente. Como se observa en la Tabla 8 el R cuadrado ajustado tiene un valor de 94%.

Tabla 8. Modelo de regresión lineal

Observations	Residual Std. Error	R ²	Adjusted R ²
8	1.61	0.97	0.94

Fuente: Rstudio 2019, Rstudio para Windows, version 3.6.3

Después de confirmar el ajuste de los datos experimentales al modelo de regresión lineal se obtiene la tabla 9. A través del programa R studio versión 3.6.3 donde se pueden observar los coeficientes que le darán forma a la ecuación 2 del modelo matemático.

Tabla 9. Coeficientes del modelo de regresión lineal

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	172	9.67	17.78	5.882e-05
Temperatura	-0.15	0.02	-9.46	0.0006
Catalizador	-14.5	2.74	-5.29	0.0061
Temperatura: Catalizador	0.02	0.004	4.93	0.0078

Fuente: Rstudio 2019, Rstudio para Windows, version 3.6.3

La ecuación de regresión lineal representa el efecto que tiene los factores en la variable de respuesta (ver ecuación 4). Los coeficientes que se observan resaltados en la Tabla 9 se multiplican por la variable respectiva.

Ecuación 4. Modelo de regresión lineal

$$\begin{aligned}
 \text{Rendimiento de aceite (\%)} &= B_0 + B_1T + B_2C + B_3TC \\
 \text{Rendimiento de aceite (\%)} &= 172 - 0.152T - 14.49C + 0,0224TC
 \end{aligned}$$

Donde:

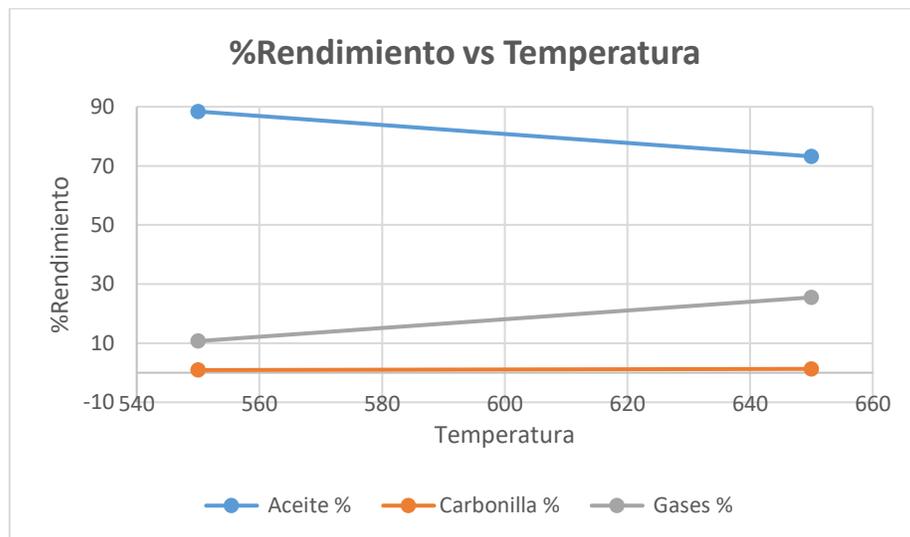
$T = \text{temperatura } ^\circ\text{C}$

$C = \text{Concentracion del catalizador}$

De este modo se obtiene un rendimiento de 88,4% de aceite a una temperatura de 550°C y una concentracion de catalizador de 0%. De igual manera se puede determinar la temperatura del proceso o la concentracion de catalizador teniendo un valor de rendimiento de aceite. Este modelo resulta util para la optimizacion del proceso de pirolisis ya que se pueden encontrar las variables del diseño que daran los mejores resultados.

La variable mas importante durante el proceso es la temperatura por ello en la Grafica 2 y 3 se observa la relacion del rendimiento de los productos obtenidos con la temperatura. Tambien se observa como el rendimiento de aceite pirolitico disminuye al aumentar la temperatura en ausencia de catalizador a diferencia de los productos gaseosos que aumentan al aumentar la temperatura. La carbonilla no se observa afectada por el aumento de la temperatura debido a que su porcentaje dentro de los productos es demasiado bajo.

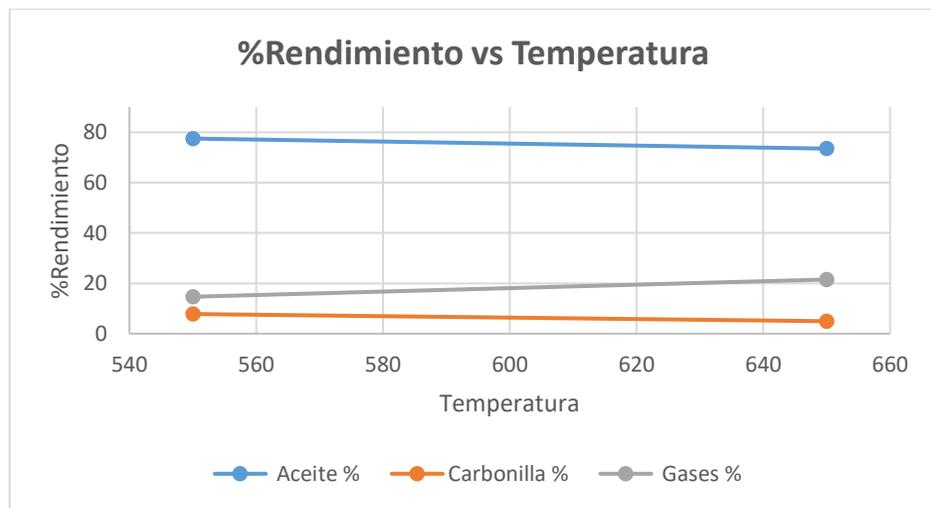
Grafica 2. Relacion entre el rendimiento de los productos y la temperatura en ausencia de catalizador



Fuente: elaboracion propia

En la Grafica 3 se observa una disminucion casi imperceptible del rendimiento de aceite pirolitico al aumentar la temperatura en presencia de catalizador a diferencia de los productos gaseosos que aumentan al aumentar la temperatura. Al final del proceso se tiene la carbonilla junto con el catalizador remanente, por lo tanto, se observa un mayor porcentaje de productos solidos los cuales disminuyen conforme aumenta la temperatura.

Grafica 3. Relacion entre el rendimiento de los productos y la temperatura en presencia de catalizador



Fuente: elaboracion propia

3.3 ANÁLISIS DEL ACEITE PIROLITICO

Luego de realizar los ocho experimentos con las condiciones previamente seleccionadas, se observa una diferencia de color y consistencia de los aceites obtenidos en ausencia de catalizador con los que tenían una concentración del 5 % de pumita por lo tanto en la Figura 23 (a) se muestran los aceites obtenidos en ausencia de catalizador y en la Figura 23 (b) corresponde a aquellos obtenidos con 5% p/p de catalizador. En las figuras mostradas se encuentran los aceites obtenidos a 550°C y 650°C.

Figura 23. Aceites pirolíticos obtenidos



Fuente: elaboración propia

A pesar que el diseño de experimentos evidencia que la presencia de catalizador durante el proceso de pirólisis disminuye el rendimiento del aceite pirolítico, no se debe descartar que el catalizador permita obtener aceites de mejor calidad; ya que como se observa en la figura 23 los aceites pirolíticos obtenidos con un aumento en la concentración de catalizador presentan un color más claro debido a la presencia de compuestos de cadena corta en la mezcla líquida de hidrocarburos¹¹⁴, además de presentar una consistencia con menor viscosidad indicando un cambio en la calidad del aceite pirolítico obtenido.

3.3.1 Poder calorífico. Para la caracterización de los aceites pirolíticos obtenidos durante el proceso se determinó el poder calorífico a través de una bomba calorimétrica LBC 418 para cada una de las muestras como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de poder calorífico para aceite pirolítico

Temperatura (°C)	Concentración de catalizador (% p/p)	Poder calorífico MJ/Kg		
		Replica 1	Replica 2	Promedio
550	0	42,82	44,63	43,73
650	0	42,25	43,20	42,72
550	5	43,56	42,32	42,94
650	5	41,12	43,66	42,39

Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos de estas pruebas evidencian que el valor más alto de poder calorífico alcanzado fue de 43,73 MJ/Kg perteneciente al aceite pirolítico obtenido a 550°C y en ausencia de catalizador, seguido por el aceite obtenido a la

¹¹⁴ CALDERON, Op. Cit., p. 103

misma temperatura, pero con una concentración del 5% p/p de catalizador que obtuvo 42,94 MJ/Kg. De lo anterior se puede concluir que la concentración de catalizador presente durante el proceso no tiene efecto en el aumento del poder calorífico del producto final ya que se obtuvieron valores cercanos en las ocho muestras.

Para la comparación de los resultados obtenidos del poder calorífico de las muestras experimentales se hace uso de la Tabla 11, donde se observa algunas de las características de tres combustibles comerciales como lo son la gasolina, Diesel y querosene, donde los valores observados en la Tabla 10, son similares a los del Diesel ya que a este le corresponde un valor de 44,11 MJ/Kg. De lo anterior podemos concluir que con base a las mediciones de poder calorífico los aceites pirolíticos obtenidos a partir de polipropileno post industrial a temperatura de 550°C y en ausencia de catalizador pueden llegar a considerarse un combustible alternativo; cabe aclarar que se deben cumplir con más características según la NTC 1438 que establece las especificaciones y métodos a utilizar para determinar parámetros para combustibles de motor tipo Diesel en Colombia.¹¹⁵

Tabla 11. Caracterización de combustibles

Combustible	Densidad (g/ml)	Poder calorífico MJ/kg
Gasolina	0,73	46,80
Diesel	0,85	44,11
Queroseno	0,7	46,50

Fuente: Entidad supervisora independiente de proyectos energéticos S.I.U

¹¹⁵ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA PDF. (2019). [sitio web], Disponible en: <https://docplayer.es/10959244-Norma-tecnica-colombiana-1438.html>

4. DISEÑO CONCEPTUAL

El diseño conceptual o de síntesis de proceso a escala piloto es la etapa en la cual se identifica la viabilidad tanto técnica como económica del proyecto y es la que marca la pauta para el desarrollo del diseño básico y la ingeniería al detalle; en esta etapa se arma la topología del proceso, es decir, el esquema o diagrama de flujo básico que representa la secuencia de operaciones necesarias para transformar las materias primas en los productos deseados. En este capítulo se desarrollará el diseño conceptual de la siguiente manera:

- I. Análisis de mercado del aceite pirolítico en Colombia
- II. Parametrización de criterios de diseño con respecto a: tipo de pirolisis, materia prima y los productos a obtener
- III. A partir de rendimientos experimentales obtenidos en el capítulo anterior determinar condición de operaciones como temperatura y presión.
- IV. Selección de equipos principales que conforman la planta según revisión bibliográfica
- V. Identificación del Diagrama de Bloques y de Flujo de Proceso junto a las corrientes involucradas en los equipos
- VI. Balance de masa y energía.

4.1 ANALISIS DE MERCADO DE ACEITE PIROLITICO EN COLOMBIA

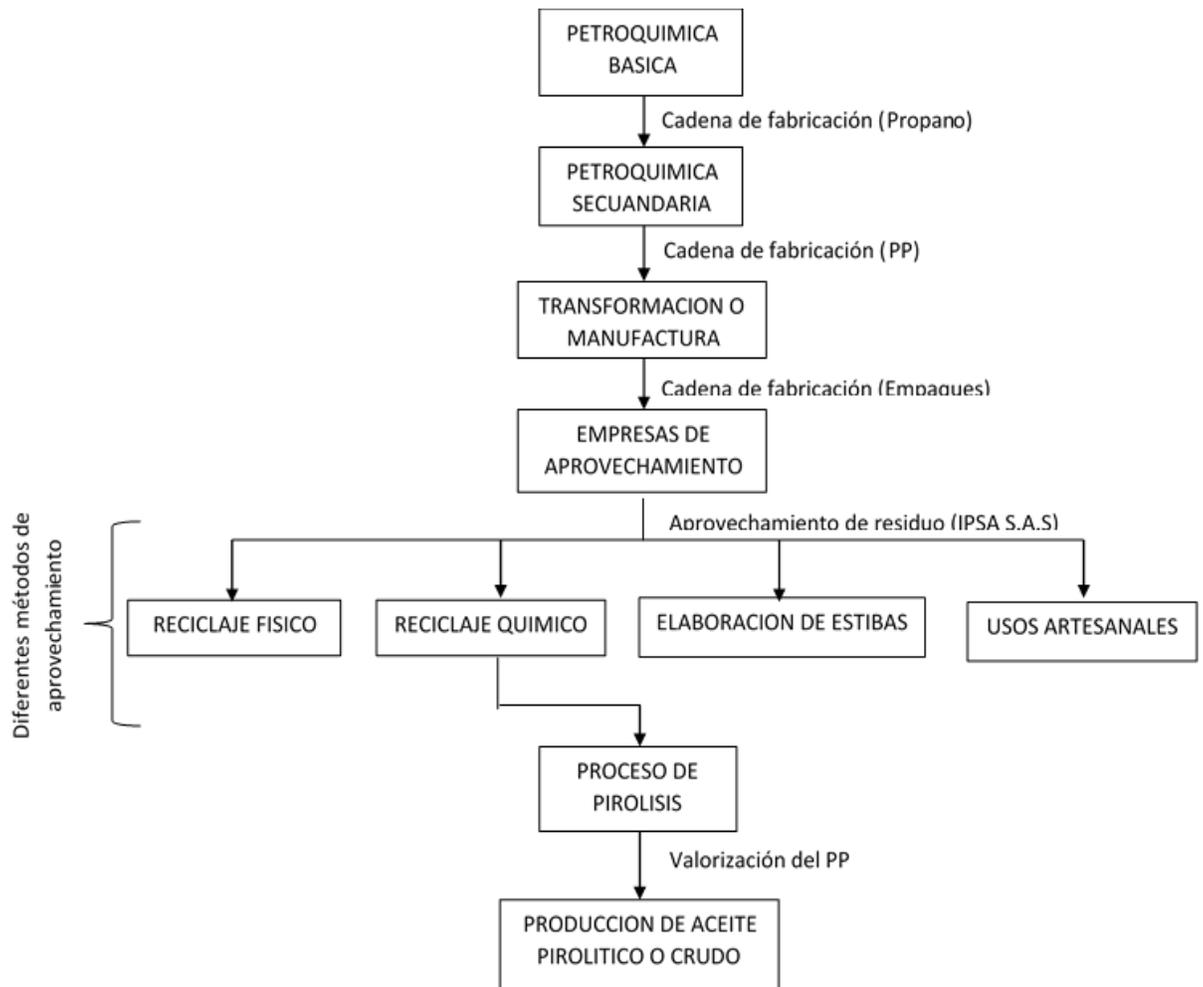
Un análisis de mercado tiene como finalidad analizar la oferta y la demanda de un producto o servicio concreto y cuál sería la población dispuesta a adquirirlo para satisfacer sus necesidades. En este proyecto el producto a analizar es al aceite crudo obtenido del proceso de pirolisis de plásticos; el cual corresponde a un producto o bien industrial que puede ser utilizado en mezcla con otros combustibles y como combustible en procesos de calentamiento.

