

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y MEDIOAMBIENTE
HUALPÉN – CHILE



GENERACIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS

Alumno: Cristian Angelo Arriagada Vega

TRABAJO DE TÍTULO PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO DE
EJECUCIÓN EN QUÍMICA, MENCIÓN
CONTROL”.

Profesor guía: Dr. Daniel Moena Flandes.

Octubre, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ (X) Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo:

Generación de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos

Nombre del candidato(a):

Cristian Angelo Arriagada Vega

Carrera / Grado: Ingeniería de ejecución química mención control

Campus: Concepción Departamento: Química y Medio Ambiente

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Daniel Moena Flandes, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente
DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ (x) El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

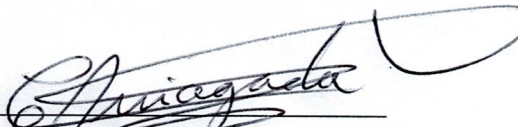
4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26 de octubre de 2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26 de octubre de 2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Daniel Moena por su comprensión, paciencia de trabajo y colaboración en esta etapa final. A mi madre que está en el cielo, padre que permitió seguir estudiando. A mis hermanos mayores. A mi sensei Marcelo Bascuñan que me enseñó mucho sobre la vida y las artes marciales, el poder estoico y la disciplina marcial.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	13
Justificación	14
Objetivo general.....	15
Objetivo específico	15
Metodología.....	15
Alcance del proyecto.....	19
Justificación del problema	22
1. CONVENIO DE BASILEA Y LA ENMIENDA SOBRE RESIDUOS PLÁSTICOS. 25	
1.1. Historia	25
1.2. Comercio Internacional en Chile	26
1.3. Exportación de residuos plásticos desde Chile	26
1.4. Importación de Resinas plásticas	26
1.5. Caracterización del consumo de resinas plásticas en Chile	27
1.6. Datos actualizados hasta el 2022. En Chile	27
1.7. Situación de la industria	28
1.8. Definición del petróleo	29
1.9. Composición del petróleo	30
1.10. Características físicas y químicas del petróleo.	32
1.10.1. Color	32
1.10.2. Olor	32
1.10.3. Densidad	33
1.10.4. Fórmula de gravedad API	33
1.10.5. Índice de refracción	34
1.10.6. Coeficiente de expansión	34
1.10.7. Punto de congelación	34
1.10.8. Punto de deflagración	34
1.10.9. Poder calorífico	34
1.10.10. Calor específico	34
1.10.11. Calor latente de vaporización	35
1.10.12. Caracterización del petróleo	35

1.10.14. Clasificación.....	35
1.10.15. Crudos de referencia	36
1.10.16. Clasificación del petróleo según su gravedad API	36
1.10.17. Según el hidrocarburo predominante	36
1.10.18. Según la caracterización del petróleo	37
1.10.19. Derivados	37
1.10.20. Combustibles	37
2. El origen del plástico: la historia de un material que conquistó el mundo.....	39
2.1. Origen y características generales del plástico.	39
2.2. ¿Cuándo se inventó el plástico?.	40
2.3. Descubrimiento y uso del polietileno	41
2.4. El desarrollo de otros tipos de plásticos.....	41
2.5. Polímero Abreviatura Estructura.....	42
2.6 Termoestables.....	43
2.7. Elastómeros.....	43
2.8. Composites	44
2.9. Plásticos espumados	44
2.10. Cristales líquidos.....	45
2.11. Tipos de aditivos.....	45
2.12. Plastificantes	46
2.13. Teorías de la plastificación.....	47
2.14. Modelo de Moorshead	48
2.15. Estabilizantes	51
2.16. Antioxidantes	51
2.17. Estabilizantes Ultravioletas.....	52
2.18. Estabilizantes térmicos	52
2.19. Lubricantes.....	53
2.20. Lubricantes externos.....	53
2.21. Lubricantes internos	55
2.22. Cargas	55
3. INTRODUCCIÓN A LA PIROLISIS	60
3.1. ¿Qué es la pirólisis de plástico?	60
3.2. ¿Cómo funciona la pirólisis?	61