Para llevar a cabo el diseño conceptual primero se realiza un pequeño estudio de mercado, donde se analizará el producto, el consumidor y el mercado actual del aceite crudo en Colombia basado en datos obtenidos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

4.1.1 Cadena de valor. Es una herramienta de análisis interno que permite estudiar las principales actividades económicas que son necesarias para una

industria o empresa produzca y comercialice los bienes o servicios que ofrezca¹¹⁶, con el fin de describir cuál de ellas generar un valor o una ventaja competitiva en el producto final. En la Figura 24 se observa la cadena de valor del aceite crudo que inicia desde la elaboración del polipropileno en la industria petroquímica hasta el proceso de pirolisis.

Figura 24. Cadena de valor del aceite crudo a partir de polipropileno post industrial.



Fuente: elaboración propia

¹¹⁶ MIRANDA, Juan José. Estructura Financiera del Proyecto. En: Gestión de Proyectos: Identificación-Formulación- Evaluación Financiera, Económica, Social, Ambiental. 4 ed. MM Editores. Bogotá D. C., 2003. p. 89-92.

Como se observa en la Figura 24 la cadena de valor inicia desde la elaboración del propano en la industria petroquímica básica, seguido de la industria petroquímica secundaria y la manufactura de empaques donde se generan los residuos de polipropileno los cuales constituyen la materia prima para diversos procesos de aprovechamiento como el reciclaje físico, la reutilización artesanal y la producción de estibas, sin embargo se selecciona como proceso de aprovechamiento y valorización la pirolisis para la producción de aceite crudo que es el producto de interés de este proyecto.

4.1.2 Código de clasificación industrial internacional y código arancelario.

Con el propósito de clasificar las actividades económicas de los empresarios de manera más precisa, la cámara de comercio a partir del año 2000 se rige por la Clasificación Internacional Uniforme (CIIU).¹¹⁷ junto con el código arancelario para aquellos productos que pasen por el proceso de importación y exportación. El aceite crudo corresponde al sector industrial y/o manufacturero y está identificado por los códigos anteriormente descritos como se evidencia en la Tabla 12.

Tabla 12. Código CIIU y arancelario del aceite crudo en Colombia

Producto	Código CIIU	Código Arancelario
Aceite crudo	D232202	2710192100

Fuente: elaboración propia

De lo anterior se puede agregar que la actividad económica descrita por el código CIIU que muestra la Tabla 13, es la fabricación de combustibles fuera de refinería¹¹⁸ y el código arancelario está especificado para Gasóleo¹¹⁹.

4.1.3 Fuerzas de Porter. Para llevar a cabo un análisis estructural de la industria y de esta manera comprender la estructura competitiva, se empleó las cinco fuerzas de Porter las cuales son: la rivalidad entre los competidores, el poder de negociación de los proveedores, el poder de negociación de los compradores, la amenaza de entrada de nuevos competidores y la fuerza de los productos sustitutos.¹²⁰

¹¹⁷ CAMARA DE COMERCIO DE BOGOTA. [En línea] [Citado 22 June 2020]. Disponible en: http://recursos.ccb.org.co/ccb/instructivos/acerca_CIIU/01.html

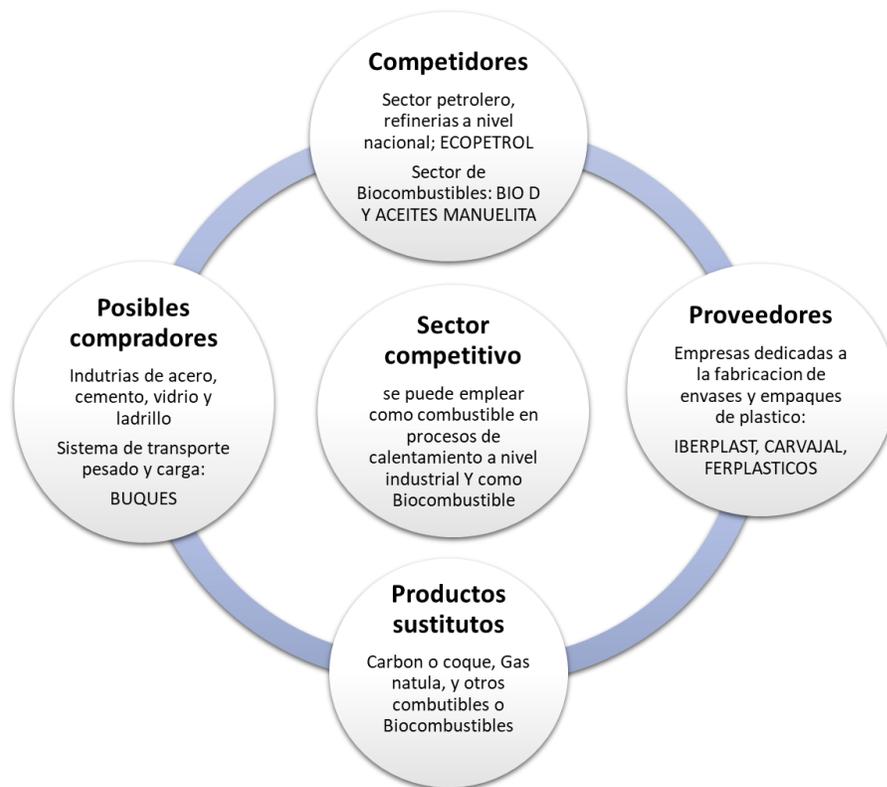
¹¹⁸ CRAUTONOMA. Listado CIIU. 2004 [En línea] [Citado 22 June 2020]. Disponible en: <http://www.crautonomia.gov.co/normasambiental/Organizacional/Listado%20CIIU.pdf>

¹¹⁹ SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA VIGILANCIA DE LA CONTRATACIÓN ESTATAL. Listado Colombia. 2014 [En línea] [Citado 22 June 2020]. Disponible en: http://www.sice.oas.org/TPD/COL_PAN/Text_September2013_s/Ch_2_Annex2B_COL_s.pdf

¹²⁰ MICHAEL, PORTER, et al. Estrategia competitiva. Compañía Editorial Continental SA Décimo, 1991.

El aceite crudo o pirolítico se puede emplear como combustible en procesos de calentamiento a nivel industrial como hornos, quemadores, secadores y calderas; por lo tanto, puede ser usado por la industria del acero, vidrio, cemento y ladrillos. Como proveedores de la materia prima se encuentran las empresas de aprovechamientos de residuos plásticos y con respecto a los productos sustitutos el carbón es la mayor amenaza por su bajo valor en el mercado. Por último los principales competidores son la industria petrolera y otros combustibles.

Figura 25. Fuerzas de Porter para el aprovechamiento de PP postindustrial



Fuente: elaboración propia

4.1.4 Identificación de oferta y demanda. Debido a que el aceite pirolítico o aceite crudo a partir de plásticos es un producto relativamente nuevo, se analizará el comportamiento de la producción y ventas de Biodiesel obtenidos del boletín estadístico de minas y energía del año 2018¹²¹ en contraste con los aceites livianos

¹²¹UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICO (UPME), Colombia. Boletín Estadístico de Minas y Energía. [En Línea]. [Citado 25 junio, 2020]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf

y otros elaborados fuera de refinería por medio de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM) realizada por el DANE¹²², con el fin de analizar el comportamiento que tuvieron dichos valores en aras de entender el futuro comportamiento del aceite crudo a nivel comercial. En la Tabla 13 se pueden observar los datos de producción y ventas de biodiesel en miles de barriles desde el año 2015 al 2018.

Tabla 13. Producción y ventas de Biodiesel de 2015-2018

Año	Miles de barriles (KBL)	
	Producción	Ventas
2015	3773,15	3695,93
2016	3291,09	3314,53
2017	3333,76	3719,81
2018	3407,73	3822,61

Fuente: Boletín Estadístico de Minas y Energía, UPME, Modificado por autor

Se observa un comportamiento ascendente en los últimos años tanto de la producción como de las ventas de Biodiesel. Los valores reportados muestran un comportamiento esperado ya que los requerimientos de este producto están asociados a la demanda de combustibles como las gasolinas y ACPM.

En la Tabla 14 se presentan los registros históricos de producción y consumo de los aceites livianos y otros elaborados fuera de la refinería desde el año 2014 hasta el año 2017 los cuales son a nivel nacional y anual sin ninguna tipificación por sector o subsector industrial.

Tabla 14. Registros históricos de producción y ventas para aceites livianos y otros

Año	Miles de pesos (COP)	
	Producción	Ventas
2014	11896	14318
2015	13979	13825
2016	88331	73520
2017	147221	79693

Fuente: Encuesta anual de manufactura, DANE, Modificado por autor

¹²² DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE), Colombia. Encuesta Anual Manufacturera. [En Línea]. [Citado 25 junio, 2020]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufactureraenam/eam-historicos>

Se observa un comportamiento de los datos estacional en el año 2014 al 2015, pero a partir del año 2016 se presenta un crecimiento de la producción y ventas de aceites livianos, evidenciando de esta manera una demanda alta del producto.

4.2 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño son aquellas variables y factores que tienen el mayor impacto en el proceso, debido a esto son tenidas en cuenta para el desarrollo del mismo; dentro de estos criterios se encuentran: el tipo de proceso, materia prima, propiedades, temperaturas, presiones, etc.

4.2.1 Tipo de pirolisis. El tipo de pirolisis juega un papel importante ya que dependerá de este, el tipo de producto que se obtendrá en mayor proporción de los tres que tiene la pirolisis. Considerando los resultados obtenidos en el capítulo anterior en cuanto a rendimiento de aceite pirolítico se seleccionó una pirolisis térmica convencional. La cual se caracteriza por la utilización de calentamiento indirecto a presiones atmosféricas y en ausencia de catalizadores, además de permitir la obtención de los tres productos al finalizar el proceso.¹²³

4.2.2 Materia prima. La materia prima seleccionada es el polipropileno post industrial proporcionado por la empresa IPSA S.A.S proveniente de los desechos industriales de empaques de dulce en la ciudad de Cali.

Las condiciones físicas de la materia prima que se describen en el segundo capítulo de este trabajo son ideales para el proceso de pirolisis ya que no presenta un grado de suciedad alto ni trazas de tinta muy marcadas, además de tener una forma de tirillas finas que favorece el craqueo térmico. En cuanto a él análisis próximo del polipropileno se pudo concluir que un porcentaje de humedad bajo y de cenizas menor al 10% favorecía la reacción junto con un porcentaje alto de material volátil el cual significaba un rendimiento alto de aceite pirolítico en los productos.

4.2.3 Temperatura. La temperatura es una de las variables más importantes durante el proceso de pirolisis ya que tiene un efecto directo en el rendimiento de aceite pirolítico como se observó en los resultados del ANOVA. A partir de estos se pudo seleccionar una temperatura de operación de planta de 550°C debido a que fue esta la que presentó mejores resultados en las pruebas experimentales.

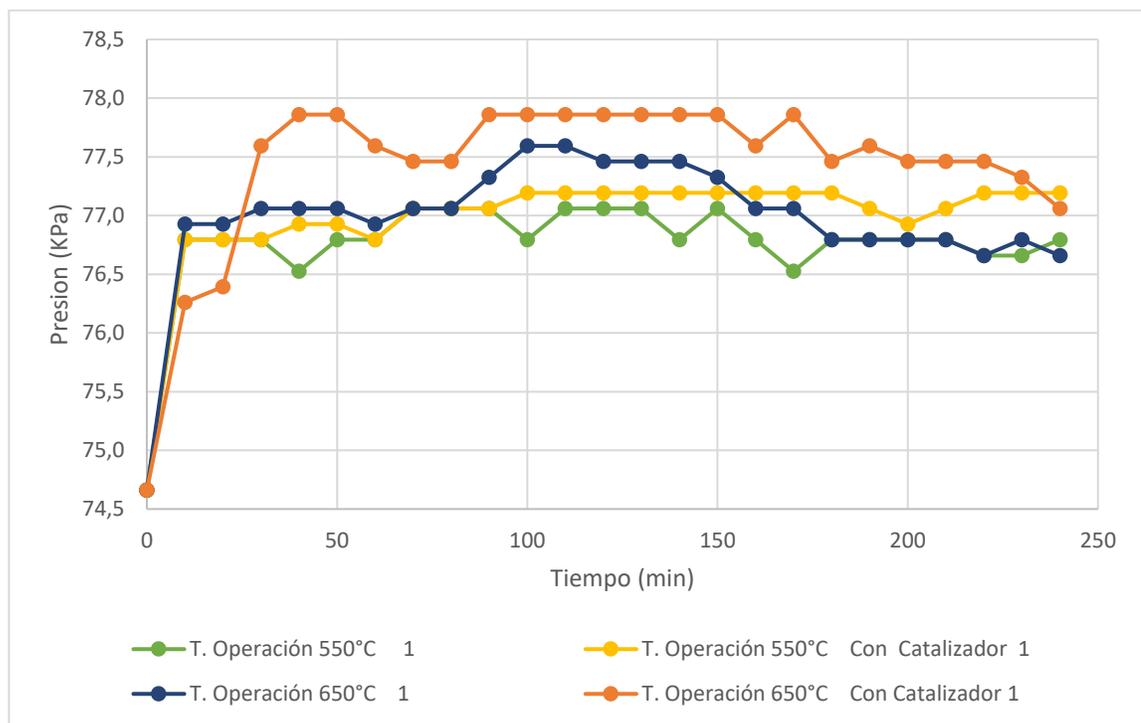
4.2.4 Presión. Otra variable a analizar es la presión del sistema la cual fue medida durante las pruebas experimentales a través de un medidor de presión diferencial

¹²³ MARTÍNEZ, J., et al. Waste tyre pyrolysis-A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. vol. 23, p. 198-199.

de agua. Con el fin de analizar el comportamiento de esta variable se graficó en función del tiempo para cada temperatura trabajada.

En la Grafica 4 se puede observar que la presión de operación no es mayor a 78 KPa o 585,04 mm Hg, esto indica que el proceso de pirolisis es viable a presión atmosférica, que para la ciudad de Bogotá D:C es de 560 mm Hg o 74,66 KPa¹²⁴. También se puede apreciar un aumento de presión cuando aumenta la temperatura a 650°C y cuando hay presencia de catalizador, esto último se debe al aumento de productos más livianos incondensables ya que durante la experimentación se observó más actividad en el quemador de gases cuando se tenía presencia de catalizador en el proceso.

Grafica 4. Comportamiento de la presión de operación a diferentes temperaturas



Fuente: elaboración propia

¹²⁴ INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), Colombia. Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo. [En línea]. [Citado 26 junio,2020]. Disponible en:<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>

4.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS

El diseño conceptual básico abarca la selección de equipos a partir de una búsqueda bibliográfica de diseños de plantas previos, contrastando cada una de las posibilidades con las condiciones de operación previamente descritas, se elegirán los equipos óptimos para cada operación necesaria durante el proceso teniendo como referencia el montaje utilizado a nivel laboratorio.

4.3.1 Unidad de reacción. Al escoger el tipo de reactor más adecuado para efectuar la reacción del proceso de pirolisis, son varios los factores que se deben tener en cuenta, como son aquellos inherentes a la reacción misma y otros como la duración del ciclo y aspectos de cargue de materia prima y descargue de productos finales como la carbonilla¹²⁵. Los principales tipos de reactores en la literatura y a nivel comercial son los siguientes:

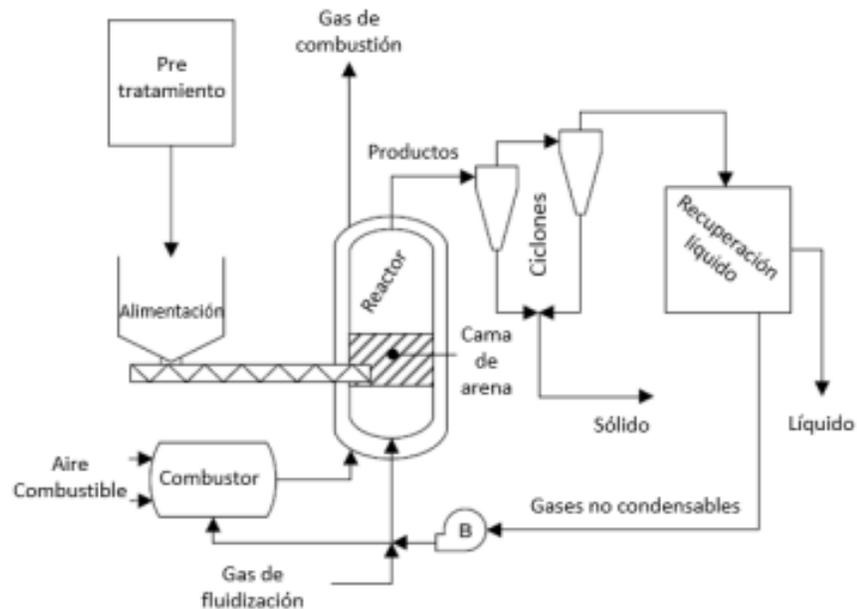
- **Reactor de lecho fluidizado.** Es el reactor por excelencia para las reacciones de cracking catalítico en la industria petrolera, además de ser uno de los más estudiados y desarrollados, tiene una configuración vertical y en procesos de pirolisis la materia prima es alimentado por la cima con el fin de que al llegar fondo del reactor entre en contacto con el medio fluidizado que por lo general es arena u otro solido inerte.¹²⁶ Utiliza como elemento de transferencia de calor el medio fluidizado que a su vez puede actuar de catalizador, el cual es calentado de manera directa o indirecta mediante la combustión donde cede el calor a los productos de reacción durante el ciclo de cracking.

Los productos obtenidos son extraídos por la cima del reactor junto con el medio fluidizado y la materia sólida y líquida es recuperada por medio de procesos de separación. En la figura 26 se observa un diagrama del proceso de pirolisis utilizando un reactor de lecho fluidizado el cual es calentado indirectamente por combustión, utilizando como carburante además del aire y el combustible los gases no condensados producto del proceso.

¹²⁵ CALDERON, Op. cit., p. 79

¹²⁶ FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirolisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Trabajo de grado para optar al título de Master en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2016. p. 15-17

Figura 26. Diagrama de un proceso de pirolisis con un reactor de lecho fluidizado

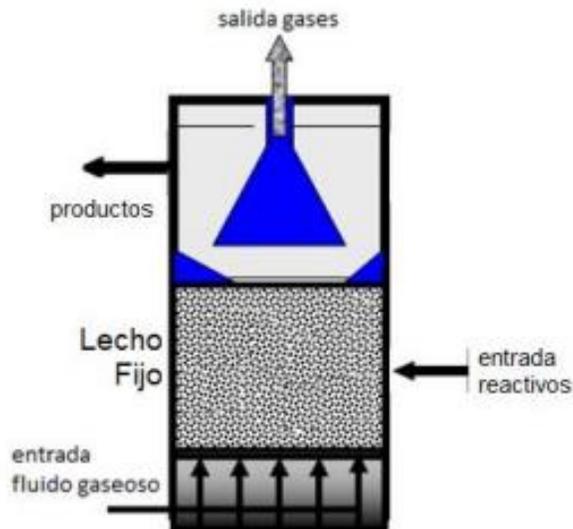


Fuente: J.N. Brown, "Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology," Iowa State University, 2009.

- **Reactor de lecho fijo.** Suelen ser recipientes verticales donde se sitúa el catalizador en una posición fija con respecto al reactor, permaneciendo inmóvil¹²⁷. El calentamiento se da en el fondo del reactor en la mayoría de los casos de forma indirecta lo que provoca un perfil térmico decadente a lo largo de las paredes. En estos reactores es posible que se utilicen corrientes de gas inerte con el objetivo de arrastrar la fracción volátil y evitar el reflejo de condensados y reacciones de craqueo secundarias. Desde el punto de vista mecánico presenta ventajas como su versatilidad y simpleza, pero grandes desventajas desde el punto de vista operativo, tales como la mala transferencia de calor y masa, la poca superficie de transferencia y la adherencia del coque al fondo dificultando la remoción de este producto al finalizar el proceso. En la figura 27 se muestra un diagrama de un reactor de lecho fijo junto con la descripción de entradas y salidas de materia prima y productos respectivamente.

¹²⁷ OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia. 2015.

Figura 27. Esquema de Reactor de lecho fijo



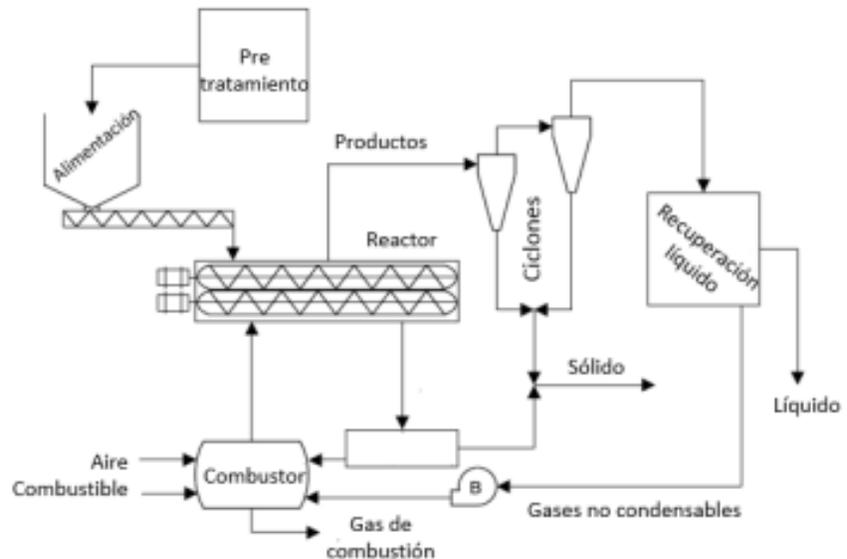
Fuente: OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia. 2015.

- **Reactor de tornillo sin fin.** Es un equipo que consiste en una tolva de entrada por donde ingresa la materia prima a un tornillo sin fin encargado de transportarla a través de un cilindro calentado donde se llevan a cabo las reacciones químicas¹²⁸; su principal característica es la ausencia de un gas de fluidización y que la transferencia de calor se realiza de un medio calefactor a el cuerpo de calentamiento, el tornillo, y de este a la masa de plástico. Debido a esto es el reactor más eficiente en cuanto a transferencia de calor, pero desde el punto mecánico es alta complejidad y elevado costo.

En la figura 28 se presenta un esquema de un proceso de pirolisis que emplea un reactor de tornillo sin fin doble, donde es utilizado un sistema de ciclones que separa la fase gaseosa de la sólida para posteriormente ser utilizada como combustible para la chaqueta de calentamiento del reactor.

¹²⁸ OBANDO, Op. cit., p. 8

Figura 28. Diagrama de un proceso de pirólisis con reactor de tornillo sin fin sin fin



Fuente: J.N. Brown, "Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology," Iowa State University, 2009.

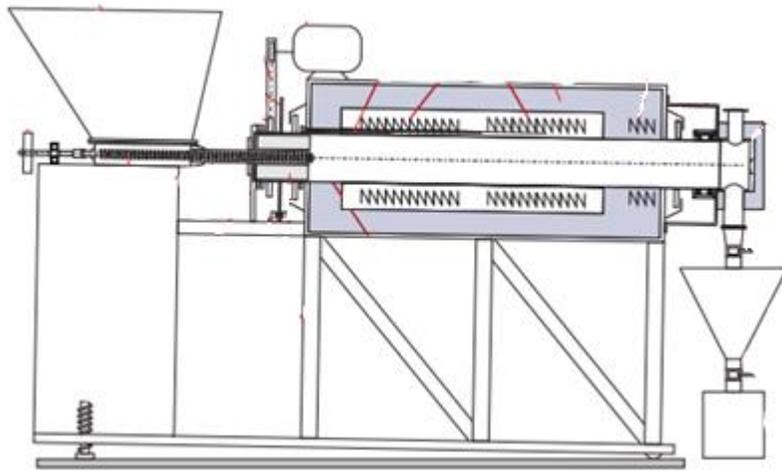
- **Reactor de horno rotatorio.** Los hornos rotatorios son usados en distintos procesos a nivel industrial como lo son el secado, mezclado, calcinación, pirólisis, gasificación y combustión en diversos tipos de materia prima; un reactor de horno rotatorio presenta diferentes ventajas como la elevada tolerancia para el procesamiento de diferentes materias primas con distintas propiedades químicas y físicas, además de la facilidad al manejar tiempos de residencia medios y altos de la fase volátil.¹²⁹ Otra de sus ventajas más marcadas es la transferencia de calor, ya que posee una gran superficie de calentamiento, comparada con un reactor vertical estacionario¹³⁰, lo que a su vez flexibiliza la remoción de la carbonilla o ceniza obtenida durante el proceso.

En la figura 29 se presenta un reactor de horno rotatorio con su tolva de alimentación, el tornillo de dosificación, la chaqueta de calentamiento, termocuplas y diferentes componentes que constituyen la estructura.

¹²⁹ MENDOZA GENEY, Libardo Enrique. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Ingeniería Mecatrónica, 2016.

¹³⁰ CALDERON, Op. cit., p. 82

Figura 29. Esquema de reactor de horno rotatorio para proceso de pirólisis de biosólidos



Fuente: MENDOZA GENEY, Libardo Enrique. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Ingeniería Mecatrónica, 2016.

Como método de decisión se utilizó una matriz de selección la cual incluye las cuatro alternativas de reactores descritas anteriormente junto con cuatro criterios de selección los cuales son la complejidad del reactor, el costo, el mantenimiento y la transferencia de calor. Donde se tendrá un criterio de evaluación para puntuar cada criterio, para la complejidad del reactor se valorará con un 5 al reactor menos complejo y con 1 al más complejo, para el costo del reactor se dará una puntuación de 5 al más económico y de 1 al más costoso, en el caso del mantenimiento se evaluará con 5 a la opción con mayor facilidad de mantenimiento y con 1 al reactor que presente una alta complejidad de mantenimiento, por ultimo para el criterio de transferencia de calor se puntuara con 1 al reactor con baja transferencia de calor y con 5 al reactor con alta transferencia de calor.

En la Tabla 15 se presentan la matriz de selección donde cada puntaje se adjudicó en base a la revisión bibliográfica de cada uno de los reactores propuestos. En cada una de las columnas se presentan las distintas opciones de reactores que se evaluarán y en las filas se observan los criterios de selección anteriormente mencionados. A su vez se incluye una columna de peso para cada criterio el cual establece el nivel de importancia que se estableció para cada uno de ellos, el cual será multiplicado por la puntuación asignada para cada criterio cuya sumatoria será la puntuación total de cada reactor.

Tabla 15. Matriz de selección de unidad de reacción

		ALTERNATIVAS DE DISEÑO				
		Peso	Reactor de lecho fluidizado	Reactor de lecho fijo	Reactor de tornillo sin fin	Reactor de horno rotatorio
CRITERIOS DE DISEÑO	Complejidad	2	2	4	1	3
	Transferencia de calor	3	4	2	5	4
	Costo	2	2	4	1	4
	Mantenimiento	1	2	2	2	4
Total			22	24	21	30

Fuente: elaboración propia

Después de analizar cada una de las ventajas y desventajas de los reactores descritos anteriormente se seleccionó el reactor con el mayor puntaje como lo es el reactor de tipo horno rotatorio que obtuvo un puntaje total de 30, ya que presenta facilidad en la extracción de los productos, un costo relativamente bajo, una complejidad mecánica media y una fácil limpieza y mantenimiento; además cuenta con una gran superficie de transferencia de calor lo que beneficiara a un calentamiento más uniforme.

4.3.2 Unidad de intercambio de calor. Esta unidad tendrá como objetivo obtener la fracción condensable de gases que salen del reactor, es decir el aceite pirolítico, por lo tanto, consistirá en un condensador. Que para el caso del proceso de pirolisis existen dos tipos de condensadores uno de contacto seco es decir un intercambiador de tubos coraza y otro de contacto húmedo, donde los gases calientes entran en contacto directo con un líquido frío formando una mezcla inmiscible.

La condensación tradicional usando un intercambiador de tubos coraza tiene como ventaja la simplicidad de operación como la separación que existen entre el condensado y el refrigerante evitando de esta manera que se altere de alguna manera el producto obtenido, también posee ciertas desventajas como lo es la corrosión de las paredes de la coraza provocada por los gases producidos en el proceso.

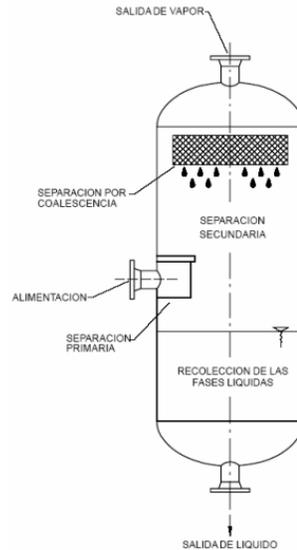
La condensación en húmedo se da a través del contacto directo de los gases condensables con un líquido refrigerante que por lo general es agua. La ventaja que presenta este tipo de condensador es que al entrar en contacto con el agua es posible neutralizar los vapores ácidos presentes en el condensado mediante la inclusión de un agente alcalinizante como el hidróxido de sodio, pero a su vez el contacto directo con el agua puede perjudicar el producto final ya que al realizar el proceso de separación el aceite puede quedar con pequeñas trazas de agua.

Debido a esto la mejor elección es el uso de un intercambiador de tubos coraza como unidad de condensación para los gases obtenidos del proceso, utilizando como fluido refrigerante agua potable por factores técnicos y económicos.

4.3.3 Unidad de separación. Tiene como objetivo retirar los gases no condensables de la corriente que sale del condensador, para ello se utilizan separadores los cuales pueden ser cilíndricos, esféricos, verticales, horizontales, por gravedad, por impacto y por fuerza centrífuga. Debido a que se tiene una mezcla gas-líquido la mejor opción a utilizar es un separador vertical bifásico capaz de separar el gas y los líquidos inmiscibles con el fin de liberar el gas del aceite pirolítico.

En un separador vertical el flujo entra al recipiente de forma lateral, el líquido fluye hacia la sección de recolección y posteriormente cuando alcanza cuando el equilibrio las burbujas de gas fluyen hacia arriba migrando a la sección de vapor. Luego el líquido sale del recipiente mediante una válvula de descarga de líquidos que es regulada por un controlador de nivel. En la figura 30 se presenta un esquema de este tipo de separador.

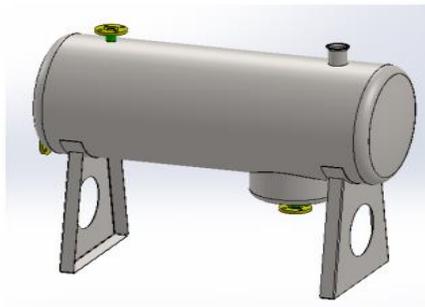
Figura 30. Esquema de un separador vertical bifásico



Fuente: REQUENA, G, et al. Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2006. p. 51-52.

4.3.4 Unidades de almacenamiento. Serán necesarias unidades de almacenamiento de productos al finalizar el proceso de pirolisis específicamente para el aceite pirolítico obtenido. Estos deberán tener por disposición de la empresa IPSA S.A.S un sobredimensionamiento del 25% de exceso del rendimiento de producción de condensados y una disposición horizontal con una salida para el gas en la parte superior¹³¹. En la figura 31 se muestra un esquema de la unidad de almacenamiento antes descrita.

Figura 31. Tanque de almacenamiento de aceite pirolítico



Fuente: CALDERÓN, Felipe. La Producción de Combustibles Vehiculares a partir de Plástico de desecho. Bogotá D.C., Colombia. 2016.

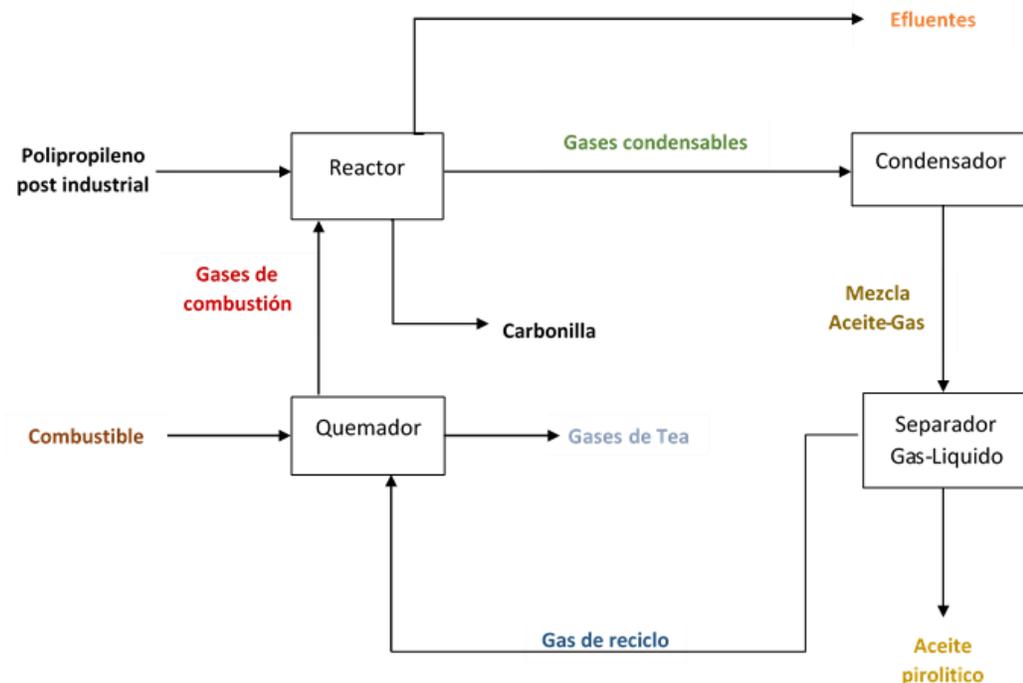
¹³¹ CALDERON Op.Cit., p. 125

4.4 DESCRIPCION DEL PROCESO

Un diagrama de flujo de procesos es aquel diagrama que ilustra las relaciones entre los principales componentes de una planta industrial como son los diferentes equipos que la componen y las corrientes que se desprenden de estos. Se inicia con un diagrama de bloques el cual es una descripción básica del proceso y posteriormente con el diagrama de flujo de proceso que describe la planta con más detalle.

4.4.1 Diagrama de bloques. El diagrama de bloques o BFD es la representación gráfica del funcionamiento interno del proceso de producción, que se hace mediante bloques y sus relaciones; constituye el paso inicial en el diseño conceptual ya que representa los proceso y operaciones involucradas, también se observan las corrientes de entrada y salida que componen flujos de materia prima, insumos, productos terminados, etc.¹³² En la figura 32 se presenta el BFD de la planta:

Figura 32. Diagrama de bloques del proceso



Fuente: elaboración propia

¹³² TURTON, Richard, et al. Diagrams for understanding chemical processes. En: Analysis, Synthesis, and design of Chemical Processes. 4 ed. USA: Pearson Education, 2012. p. 11-19.

Con base a los resultados presentados en el capítulo anterior se evidencia que el proceso con mejores rendimientos de aceite pirolítico es la pirolisis térmica convencional, por lo tanto, se busca un secuenciamiento similar al realizado a nivel laboratorio. Como se observa el funcionamiento del proceso para el aprovechamiento del plástico; cuenta con una unidad de reacción de tipo horno rotatorio seguido de un solo condensador en seco y un separador de gas-líquido para la producción de aceite pirolítico. También se observa un reciclo de los gases incondensables producidos para alimentar el quemador y de esta manera generar el calentamiento del reactor.

4.4.2 Diagrama de flujo de procesos. El diagrama de flujo de procesos que se presenta en la figura 33, es una representación esquemática del proceso, en el cual se presentan ciertos datos pertinentes del diseño de procesos como lo son sus condiciones de operación, es decir, temperatura, presión, porcentajes de conversión, composición, entre otros; además de la identificación de cada unidad de proceso con un número o descripción, junto con efluentes y disposición de las mismas.¹³³

En la tabla 16 se presentan cada uno de los equipos utilizados durante el proceso de pirolisis con su respectivo nombre e identificación, para un mayor entendimiento del diagrama de flujo de proceso (PFD).

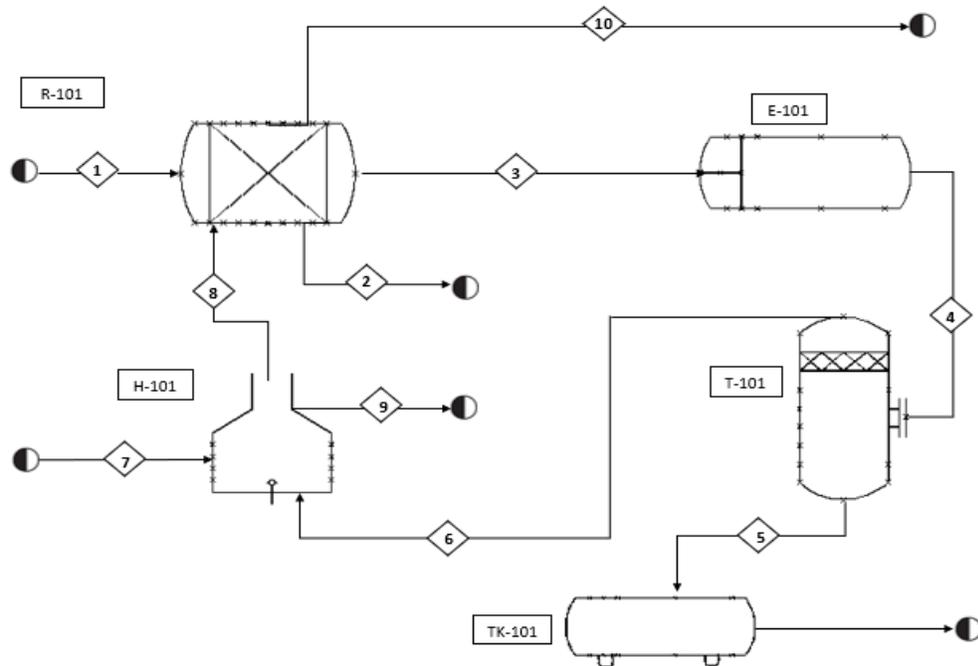
Tabla 16. Descripción de equipos

Nombre del equipo	Identificación
Reactor horno rotatorio	R-101
Intercambiador de tubos coraza	E-101
Separador vertical bifásico	T-101
Quemador	H-101
Tanque de almacenamiento	TK-101

Fuente: INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION., 2009. ISA5.1, Instrumentation Symbols And Identification- ISA. [online] isa.org. Disponible en: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa5-1>

¹³³ H. F. Rase, M. H. Barrow, Diagramas de flujo, En: ingeniería de proyectos para plantas de proceso. 1997 p 83- 85

Figura 33. Diagrama de flujo de proceso (PFD) para la obtención de aceite pirolítico



Fuente: elaboración propia

La Figura 33 muestra el desarrollo del proceso de una manera más específica comenzando con la alimentación del reactor rotatorio con polipropileno post industrial en forma de tirillas, el cual es calentado indirectamente por la combustión de gases de reciclo y combustible en un quemador el cual está integrado al reactor.

Los gases producidos en el reactor están libres de sedimentos y entran en el intercambiador de tubos coraza cuyo fluido de enfriamiento es el agua que permite el descenso de la temperatura para posteriormente ser separados en el equipo de separación Gas-Líquido de donde se obtendrán el aceite pirolítico y los gases de reciclo.

En la tabla 17 se muestra la descripción de cada una de las corrientes representadas anteriormente en la Figura 33.

Tabla 17. Descripción de las corrientes de proceso del diagrama de flujo de proceso (PFD)

Corriente	Nombre	Descripción
1	Polipropileno post industrial	Materia prima alimentada al proceso en forma de tirillas en cada corrida
2	Carbonilla	Producto solido obtenido del proceso en forma de cenizas con alto contenido de carbón
3	Gases condensables	Gases obtenidos a la salida del reactor, listos para ser condensados en el intercambiador
4	Mezcla Aceite-Gas	mezcla compuesta por los gases incondensables del proceso y el aceite pirolítico
5	Aceite pirolítico	producto deseado del proceso compuesto por los gases volátiles condensados
6	Gas de reciclo	Gases incondensables producto del separados Liquido-Gas, utilizado como fuente de energía para el reactor
7	Combustible	Fuente de energía empleada para el calentamiento del reactor, puede ser en forma líquida, solida o gas
8	Gases de combustión	Gases producidos por la combustión de los gases de reciclo y el combustible
9	Gases de Tea	Gases de reciclo no utilizados en la combustión que son quemados en una Tea
10	Efluentes	Emisiones finales del proceso

Fuente: elaboración propia

4.5 BALANCE DE MASA Y ENERGIA

Con base a las corrientes identificadas anteriormente en el diagrama de flujo de procesos propuesto para la planta junto con los rendimientos experimentales de aceite pirolítico, carbonilla y Gases no condensables, se realizó el balance de masa y energía por batch procesado, suponiendo un procesamiento de 5 toneladas de PP post industrial ya que este es el valor de materia prima que llega semanalmente.

4.5.1 Balance de masa. La ecuación de balance general utilizada para cualquier tipo de sistema se observa a continuación:

Ecuación 5. Ecuación general de balance de materia

$$E - S + G = A$$

Donde E representa las entradas, S las salidas, G la tasa de generación y A la tasa de acumulación; ya que el proceso esta descrito como tipo batch los balances se expresarán en términos de entradas y salidas. Se asume que en el reactor no existirá acumulación y que todos los productos generados de la reacción son cuantificados a través de la corriente de salida. El balance se expresará solo en términos másicos debido a que se desconoce la cinética de la reacción, siendo esta necesaria para expresarla en términos molares.

Los balances se desarrollaron a partir de los rendimientos experimentales ya que a través de estos se conoce la cantidad de producto obtenida con base a la materia alimentada. Se realizó el balance de masa global para cada batch o semana procesada teniendo en cuenta el balance de la unidad de reacción ya que el proceso de pirolisis inicia en el reactor y las demás operaciones dependen de la generación de los gases producidos en este. A continuación, se presentan los cálculos del balance de masa en el proceso a partir de los rendimientos experimentales de la corriente 2 a la 6.

Ecuación 6. Cálculo de flujo másico a través de rendimientos experimentales

$$M. producto (Kg) = \%Rendimiento del producto * M. materia prima (Kg)$$

Cálculo de flujo másico para la corriente 2 y 5:

$$\begin{aligned} 0.090 * 5000 Kg &= 450 Kg \\ 0,884 * 5000 Kg &= 4420 Kg \end{aligned}$$

El cálculo de la corriente 3 y 4 se realizó a través de la resta del total de materia prima alimentada menos la cantidad de carbonilla producida y el cálculo de la corriente 6 se cuantifico como la resta de la corriente 4 menos la corriente 5.

$$\begin{aligned} 5000 Kg - 450 Kg &= 4550 Kg \\ 4550 Kg - 4420 Kg &= 130 Kg \end{aligned}$$

En la Tabla 18. Se muestra el balance de masa para cada corriente del diagrama de flujo de proceso.

Tabla 18. Flujos masicos por semana para las corrientes de la planta piloto

Corriente	Nombre	Flujo masico (kg/batch)
1	Polipropileno post industrial	5000
2	Carbonilla	450
3	Gases condensables	4550
4	Mezcla Aceite-Gas	4550
5	Aceite pirolitico	4420
6	Gas de recicló	130
7	Combustible	80,67
8	Gases de combustión	475,17
9	Gases de Tea	62,23
10	Efluentes	475,17

Fuente; elaboración propia

La corriente 7 es calculada en base al balance de energía y las corrientes 8 y 10 son gases de combustión los cuales fueron calculados en base a factores de emisión para el Gas natural ya que es el combustible utilizado por la empresa actualmente. La corriente 9 son los gases de combustión generados en la quema en Tea del Gas de recicló restante.

3.5.2 Balance de energía. Para este proyecto se enfoca en la energía en forma de calor necesaria para el calentamiento del reactor para llevar acabo la degradación térmica del PP post industrial, el cual se calcula a través del cambio entalpico que sufre el polipropileno desde una temperatura ambiente hasta la temperatura optima de operación de 550°C y posteriormente su entalpia de reacción y vaporización para generar los gases de proceso.

Este cambio entalpico ΔH (KJ/Kg PP) está constituido por la sumatoria del calor sensible, el cual se refiere a la energía en forma de calor necesaria para llevar el PP de una temperatura de 15 °C a una temperatura de 550°C sin cambio de fase; a la entalpia de reacción, la cual corresponde a la energía necesaria para llevar acabo la descomposición térmica del plástico y la entalpia de vaporización, que es el calor latente para cambiar del PP solido a un estado fluido. El cambio entalpico se expresa de la siguiente forma:

Ecuación 7. Cambio entalpico para el proceso de pirolisis en PP

$$\Delta H = Q_{sensible} + \Delta H_{rxn} + \Delta H_{vap}$$

Fuente: YANG, J. A new method for DTA measurement of enthalpy change during the pyrolysis of rubbers. En: Thermochemica Acta. 1996.

Para calcular el calor sensible se precisa de la capacidad calorífica (KJ/Kg °C) del PP, junto con el diferencial de temperatura ambiente y la temperatura de trabajo (550°C- 15°C). Además, se requiere de los valores de entalpia de reacción y entalpia de vaporización que se muestran a continuación:

Tabla 19. Valores de capacidad calorífica, entalpia de reacción y entalpia de vaporización del PP

Propiedades	Valores
ΔH_{rxn} (KJ/Kg)	550
ΔH_{vap} (KJ/Kg)	100
C_p (KJ/Kg °C)	1,93

Fuente: Morton-Jones, D.H., "Polymer Processing", Chapman & Hall, Londres, 1991

$$\Delta H = 1,93(550^{\circ}C - 15^{\circ}C) + 550 + 100$$
$$\Delta H = 1682,55 \text{ KJ/Kg}$$

De acuerdo a la Tabla 19 se estableció el cambio entalpico de la reacción el cual representa 1.682,55 KJ/Kg PP; con base en esto y con una alimentación de cinco toneladas o 5.000 Kg de PP.

$$1682,55 \frac{KJ}{Kg} * 5000 \text{ Kg} = 8412,75 \text{ KJ}$$

$$\frac{8412,75 \text{ KJ}}{1000} = 8,41 \text{ MJ}$$

Se requieren de 8.412.75 KJ ó 8,41 MJ de energía en forma de calor para llevar a cabo el proceso de pirolisis.

El cálculo de la corriente 6 y 7 se desarrolló a través de la ecuación la cual describe la cantidad de combustible requerido que en este caso es el gas natural para la fase inicial del proceso y el gas de reciclo para la fase de reacción.

Ecuación 8. Cantidad de combustible necesario en el proceso de pirólisis

$$m_{combustible} = \frac{Q_{requerido}}{PC_{combustible}}$$

La ecuación 8 establece que la relación entre el calor requerido durante el proceso y el poder calorífico del combustible es igual a la cantidad de combustible necesario para suplir la demanda energética del proceso. En la Tabla 20 se observan los valores de poder calorífico del Gas natural y del gas de reciclo.

Tabla 20. Poder calorífico del Gas natural y Gas de reciclo

Combustible	Poder Calorífico	
	MJ/m ³	MJ/Kg
Gas Natural	38,67	64
Gas Reciclo	37,67	33,42

Fuente: INCOMBUSTIÓN, Colombia. Investigación e innovación en combustión avanzada de uso industrial.

Como se estableció antes en el diagrama de flujo de proceso se propone el reciclo de los gases no condensables con el propósito de suministra calor al reactor. En la fase inicial (arranque) dichos gases no se han generado por tanto el suministro de calor al reactor será mediante gas natural, una vez pasada esta etapa el suministro de calor se hará de forma combinada, es decir, mediante gas natural y gas de reciclo. Para la fase de arranque se determinó la energía necesaria la cual equivale al calor sensible que corresponde a:

$$Q_{sensible} = C_p * (550^{\circ}C - 15^{\circ}C)$$

$$Q_{sensible} = 1,93 * (550^{\circ}C - 15^{\circ}C)$$

$$Q_{sensible} = 1032,55 \text{ KJ/Kg}$$

Ya que la alimentación del reactor es de 5000 Kg de materia prima

$$1032,55 \frac{KJ}{Kg} * 5000 \text{ Kg} = 5\,162\,750 \text{ KJ}$$

$$\frac{5\,162\,750 \text{ KJ}}{1000} = 5162,75 \text{ MJ}$$

Se obtiene un calor sensible de 5.162.750 KJ o 5.162,75 MJ. A partir de esto y el uso de la ecuación 6 se presenta en la Tabla 21 la cantidad de Gas natural necesario en la primera etapa del proceso

Tabla 21. Cantidad de Gas Natural requerido en la etapa de arranque del sistema

Combustible	Cantidad requerida
Gas natural	133,51 m ³ /Batch 80,67 kg/Batch

Fuente: elaboración propia

Después de esto se calculó la cantidad de gas de reciclado necesario para la fase de reacción del proceso, para esto se estableció la cantidad de energía necesaria durante esta fase que es igual a la suma de la entalpia de reacción más la entalpia de vaporización.

$$Q_{Rxn} = \Delta H_{rxn} + \Delta H_{vap}$$

$$Q_{Rxn} = 550 \text{ KJ/Kg} + 100 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{Rxn} = 650 \text{ KJ/Kg}$$

Teniendo en cuenta la alimentación del reactor de 5000 Kg de materia prima (polipropileno).

$$650 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} * 5000 \text{ Kg} = 3\,250\,000 \text{ KJ}$$

$$\frac{3\,250\,000 \text{ KJ}}{1000} = 3\,250 \text{ MJ}$$

Se obtiene un calor de reacción de 3.250.000 KJ o 3.250 MJ. A partir de esto y el uso de la ecuación 6 se presenta en la Tabla 22 la cantidad de Gas de reciclado necesario en la etapa de reacción del proceso.

Tabla 22. Cantidad de Gas de reciclado requerido en la etapa de reacción del sistema

Combustible	Cantidad requerida
Gas reciclado	86,27 m ³ /Batch 97,25 kg/Batch

Fuente: elaboración propia

En la tabla 23 se muestra el factor de emisiones producido por cada tipo de combustible y su respectiva densidad Información necesaria para el cálculo de emisiones totales.(Ver tabla 24)

Tabla 23. Factor de emisiones y densidad del Gas natural y Gas de reciclo ¹³⁴¹³⁵¹³⁶

Densidad (kg/m ³)	Factor de Emisiones (Kg gases/Kg combustible)
0,61	3,6
1,13	1,9

El cálculo de las emisiones totales producidas por el gas natural y el gas de reciclo se cuantificaron a través de la ecuación 9 la cual describe que la cantidad de emisiones producidas por combustible es igual a la cantidad de combustible por el factor de emisiones del combustible utilizado.

Ecuación 9. Cuantificación de emisiones totales

$$M. \text{emisiones}(Kg) = M. \text{combustible}(Kg) * \text{Factor de emisiones} \left(\frac{Kg \text{ gases}}{Kg \text{ Combustible}} \right)$$

Tabla 24. Emisiones producidas durante el proceso de pirólisis

Etapa de Arranque			Etapa de Reacción		
Combustible	Cantidad (kg/batch)	Emisiones (Kg Gases)	Combustible	Cantidad (Kg/batch)	Emisiones (Kg Gases)
Gas Natural	80,67	290,40	Gas Natural	0	0
Gas Reciclo	0	0	Gas Reciclo	97,25	184,77
TOTAL, DE EMISIONES (kg Gases)					475,17

Fuente: elaboración propia

¹³⁴ INCOMBUSTIÓN, Colombia. Investigación e innovación en combustión avanzada de uso industrial. [En Línea]. [Citado 10 de agosto 2020]. Disponible en: (http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC_Correcciones_UPME_FunNatura.pdf).

¹³⁵ SÁNCHEZ, Daniel Jose. Synthetic diesel production through catalytic pyrolysis of biomass-waste tyre mixtures. Trabajo de grado Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2015. p. 18-21

¹³⁶ GAS NATURAL FENOSA. Historia del Gas Natural, Características del Gas Natural. [En Línea]. [Citado 20 agosto, 2020]. Disponible en: <https://www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/>

El total de emisiones producidas durante todo el proceso de pirolisis es la suma de las emisiones producidas durante la fase de arranque más las producidas durante la fase de reacción que es igual a 475,17 Kg como se muestra en la Tabla 24. Por último, se calculó el flujo de la corriente 9 el cual es la cantidad de emisiones producidas al quemar en Tea el gas de recicló no utilizado en el calentamiento del reactor.

$$130 \text{ Kg} - 97,25 \text{ Kg} = 32,75 \text{ Kg}$$

$$32,75 \text{ Kg} * 1,9 = 62.23 \text{ Kg}$$

5. ANALISIS FINANCIERO

Un análisis financiero tiene como objetivo evaluar la viabilidad de un proyecto en términos económicos; el cual consiste en las inversiones, el financiamiento y en los ingresos y egresos esperados. Esta información debe ser proyectada al periodo que compromete el horizonte del proyecto que en este caso se estableció en cinco años.

En este capítulo se presentan cada uno de los elementos de la estructura financiera del proyecto como las inversiones fijas y diferidas, también los costos operacionales, el flujo de caja y los indicadores económicos.

5.1 DETERMINACION DE COSTOS E INVERSIONES

Las inversiones del proyecto son todos los gastos que se efectúan para la adquisición de determinados factores o medios productivos que a través del tiempo generaran un flujo de beneficios. Asimismo, es una parte del ingreso disponible que se destina a la compra de bienes y/o servicios con la finalidad de incrementar el patrimonio de la empresa. Donde las inversiones asociadas al proyecto se desglosan en inversiones fijas, inversiones diferidas y capital de trabajo.

5.1.1 Inversiones fijas. Son las asignaciones de recursos reales y financieros para obras físicas o servicios básicos del proyecto como las maquinarias y equipos, edificios, muebles, enseres, vehículos, obras civiles, instalaciones y otros.

Para este proyecto se debe adquirir la maquinaria que comprende los equipos necesarios para el proceso de pirolisis tales como: el reactor de horno rotatorio, intercambiador de calor, separador vertical bifásico, el quemador y los tanques de almacenamiento; cuyo conjunto se conoce comercialmente como planta de pirolisis y su precio fue obtenido a través de un proveedor de confianza de la empresa IPSA S.A.S como lo es *Beston Group*.¹³⁷ (ver Anexo C). De los modelos presentados el elegido fue un BLJ-6, ya que dentro de sus especificaciones está el procesamiento de 5 Toneladas de materia prima, lo cual es acorde a lo propuesto en el diseño conceptual.

¹³⁷ BESTON. Máquina para pirolisis de plásticos [En línea] [Citado 1 agosto, 2020] Disponible en (<https://www.bestoneco.com/maquina-para-pirolisis-de-plasticos/>)

Tabla 25. Costos de inversiones fijas

Descripción	Unidades	Precio Unitario (\$ COP)	Total (\$ COP)
Planta de pirolisis	1	226.700.400	226.700.400
TOTAL, INVERSIONES FIJAS (\$ COP)			226.700.400

Fuente: elaboración propia

5.1.2 Inversiones diferidas. Son aquellos derechos adquiridos y servicios necesarios para el estudio e implementación del proyecto, los cuales pueden ser los estudios técnicos, gastos de organización, gastos de asistencia técnica, capacitación del personal, imprevistos, gastos de puesta en marcha de la planta etc. los cuales se ven reflejados en los tres primeros meses del desarrollo del proyecto Este valor se calculó empleando como referente el estudio financiero realizado por laboratorios Calderón¹³⁸ y se obtuvo como el 35% con respecto al valor de la planta de pirolisis que se observa en la Tabla 25.

Tabla 26. Costos de inversión diferida

Descripción	Total (% COP)
Diferidos	79.345.140

Fuente: Dr. CALDERÓN LABS. Programa de Investigación en combustibles alternativos, Plasticcombustibles Ventures 3.

5.1.3 Capital de trabajo. Son aquellos recursos que requiere el proyecto para atender las operaciones de producción y comercialización de bienes o servicios y contempla el monto de dinero que se precisa para dar inicio al ciclo productivo del proyecto en su fase de funcionamiento; los cuales comprende costos de materia prima, insumos y mano de obra.

- **Materia prima e insumos.** Para este proyecto la materia prima utilizada en la planta será el polipropileno post industrial cuyo precio incluye el transporte a planta. Además, la planta necesita del combustible externo para el calentamiento del reactor, el cual se determinó como alternativa el gas natural ya que es con este combustible que funciona la planta de destilación con la que ya cuenta la empresa. Se realizó una proyección de precios estimados de la materia prima e insumos

¹³⁸ Dr. CALDERÓN LABS. Programa de Investigación en combustibles alternativos, Plasticcombustibles Ventures 3. [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: (<http://www.drcalderonlabs.com/Plasticcombustibles/Index%20Plasticcombustibles.htm>)

con un aumento del 4,72%¹³⁹ que representa el promedio de la tasa de inflación de los últimos cinco años (Ver tabla 27)

Tabla 27. Precios de materia prima e insumos

Año	PP Post industrial (\$ COP/Kg)	Gas natural (\$ COP/m³)
2020	500	2431,00
2021	523,60	2545,74
2022	548,31	2665,90
2023	574,19	2791,73
2024	601,30	2923,50
2025	629,68	3061,49

Fuente: Ingeniería para soluciones ambientales IPSA S.A.S
– Gases de occidente

Se considero como tasa de consumo de cinco toneladas de PP post industrial por batch y un consumo de 133,51 m³ de Gas natural según el balance de masa presentado anteriormente. Con base en lo anterior se calculó los costos de materia prima e insumos para 4 batch al mes, por los próximos cinco años como se muestra a continuación:

Tabla 28. Costos anuales de materia prima e insumos

Año	PP Post industrial (\$ COP/Kg)	Gas natural (\$ COP/m³)
2020	\$ 120.000.000	\$ 15.579.015
2021	\$ 125.664.000	\$ 16.314.344
2022	\$ 131.595.341	\$ 17.084.381
2023	\$ 137.806.641	\$ 17.890.764
2024	\$ 144.311.114	\$ 18.735.208
2025	\$ 151.122.599	\$ 19.619.510

Fuente: elaboración propia

- **Mano de obra.** La empresa IPSA S.A.S. cuenta con tres turnos diarios que requieren de dos operarios por turno, junto con un turno diario del jefe de producción. Esta información fue tomada como referente para la futura planta.

¹³⁹ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de inflación, Históricos. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en:
<https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>

- **Nomina administrativa.** Para la mano de obra administrativa del proyecto se estipulo un Gerente general y un subgerente.

El cálculo del salario del personal nombrado anteriormente se obtuvo con base al salario mínimo legal vigente mensual S.M.L.V. en Colombia para el año 2020.¹⁴⁰ además del componente prestacional de aportes de salud, pensión etc., que equivale al 33%¹⁴¹ de salario base mensual del trabajador; junto con la proyección a cinco años con un aumento del 6,08%¹⁴² que equivale al promedio del incremento del S.M.L.V de los últimos cinco años.

Tabla 29. Incremento anual del S.M.L.V

% incremento S.M.L.V 6,08%	
Año	S.M.L.V (\$ COP/Mes)
2020	\$ 877.803
Año	S.M.L.V (\$ COP/Mes)
2021	\$ 931.173
2022	\$ 987.789
2023	\$ 1.047.846
2024	\$ 1.111.555
2025	\$ 1.179.138

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta la tabla anterior y los montos de salario para cada trabajador donde para el caso del gerente general es de 4 veces el S.M.L.V, dos veces para el gerente comercial, 1.3 veces para el jefe de producción y del mismo valor básico para los operarios; se calcula el costo total anual de nómina para el proyecto.

¹⁴⁰ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Índice de Salarios, Salario Mínimo Legal en Colombia. [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/es/indice-salarios>).

¹⁴¹ MINISTERIO DE TRABAJO. Cotización A La Seguridad Social - Aportes [En línea]. [Citado 20 agosto 2020] Disponible en: <https://www.mintrabajo.gov.co/empleo-y-pensiones/empleo/subdireccion-de-formalizacion-y-proteccion-del-empleo/formalizacion-laboral/cotizacion-a-la-seguridad-social-aportes>

¹⁴² BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Porcentaje de incremento, Salario Mínimo Legal en Colombia. [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/salarios>

Tabla 30. Costos totales anuales de nomina

Año	Nomina (\$ COP)
2021	\$ 129.842.822
2022	\$ 137.737.266
2023	\$ 146.111.691
2024	\$ 154.995.282
2025	\$ 164.418.995

Fuente: elaboración propia

- **Servicios públicos.** La planta requiere del servicio de electricidad, agua y alcantarillado; a continuación, se presentan los precios para el año 2020 en la ciudad de Cali. Junto con una proyección de cinco años con incremento del aumento del 4,72%¹⁴³ que representa el promedio de la tasa de inflación de los últimos cinco años.

Tabla 31. Tarifas de servicios públicos para Cali en el año 2020

Servicio publico	Tarifa
Electricidad (\$ COP/ Kwh)	566
Acueducto (\$ COP/m ³)	3.007
Cargo fijo Acueducto (\$ COP/m ³)	9.055
Alcantarillado (\$ COP/m ³)	3.422
Cargo fijo Alcantarillado (\$ COP/m ³)	4.716

Fuente: Emcali; Acueducto y alcantarillado- Energía

Tabla 32. Proyección de tarifas se servicios públicos

Año	Electricidad (\$ COP/ Kwh)	Acueducto (\$ COP/m³)	Cargo fijo Acueducto (\$ COP/m³)	Alcantarillado (\$ COP/m³)	Cargo fijo Alcantarillado (\$ COP/m³)
2021	593	3149	9482	3584	4939
2022	621	3298	9930	3753	5172
2023	650	3453	10399	3930	5416
2024	681	3616	10889	4115	5671
2025	713	3787	11403	4310	5939

. Fuente: elaboración propia

¹⁴³ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de inflación, Históricos. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>

Se estableció una tasa de consumo de agua aproximada de 20m³ por batch de operación y un consumo de electricidad de 24KW/h especificado por el modelo de planta de pirolisis cotizado. A continuación, se presentan los costos totales anuales de servicios públicos para el proyecto.

Tabla 33. Costos anuales de servicios públicos

Año	Servicios Públicos (\$ COP)
2021	21.046.234
2022	22.098.545
2023	23.203.473
2024	24.363.646
2025	25.581.828

Fuente: elaboración propia

- **Depreciaciones de equipos.** La depreciación es el desgaste y pérdida de valor que sufre un bien o activo. Para este proyecto se calculó una depreciación lineal con un tiempo de 10 años.

Tabla 34. Depreciación de planta de pirolisis.

Descripción	Depreciación anual (\$ COP)
Planta de pirolisis	22.670.040
TOTAL, ANUAL (\$COP)	22.670.040

Fuente: elaboración propia

5.2 FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

5.2.1 Horizonte de planeación. Es el plazo de tiempo que se requiere para concebir, desarrollar y completar el proyecto, va desde que se decide realizar la inversión inicial hasta que el proyecto termina su operación o puede ser cualquier intervalo de tiempo en el que se pueda conocer los indicadores de viabilidad financiera del proyecto. En este caso el proyecto tendrá un horizonte de planeación de 5 años.

5.2.2 Ingresos. Los ingresos están representados por la transacción única de la venta de productos o bien un flujo periódico en la prestación de un servicio; para este proyecto los ingresos estarán representados a través del costo de producción

del aceite pirolítico el cual se calcula como la sumatoria de los costos de materia prima, insumos y servicios públicos y los costos fijos de mano de obra para la producción de un galón de aceite pirolítico el cual es de \$ 4.357 COP a dicho costo se le aumentara un porcentaje de ganancia del 30% obteniendo un precio total del aceite pirolítico de \$5.694 COP. Este precio se proyectó a cinco años con un aumento del 4,72%¹⁴⁴ que representa el promedio de la tasa de inflación de los últimos cinco años.

Tabla 35. Precio del aceite pirolítico

Precio del aceite pirolítico	
Año	(\$ COP/gal)
2020	\$ 5.694
Año	(\$ COP/gal)
2021	\$ 6.040
2022	\$ 6.407
2023	\$ 6.797
2024	\$ 7.210
2025	\$ 7.649

Fuente: elaboración propia

5.2.3 Flujo de caja. Se estructuro a partir de las inversiones fijas y diferidas, junto los costos operacionales que comprendían gastos de materia prima e insumos, servicios públicos y nomina; también se tuvo en cuenta la depreciación de la planta de pirolisis y un financiamiento del 75% del proyecto bajo una tasa del 18% EA.

Tabla 36. Amortización para el financiamiento del proyecto

Tabla de Amortización				
Año	Saldo	Interés	Cuota	Amortización
0	\$ 229.534.155			
1	\$ 197.450.366	\$ 41.316.148	\$ 73.399.937	\$ 32.083.789
2	\$ 159.591.495	\$ 35.541.066	\$ 73.399.937	\$ 37.858.871
3	\$ 114.918.028	\$ 28.726.469	\$ 73.399.937	\$ 44.673.468
4	\$ 62.203.336	\$ 20.685.245	\$ 73.399.937	\$ 52.714.692
5	-	\$ 11.196.601	\$ 73.399.937	\$ 62.203.336

Fuente: elaboración propia

¹⁴⁴ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de inflación, Históricos. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>

Tabla 37. Flujo de caja del proyecto

Concepto	0	1	2	3	4	5
Ingresos (Increm. 4%)		\$ 405.963.602	\$ 430.646.189	\$ 456.829.477	\$ 484.604.710	\$ 514.068.676
Costo de Producción (increm. 4%)		\$ 163.024.578	\$ 170.778.267	\$ 178.900.878	\$ 187.409.969	\$ 196.323.937
Gastos Admnsitrativos		\$ 129.842.822	\$ 137.737.266	\$ 146.111.691	\$ 154.995.282	\$ 164.418.995
Gastos Financieros		\$ 41.316.148	\$ 35.541.066	\$ 28.726.469	\$ 20.685.245	\$ 11.196.601
Depresiacion Activos Fijos		\$ 22.670.040	\$ 22.670.040	\$ 22.670.040	\$ 22.670.040	\$ 22.670.040
Depresiacion Activos Diferidos		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Amortizacion a Diferidos		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Utilidad Antes de Impuesto		\$ 49.110.014	\$ 63.919.550	\$ 80.420.399	\$ 98.844.174	\$ 119.459.103
Impuestos Empresa (i=25%)		\$ 12.277.503	\$ 15.979.888	\$ 20.105.100	\$ 24.711.043	\$ 29.864.776
Utilidad Despues de Impuesto		\$ 36.832.510	\$ 47.939.663	\$ 60.315.299	\$ 74.133.130	\$ 89.594.327
Depresiacion Activos Fijos		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Amortizacion Activos Diferidos		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Amortización Credito		\$ 32.083.789	\$ 37.858.871	\$ 44.673.468	\$ 52.714.692	\$ 62.203.336
Inversiones						
Activo Fijo	\$ 226.700.400					
Activos Diferidos	\$ 79.345.140					
Capital Trabajo	\$ 0					
Recuperación de Capital de Trabajo						\$ 0
Valor liquidez						\$ 306.045.540
Flujo Neto	-\$ 76.511.385	\$ 4.748.722	\$ 10.080.792	\$ 15.641.831	\$ 21.418.439	\$ 333.436.531

Fuente: elaboración propia

El proyecto tendrá flujos de caja positivos desde el segundo año los cuales seguirán aumentando con cada periodo.

5.3 INDICADORES ECONOMICOS

Los indicadores económicos son aquellas herramientas estadísticas que facilitan un pronóstico del proyecto ya que evalúa el desarrollo económico que se ha llevado durante el horizonte de planeación, sus fortalezas y debilidades, a través de la interpretación de las cifras y resultados obtenidos en el flujo de caja¹⁴⁵.

Para este proyecto los indicadores económicos que se tendrán en cuenta son la tasa interna de oportunidad (TIO), el valor presente neto (VPN) para esta tasa de oportunidad, la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto progresivo para cada año del horizonte de planeación.

Tasa interna de oportunidad (TIO). La tasa interna de oportunidad o tasa mínima de descuento, es la tasa de interés mínima a la que el inversor está dispuesto a

¹⁴⁵ LÓPEZ, María Teresa; GENTILE, Natacha. Sistema de indicadores económicos y sociales: la importancia del análisis integrado. En IX Encuentro Nacional de la Red de Economías Regionales en el Marco del Plan Fénix y II Jornadas Nacionales de Investigadores de las Economías Regionales. 2008.

invertir en el proyecto. Para su cuantificación se realiza el promedio entre el depósito a término fijo (CDT 360) y su tasa promedio de captación (DTF), junto con una tasa subjetiva del inversor, adicionando cierto porcentaje debido a la tasa de inflación dada por el banco de la república¹⁴⁶.(ver ecuación 10)

Ecuación 10. Cálculo de la tasa interna de oportunidad.

$$TIO = \frac{(CDT) + (DTF) + (Tasa\ inversor)}{3}$$

Se realizó un ajuste para cada indicador antes del cálculo de la TIO, como se evidencia en la Tabla 37; para el CDT¹⁴⁷ se calculó un promedio semanal y para el DTF¹⁴⁸ un promedio mensual y después se realizó el ajuste de dichos promedios como la suma del promedio de la tasa de inflación dada por el banco de la república más la tasa de captación más tres puntos

Tabla 38. Ajuste de indicadores macroeconómicos

Tasa	Promedio	Ajuste
CDT	6,46%	11,48%
DTF	5,29%	10,31%
Inflación	4,72%	5,02%

Por último, se calculó la tasa del inversor como la suma de la tasa promedio del CDT más seis puntos, más la tasa promedio de inflación dada por el banco de la república como se muestra a continuación:

$$Tasa\ del\ inversor = 6,46\% + 6\% + 5,02\%$$

$$Tasa\ del\ inversor = 22,50\%$$

De acuerdo a lo anterior el valor calculado para la TIO es de 14,76% efectivo anual; a partir de este valor se calculó el valor presente neto.

¹⁴⁶ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de inflación, Históricos. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>

¹⁴⁷ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de captación semanales y mensuales, Históricos. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/tasas-captacion-semanales-y-mensuales>

¹⁴⁸ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de interés DTF. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/tasa-interes-dtf>

Valor presente neto (VPN). También llamado valor actual neto, es el valor presente de los flujos de efectivo netos de una propuesta, entendiendo por flujos efectivos como la diferencia entre egresos e ingresos. A través de este se puede medir la rentabilidad después de recuperar la inversión; para esto se calcula el valor de cada flujo neto en cada periodo utilizando la tasa de descuento o más conocida como TIO. Si el valor actual neto de un proyecto es mayor a cero mostrará el valor ganado durante el proyecto después de la inversión caso contrario si muestra un valor menor a cero la propuesta no será viable.¹⁴⁹

Ecuación 11. Cálculo del valor presente neto

$$VPN = \frac{VP_0}{(1 + TIO)^0} + \dots + \frac{VP_n}{(1 + TIO)^n}$$

El valor presente neto obtenido para los cinco años de horizonte del proyecto es de \$ 125.469.648 COP demostrando la viabilidad del proyecto, ya que se observa la generación de flujos netos durante cada periodo.

Tasa interna de retorno (TIR). La tasa interna de retorno o de rentabilidad es un método de valoración de inversiones, que mide la rentabilidad de los ingresos y egresos de un proyecto, generados por una inversión. En la ecuación 12 se describe el cálculo de la TIR.¹⁵⁰

Ecuación 12. Cálculo de la tasa interna de retorno

$$-inversion\ inicial + \frac{Q_1}{(1 + TIR)} + \frac{Q_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1 + TIR)^n} = 0$$

La tasa interna de rentabilidad para los cinco años de horizonte del proyecto es de 42%. Demostrando que el proyecto es viable ya que la tasa calculada de rentabilidad es superior a la tasa interna de oportunidad evaluada anteriormente.

¹⁴⁹ METE, Marcos Roberto. Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia, 2014, vol. 7, no 7, p. 67-85.

¹⁵⁰ ITURRIOZ DEL CAMPO, Javier. Tasa interna de retorno o rentabilidad (TIR). *Recuperado el*, 2013, vol. 19.

6. CONCLUSIONES

- A través del análisis de las propiedades más influyentes en el rendimiento del aceite pirolítico; fue posible la identificación y caracterización de los residuos plásticos (tipo PP) disponibles para el proceso de pirolisis. se identificó que altos porcentajes de contenido de humedad y de cenizas mayores al 12% desfavorecen el rendimiento, y que un alto contenido de material volátil cercano al 100% y un contenido de carbón fijo no mayor al 1,22% favorece el rendimiento.
- A partir del desarrollo experimental se definieron las condiciones operativas que favorecen el proceso de pirolisis obteniendo rendimientos de aceite pirolítico de hasta un 88,4% a una temperatura de 550°C y una concentración de 0%p/p de catalizador. El aceite generado presentó un poder calorífico de 43,73 MJ/Kg, este valor es comparable con el diésel comercial.
- El análisis estadístico de varianza (ANOVA) demostró que la temperatura, la concentración de catalizador y la interacción entre ambas son variables significativas sobre el rendimiento de aceite pirolítico; donde a partir de dichos resultados se presenta un modelo de regresión con un ajuste apropiado ($R^2=0,967$) que correlaciona las variables influyentes con el rendimiento porcentual de aceite.
- Por medio de la revisión bibliográfica y los resultados experimentales fue posible establecer el diseño conceptual de una planta piloto para el proceso de pirolisis a partir de residuos plásticos post industriales (tipo PP); el cual propone un diagrama de flujo de proceso con su respectivo balance de masa y energía, junto con la selección de equipos principales para el proceso.
- El análisis financiero indica que es necesaria una inversión inicial de 306.045.540 \$COP para llevar a cabo el proyecto a escala piloto. Los estudios de rentabilidad a cinco años mostraron un Valor Presente Neto (VPN) de 125.469.648 \$COP y una (TIR) de 42%, estableciendo la viabilidad económica del proyecto.

7. RECOMENDACIONES

- Recolectar, cuantificar y caracterizar los gases no condensables obtenidos del proceso, con el fin de visualizar su posible aprovechamiento.
- Caracterizar la carbonilla obtenida con el objetivo de conocer su potencial energético u otras aplicaciones.
- Medir de manera continua el rendimiento del aceite pirolítico durante el proceso para conocer el rendimiento en tiempo real.
- Buscar técnicas de separación que logren obtener la carbonilla y el catalizador por aparte, de forma que se pueda utilizar como combustible sólido
- Destilar el aceite pirolítico obtenido de la pirolisis con la finalidad de evaluar su calidad y potencial, a través de estudios cromatográficos.
- Realizar el dimensionamiento de cada uno de los equipos seleccionados.

BIBLIOGRAFIA

- ABNISA, Faisal y Daud, Wan Mohd Ashri Wan. A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. En: Energy Conversion & Management. Nov 1. vol. 87, p. 3
- ABOULKAS A, HARFI K, BOUADILI A Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. Energy Convers Manage
- AHMAD, Imtiaz, et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green Energy. Jul 3. vol. 12, no. 7, p. 663-671
- AL-SALEM, S. M., et al. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). En: Journal of environmental management. Julio, 2017. Vol. 197. p. 177-198.
- ALVARADO, José Gregorio, *et al.* Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.
- ANUAR, Shafferina, et al. Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled p. 4
- ARANDES, J. M., Bilbao, J., & López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. revista Iberoamericana de Polímeros, 5(1), 28-45.
- ARAUZO, J., SERRANO, F. B., ÁBREGO, J., SANCHEZ, J. L., & GONZALO, A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. Boletín del Grupo Español del Carbón, (33), 2-6.
- ARBELÁEZ, J. I. M., Janna, F. C., GUTIÉRREZ, C. A. G., RENTERÍA, C. F. V, ... & Chaparro, J. A. S. (2013). Pirólisis rápida de biomasa. Universidad Nacional de Colombia.
- ASADULLAH, M., et al. Jute stick pyrolysis for bio-oil production in fluidized bed reactor. En: Bioresource Technology. vol. 99, no. 1, p. 44-50
- ASTM D3173, Standard Test Method for Moisture, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- ASTM D3174-12, Standard Test Method for Ash, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- ASTM D3175-20, Standard Test Method for Volatile Matter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- ASTM D7582-15, Standard Test Method for Proximate Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org

BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Porcentaje de incremento, Salario Mínimo Legal en Colombia. [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/salarios>

BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de captación semanales y mensuales, Históricos. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/tasas-captacion-semanales-y-mensuales>

BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de inflación, Históricos. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>

BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de interés DTF. Colombia [En línea]. [Citado 1 agosto,2020] disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/tasa-interes-dtf>

BASU, Prabir. Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction. En: [Anónimo]2nd ed. ed. London: Academic Press, 2013. p70

BELTRÁN RICO, Maribel y MARCILLA GOMIS, Antonio. Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Universidad de Alicante. 2012. p. 19.

BILLMEYER, F. La ciencia de las macromoléculas. En: Ciencia de los polímeros. 2 ed. New York. Reverté. 2004. p. 22.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. En: Biomass and Bioenergy. Mar. vol. 38, p. 68-94

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. En: Biomass and Bioenergy. Mar. vol. 38, p. 68-94

CAICEDO, carolina, CRESPO-DELGADO, Lina Marcela, CRUZ-RODRÍGUEZ, Hever & ÁLVAREZ-JARAMILLO, Norman Andrés. (2017). Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante la reprocesamiento. Ingeniería, investigación y tecnología, 18(3), 245-252

CALDERON, Felipe. Producción De Combustibles Vehiculares a Partir De Plásticos De Desecho. Bogotá: 2016

CAMARA DE COMERCIO DE BOGOTA. [En línea] [Citado 22 June 2020]. Disponible en: http://recursos.ccb.org.co/ccb/instructivos/acerca_CIIU/01.html

CARDONA, R. (2016). Análisis de alternativas tecnológicas para la valorización y disposición final de residuos plásticos en la ciudad de Manizales.

CASTELLS, Xavier Elías y VELO GARCÍA, Enric. La pirólisis. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos. España. 2013. 88 p

CONESA, Juan A. Estudio de la Pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. 1996.

CRAUTONOMA. Listado CIIU. 2004 [En línea] [Citado 22 June 2020]. Disponible en: <http://www.crautonomia.gov.co/normasambiental/Organizacional/Listado%20CIIU.pdf>

CZAJCZYŃSKA, D., et al. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. En: Thermal Science and Engineering Progress. Sep. vol. 3, p. 2

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE), Colombia. Encuesta Anual Manufacturera. [En Línea]. [Citado 25 junio, 2020]. Disponible en: (<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufactureraenam/eam-historicos>)

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION (DNP), Conpes 3874, política nacional para la gestión de residuos sólidos. En [sitio web], Colombia, 2016 disponible En: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>

DIN 51900-3, Testing of solid and liquid fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value - Part 3: Method using adiabatic jacket, 2020, www.standards.globalspec.com

Editor, M., 2020. Análisis De Regresión: Interpretar El R-Cuadrado Y Evaluar La Bondad De Ajuste [sitio web] Disponible en: <https://blog.minitab.com/es/analisis-de-regresion-como-puedo-interpretar-el-r-cuadrado-y-evaluar-la-bondad-de-ajuste>

FAHMI, R., et al. The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability. En: Fuel. vol. 87, no. 7, p. 1230-1240

FERRERO, J. A. C. Curso básico de análisis térmico. Editorial Club Universitario. 2014 P 20-21

FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Trabajo de grado para optar al título de Master en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2016. p. 15-17

GAS NATURAL FENOSA. Historia del Gas Natural, Características del Gas Natural. [En Línea]. [Citado 20 agosto, 2020]. Disponible en: <https://www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/>

GIORDANO, Maxime. Production of Infrastructure-Ready Fuel Via Fast Pyrolysis and Hydroprocessing of Biomass. Hauppauge: Nova, 2013.

GÓMEZ, Alexander. Pirolisis de biomasa: cuesco de palma de aceite. kassel university press GmbH, 2008

GÓMEZ, J. M. (1825). Síntesis, caracterización y aplicaciones catalíticas de zeolitas básicas Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México D.F. McGraw Hill Publishing Co. 2012. 487 p.

H. F. Rase, M. H. Barrow, Diagramas de flujo, En: ingeniería de proyectos para plantas de proceso. 1997 p 83- 85

IBM SPSS SOFTWARE, IBM SPSS Statistics versión 25, [sitio web]. Disponible en: <https://www.ibm.com/co-es/analytics/spss-statistics-software>

INGENIERIA PARA SOLUCIONES AMBIENTALES S.A.S. Nosotros. [sitio web]. Colombia.2017 Disponible En: <https://www.ipsaingenieriaambiental.com/nosotros/>

INGENIERIA PARA SOLUCIONES AMBIENTALES S.A.S. Valorización. [sitio web]. Colombia. 2017. Disponible en: <https://www.ipsaingenieriaambiental.com/servicios/#valorizacion>

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), Colombia. Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo. [En línea]. [Citado 26 junio ,2020]. Disponible en:<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

INTRATEC SOLUTIONS. Technology Economics: Polypropylene production vía gas phase process. Pag 70 2013.

ITURRIOZ DEL CAMPO, Javier. Tasa interna de retorno o rentabilidad (TIR). *Recuperado el*, 2013, vol. 19.

J.N. Brown, "Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology," Iowa State University, 2009

KRICHELDORF, Hans. Handbook of polymer synthesis. Part B. Nueva York. Marcel Dekker. 1992. 1808 p.

KUMAR,S , Pnada. A.K., Singh, R. A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resour. Conserv. Recycl.* 55 p. 893-910

LOPEZ, armando; MALDONADO, Yadira; GUARDADO, juan y colaboradores. Determinación del poder calorífico de combustibles líquidos y sólidos. México. 2018

LÓPEZ, María Teresa; GENTILE, Natacha. Sistema de indicadores económicos y sociales: la importancia del análisis integrado. En IX Encuentro Nacional de la Red de Economías Regionales en el Marco del Plan Fénix y II Jornadas Nacionales de Investigadores de las Economías Regionales. 2008.

MARTÍNEZ, J., et al. Waste tyre pyrolysis-A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. vol. 23, p. 198-199.

MENDOZA GENEY, Libardo Enrique. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Ingeniería Mecatrónica, 2016.

METE, Marcos Roberto. Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia, 2014, vol. 7, no 7, p. 67-85.

MIANDAD, R, et al. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. En: International biodeterioration & biodegradation. Abril, 2017. Vol. 119. p. 239-252

MICHAEL, PORTER, et al. Estrategia competitiva. Compañía Editorial Continental SA Décimo, 1991.

MILIOS, Leonidas, et al. Plastic recycling in the Nordics: A value chain market analysis. En: WaManagement. Junio, 2018. Vol. 76. p. 180-189.

MINISTERIO DE TRABAJO. Cotización A La Seguridad Social - Aportes [En línea]. [Citado 20 agosto 2020] Disponible en: <https://www.mintrabajo.gov.co/empleo-y-pensiones/empleo/subdireccion-de-formalizacion-y-proteccion-del-empleo/formalizacion-laboral/cotizacion-a-la-seguridad-social-aportes>

MIRANDA, Juan José. Estructura Financiera del Proyecto. En: Gestión de Proyectos: Identificación-Formulación- Evaluación Financiera, Económica, Social, Ambiental. 4 ed. MM Editores. Bogotá D. C., 2003. p. 89-92.

MORAIS ARAÚJO, Aruzza Mabel, et al. Thermal and catalytic pyrolysis of sunflower oil using AIMCM-41. En: Renewable Energy. Febrero, 2017. Vol. 101. p. 900-906.

OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia. 2015.

QUIROZ, H. P., Dussan, A., LÓPEZ, S. M., CALDERÓN, J. A., Otálora, J. H., & CHICA, R. (2014). Caracterización estructural de ceniza volcánica del nevado del Ruiz: Identificación fase Zeolita. MOMENTO, (48E), 1-13.

R STUDIO TEAM, R Studio, [sitio web]. Disponible en: <https://rstudio.com/products/rstudio/download/>

RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens y VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. En: Waste Management. Julio, 2017. 35 p.

REQUENA, G, et al. Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2006. p. 51-52.

RODRÍGUEZ, E., & VILLEGAS, E. (2012). Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. Métodos y materiales, 2(1), p 26.

SÁNCHEZ, Daniel Jose. Synthetic diesel production through catalytic pyrolysis of biomass-waste tyre mixtures. Trabajo de grado Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2015. p. 18-21

SCHEIRS, Jonh. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. Walter Kaminsky, 2006b. p. 387

SERNA M., Edgar Desarrollo e innovación en Ingeniería (ed. 3) Agosto, 2018 p 8

SHAFFERINA Dayana ANUAR Sharuddin, FAISAL Abnisa, WAN Mohd ASHRI Wan Daud, MOHAMED Kheireddine Aroua Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste.

SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA VIGILANCIA DE LA CONTRATACIÓN ESTATAL. Listado Colombia. 2014 [En línea] [Citado 22 June 2020]. Disponible en: http://www.sice.oas.org/TPD/COL_PAN/Text_September2013_s/Ch_2_Annex2B_COL_s.pdf

TURTON, Richard, et al. Diagrams for understanding chemical processes. En: Analysis, Synthesis, and design of Chemical Processes. 4 ed. USA: Pearson Education, 2012. p. 11-19.

UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICO (UPME), Colombia. Boletín Estadístico de Minas y Energía. [En Línea]. [Citado 25 junio, 2020]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf

VERMEULEN, L. VAN CANEGHEM, J. BLOCK, C. BAEYENS, J. Automotive shredder residuo (ASR): reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling. Energy or chemicals valorisation. J. Hazard. Mater 2011. P 8-27

ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACION DE ACEITE PPRIOLOTICO

A continuación, se muestran los métodos mas utilizados para la cuantificación de las propiedades químicas del aceite pirolítico:

- **Contenido de humedad**

para su determinación se encuentra en la norma ASTM-D3173.¹⁵¹ la cual establece:

1. La trituración del material a un tamaño de 250 µm.
2. Se calienta la capsula vacía a 100°C en el horno y después es colocada en un desecador de sílica gel por 15 minutos para retirar cualquier humedad presente y que esta pueda afectar los resultados.
3. Se extrae un gramo del material triturado en la capsula y es introducido en el horno precalentado a 104°C
4. La capsula es extraída después de una hora en el horno y colocada en el desecador hasta alcanzar temperatura ambiente.

El porcentaje de humedad se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 13. Cálculo del contenido de humedad¹⁵²

$$\text{Porcentaje de humedad en la muestra} = \left[\frac{(A - B)}{A} \right] \times 100$$

Donde:

A = gramos de muestra usada

B = gramos despues del calentamiento

- **Contenido de cenizas**

Para su determinación se utiliza la norma ASTM-D3174-12¹⁵³., la cual establece al contenido de cenizas como el residuo remanente después de quemar la muestra bajo condiciones de temperatura, tiempo y presión controladas; donde la

¹⁵¹ ASTM D3173, Standard Test Method for Moisture, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org

¹⁵² Ibid., www.astma.org

¹⁵³ ASTM D3174-12, Standard Test Method for Ash, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org

incineración provoca la expulsión del agua que contiene el material como se describe a continuación:

1. La muestra debe ser pulverizada hasta un tamaño de 250 μm
2. Se coloca un gramo del material pulverizado en una capsula previamente pesada
3. Se introduce la capsula en una mufla a temperatura ambiente para poder iniciar la combustión desde cero
4. El horno es calentado hasta llegar a una temperatura de $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ al final de una hora; el calentamiento continuo hasta llegar a una temperatura de 600°C por dos horas mas
5. Se retira la capsula y se deja enfriar a temperatura ambiente en un desecador de sílica gel para su posterior pesado

El porcentaje de cenizas se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Cálculo del contenido de cenizas

$$\text{Porcentaje de cenizas en la muestra} = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100^{154}$$

Donde:

A = peso en gramos de la capsula con residuos de cenizas

B = peso en gramos de la capsula vacía

C = peso en gramos de la muestra utilizada

- **Contenido de material volátil**

Para poder realizar esta caracterización se encuentra la norma ASTM-D3175-20,¹⁵⁵ la cual establece la diferencia entre la cantidad de masa perdida de la muestra y el porcentaje de humedad en condiciones controladas de temperatura, tiempo y presión. A través del siguiente procedimiento:

1. El material a evaluar es pulverizado a un tamaño de 250 μm
2. Se procede a pesar aproximadamente un gramo de la muestra pulverizada y también se registra el peso de la capsula vacía.

¹⁵⁴ Ibid., www.astm.org

¹⁵⁵ ASTM D3175-20, Standard Test Method for Volatile Matter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org

3. Se transfiere el gramo de la muestra en la capsula previamente pesada y se introduce en el horno a 700°C por 7 minutos
4. La muestra es retirada del horno y colocada en el desecador de silica gel hasta llegar a la temperatura ambiente
5. Se registra el peso final de la capsula

El contenido de material volátil se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 15. Cálculo del contenido de material volátil¹⁵⁶

$$\text{Porcentaje de material volatil en la muestra} = D - E$$

Donde:

D = porcentaje de perdida de masa en la muestra

E = porcentaje de humedad (determinado en la norma ASTM – D3173)

El porcentaje de pérdida de masa se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 16. Cálculo del porcentaje de pedida de masa ¹⁵⁷

$$\text{Porcentaje de perdida de masa en la muestra } D = 100 \times \left[\frac{B - C}{B - A} \right]$$

Donde:

A = peso en gramos de la capsula vacia

B = peso en gramos de la capsula con la muestra antes del calentamiento

C = peso en gramos de la capsula con la muestra despues del calentamiento

- **Contenido de carbón fijo**

El carbón fijo es la parte no volátil, que se encuentra en el residuo que queda en la capsula luego de determinar el contenido de material volátil. Si a este residuo se le resta la cantidad de cenizas se va a obtener el contenido de carbón fijo, por lo tanto, el carbón fijo es un valor calculado resultante de la suma del porcentaje de humedad, cenizas y material volátil restado de 100, como se muestra en la ecuación 15.

¹⁵⁶ Ibid., www.astm.org

¹⁵⁷ Ibid., www.astm.org

Ecuación 17. Cálculo del porcentaje de carbón fijo¹⁵⁸

$$\% \text{ Carbon fijo} = 100 - (\% \text{ humedad} + \% \text{ cenizas} + \% \text{ material volátil})$$

- **Poder calorífico**

Se determinó para los aceites pirolíticos obtenidos a través de la norma DIN 51900-3¹⁵⁹, para esto se utilizó una bomba calorimétrica. Para cada prueba se introdujeron 1 g de la muestra a evaluar junto con 8 cm de alambre de ignición y se presurizó con oxígeno a 30 atm; después se agregó 2 L de agua a la chaqueta adiabática, se encendió el agitador y se dejó por aproximadamente 5 minutos. Posterior a ello se da chispa de ignición y se empiezan a tomar los datos arrojados por la termocupla con respecto al tiempo.

¹⁵⁸ASTM D7582-15, Standard Test Method for Proximate Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org

¹⁵⁹ DIN 51900-3, Testing of solid and liquid fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value - Part 3: Method using adiabatic jacket, 2020, www.standards.globalspec.com

ANEXO B

PROCESO DE PRODUCCION DE ACEITE PIROLITICO

A continuación, se muestran los datos obtenidos de temperatura de cimasy fondo de reactor junto a la presión de operación y tiempo de reacción de 4 horas, para los distintos niveles de temperatura y concentración de catalizador.

Tabla 39. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 1

T. Operación 550°C 1				
tiempo (min)	T. Cimasy °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	42	188	0	74,7
10	41	344	16	76,8
20	41	483	16	76,8
30	44	508	16	76,8
40	112	532	14	76,5
50	187	551	16	76,8
60	232	554	16	76,8
70	287	552	18	77,1
80	299	550	18	77,1
90	313	551	18	77,1
100	327	551	16	76,8
110	333	554	18	77,1
120	332	550	18	77,1
130	333	550	18	77,1
140	330	551	16	76,8
150	327	551	18	77,1
160	326	549	16	76,8
170	317	550	14	76,5
180	313	550	16	76,8
190	309	550	16	76,8
200	309	550	16	76,8
210	309	550	16	76,8
220	306	550	15	76,7
230	304	551	15	76,7
240	300	550	16	76,8

Fuente: elaboración propia

Tabla 40. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 2.

T. Operación 550°C 2

tiempo (min)	T. Cimas °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	42	23	0	74,7
10	41	196	14	76,5
20	44	343	16	76,8
30	46	390	16	76,8
40	50	486	16	76,8
50	57	513	16	76,8
60	123	535	16	76,8
70	196	553	18	77,1
80	247	551	18	77,1
90	270	549	18	77,1
100	290	549	19	77,2
110	306	552	20	77,3
120	295	557	20	77,3
130	296	550	21	77,5
140	310	550	20	77,3
150	322	550	20	77,3
160	321	550	20	77,3
170	318	551	19	77,2
180	311	550	20	77,3
190	309	550	20	77,3
200	309	551	21	77,5
210	307	550	20	77,3
220	306	551	21	77,5
230	304	550	20	77,3
240	302	551	20	77,3

Fuente: elaboración propia

Tabla 41. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 1.

T. Operación 650°C 1				
tiempo (min)	T. Cimas °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	27	21	0	74,7
10	28	215	17	76,9
20	29	359	17	76,9
30	29	450	18	77,1
40	36	500	18	77,1
50	73	533	18	77,1
60	136	550	17	76,9
70	216	564	18	77,1
80	254	575	18	77,1
90	284	578	20	77,3
100	306	586	22	77,6
110	327	624	22	77,6
120	322	635	21	77,5
130	321	648	21	77,5
140	309	656	21	77,5
150	282	653	20	77,3
160	271	650	18	77,1
170	265	652	18	77,1
180	260	648	16	76,8
190	261	651	16	76,8
200	262	651	16	76,8
210	261	651	16	76,8
220	259	650	15	76,7
230	260	650	16	76,8
240	263	650	15	76,7

Fuente: elaboración propia

Tabla 42. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 0%p/p. replica 2.

T. Operación 650°C 2				
tiempo (min)	T. Cimas °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	20	30	0	74,7
10	34	206	18	77,1
20	36	346	18	77,1
30	37	432	19	77,2
40	39	487	18	77,1
50	43	518	18	77,1
60	149	536	24	77,9
70	206	549	24	77,9
80	249	558	24	77,9
90	274	562	25	78,0
100	293	567	22	77,6
110	304	597	22	77,6
120	331	614	22	77,6
130	326	626	22	77,6
140	322	642	22	77,6
150	297	657	21	77,5
160	285	654	21	77,5
170	270	650	19	77,2
180	265	650	20	77,3
190	262	649	20	77,3
200	260	651	20	77,3
210	260	651	20	77,3
220	258	651	21	77,5
230	260	651	20	77,3
240	258	649	19	77,2

Fuente: elaboración propia

Tabla 43. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 1.

T. Operación 550°C Con Catalizador 1				
tiempo (min)	T. Cimas °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	35	16	0	74,7
10	37	155	16	76,8
20	38	320	16	76,8
30	38	429	16	76,8
40	39	498	17	76,9
50	42	535	17	76,9
60	125	557	16	76,8
70	175	552	18	77,1
80	216	550	18	77,1
90	238	551	18	77,1
100	257	549	19	77,2
110	273	550	19	77,2
120	285	550	19	77,2
130	298	551	19	77,2
140	312	549	19	77,2
150	326	553	19	77,2
160	331	552	19	77,2
170	328	551	19	77,2
180	322	550	19	77,2
190	320	553	18	77,1
200	313	549	17	76,9
210	310	549	18	77,1
220	304	551	19	77,2
230	295	550	19	77,2
240	287	551	19	77,2

Fuente: elaboración propia

Tabla 44. Resultados experimentales para T=550°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 2.

T. Operación 550°C Con Catalizador 2				
tiempo (min)	T. Cimas °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	34	23	0	74,7
10	39	349	19	77,2
20	40	405	19	77,2
30	41	471	20	77,3
40	42	514	20	77,3
50	80	540	19	77,2
60	142	551	20	77,3
70	197	555	21	77,5
80	221	551	22	77,6
90	241	548	22	77,6
100	257	550	23	77,7
110	268	550	23	77,7
120	284	549	22	77,6
130	303	553	22	77,6
140	307	556	21	77,5
150	303	550	20	77,3
160	304	550	20	77,3
170	303	551	20	77,3
180	301	550	21	77,5
190	301	550	22	77,6
200	298	551	20	77,3
210	298	549	20	77,3
220	297	551	21	77,5
230	291	549	22	77,6
240	281	551	22	77,6

Fuente: elaboración propia

Tabla 45. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 1.

T. Operación 650°C Con Catalizador 1				
tiempo (min)	T. Cimas °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	33	22	0	74,7
10	37	207	12	76,3
20	37	342	13	76,4
30	37	435	22	77,6
40	40	485	24	77,9
50	47	520	24	77,9
60	145	543	22	77,6
70	195	559	21	77,5
80	238	571	21	77,5
90	271	577	24	77,9
100	292	580	24	77,9
110	295	618	24	77,9
120	318	652	24	77,9
130	302	654	24	77,9
140	297	652	24	77,9
150	303	651	24	77,9
160	296	650	22	77,6
170	282	651	24	77,9
180	272	649	21	77,5
190	266	651	22	77,6
200	261	650	21	77,5
210	261	651	21	77,5
220	257	651	21	77,5
230	258	650	20	77,3
240	258	650	18	77,1

Fuente: elaboración propia

Tabla 46. Resultados experimentales para T=650°C y Concentración de catalizador: 5%p/p. replica 2.

T. Operación 650°C Con Catalizador 2				
tiempo (min)	T. Cimas °C	T. Fondos °C	P. Operación (cm H2O)	P. Operación (KPa)
0	34	25	0	74,7
10	37	206	20	77,3
20	39	304	21	77,5
30	40	389	22	77,6
40	43	468	20	77,3
50	47	507	20	77,3
60	52	528	18	77,1
70	145	544	24	77,9
80	204	559	24	77,9
90	240	566	24	77,9
100	269	568	24	77,9
110	293	571	24	77,9
120	313	579	24	77,9
130	327	507	24	77,9
140	333	633	24	77,9
150	319	652	24	77,9
160	309	650	25	78,0
170	307	651	25	78,0
180	304	652	24	77,9
190	287	651	24	77,9
200	272	651	24	77,9
210	265	650	25	78,0
220	261	650	24	77,9
230	267	651	24	77,9
240	255	649	20	77,3

Fuente: elaboración propia

La tabla 47 presenta los resultados obtenidos de cada uno de los productos de la pirolisis en donde el aceite y la carbonilla fueron pesados al finalizar el proceso y los gases son la resta de la masa de la muestra y la masa del aceite pirolítico y carbonilla.

Tabla 47. Resultado en masa de los productos obtenidos.

Temperatura °C	% Catalizador (g)	Alimentación	Masa aceite (g)	Masa cenizas (g)	Masa gases (g)
550	0	500	444	3	53
550	0	500	440	6	54
650	0	500	372	5	123
650	0	500	360	8	132
550	25	525	400	44	81
550	25	525	414	38	73
650	25	525	393	22	110
650	25	525	379	30	116

Fuente: elaboración propia

Con base en la tabla anterior se calculó los rendimientos de cada uno de los productos obtenidos. Para cada una de las condiciones seleccionadas.

Tabla 48. Resultado de rendimiento de productos

Temperatura (°C)	Concentración de catalizador (% p/p)	Aceite %	Carbonilla %	Gases %
550	0	88,80	0,60	10,60
550	0	88,00	1,20	10,80
650	0	74,40	1,00	24,60
650	0	72,00	1,60	26,40
550	5	76,19	8,38	15,43
550	5	78,86	7,24	13,90
650	5	74,86	4,19	20,95
650	5	72,19	5,71	22,10

Fuente: elaboración propia

ANEXO C

COTIZACION PLANTA DE PIROLISIS

Tabla 49. Cotización BESTON

COTIZACION DE PLANTA DE PIROLISIS	
Modelo	BLJ-6
Capacidad diaria	6 MT
Tasa de salida promedio	50%
tamaño del reactor	D 2,2* L 6,0 m
Presión de operación	Presión normal
material del reactor	Acero de caldera Q245R
Velocidad de rotación	0,4-0,8 vueltas/min
Potencia	24Kw/h
Duración	5-8 años
Precio en dólares	60.000
Precio en pesos colombianos	\$ 226.700.400

Fuente: elaboración propia, con base en: Beston CORP.