3.3. Producción de PPO mediante pirólisis	61
3.4 Propiedades del aceite pirolítico plástico	67
3.5. Características de rendimiento del motor	68
3.5.1. Eficiencia térmica del freno (BTE)	68
3.5.2. Modelado del rendimiento del motor, las emisiones, las características de combustión.....	73
3.5.3 Características de las emisiones del motor	77
a) El monóxido de carbono (CO)	77
b) Dióxido de Carbono CO₂	81
c) Humo	83
d) Hidrocarburo no quemado	84
e) Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y metales pesados.	87
f) NOx.....	90
3.6. Análisis tecnoeconómico	95
3.6.1. Viabilidad económica del proceso de pirólisis del plástico	95
3.6.2. Viabilidad económica del proceso de destilación de PPO crudo	96
3.6.3. Viabilidad económica del uso de PPO y sus mezclas en motores diésel	97
4. PIROLISIS CATALÍTICA DE RESIDUOS PLÁSTICOS Y EFECTOS DE SIMETRÍA MOLECULAR: UNA RESEÑA	99
4.1. Estructura del catalizador y mecanismo de pirólisis	100
4.2. Aplicación de zeolitas para la pirólisis catalítica del plástico.....	104
4.3. Aplicación de catalizadores naturales para la pirólisis plástica.	109
4.4. Aplicación de otros tipos de catalizadores para la pirólisis catalítica del plástico.	113
4.5. Comparación entre pirólisis térmica y catalítica.	114
4.6. Efectos de simetría molecular en procesos de pirólisis.	117
4.7. Discusiones y conclusiones	123
5. HIDROLISIS. ¿QUÉ ES? DEFINICIÓN. INTRODUCCIÓN A LA HIDROLISIS.	128
5.1. Tipos de hidrólisis	128
5.2. Hidrólisis neutra.....	129
5.3. Hidrólisis Alcalina.....	132
5.3.1. Antecedentes	132
5.3.2. Patentes concedidas para la hidrólisis alcalina,.....	134

5.3.3. Agentes de transferencia de fase como catalizadores para la hidrólisis alcalina.	134
5.3.4. Métodos de calentamiento alternativos: microondas y ultrasonidos.	135
5.3.5. Hidrólisis alcalina: Estudios recientes.	135
5.3.6. Hidrólisis ácida.	137
5.3.6.1 Antecedentes.	137
5.3.6.2 . Patentes concedidas para la hidrólisis ácida.	138
5.3.6.3 Enzimas como catalizadores para la hidrólisis ácida.	142
5.3.6.4. Hidrólisis ácida: Estudios recientes	142
5.3.6.5. Hidrólisis alcalina vs. Hidrólisis ácida.	144
5.4. Modos de hidrolisis	144
5.5. Hidrólisis en fase líquida	144
5.6. Hidrólisis en fase vapor	144
5.7. Hidrocrackeo/hidrogenación	146
5.8. Solvólisis (despolimerización o quimiólisis)	147
5.9. Glucólisis	148
5.10. Alcohólisis	150
5.11. Aminólisis	151
5.12 Enzimólisis.	152
5.13. Resultados de la hidrólisis	155
6. IMPLEMENTACIÓN	165
6.1 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA RECONVERSIÓN	165
6.2 Criterios	167
6.3. Inversión Inicial Estimada	170
5.4 Factores Críticos de Éxito.	171
7. MARCO LEGAL	173
7.1. Comercialización del Diésel Sintético.	173
7.2. Evaluación de Impacto Ambiental	176
7.3. Análisis de mercado	178
7.3.1. Consumo de combustible	178
7.3.2. Consumo por sector	178
7.3.3. Consumo por región	180
7.3.4. Mercado potencial	181

7.3.5. Mercado objetivo.....	181
7.3.6. Análisis financiero	183
7.3.7. Inversión	183
7.3.7.1. Inmobiliario	183
7.3.7.2. Terreno	183
7.3.7.3. Maquinaria	184
7.3.7.4. Planta.....	184
7.3.7.5. Estimación de Costos Directos.....	185
7.3.7.6. Estimación de costos indirectos.....	185
7.3.7.7. Contingencia.....	185
7.3.7.8. Publicidad y Promoción	186
7.3.7.9. Inversión total.....	187
7.3.7.10. Costos. Costos Fijos y Variables.....	187
7.3.8. Ingresos.....	190
7.3.8.1. Precio del Diésel Sintético	190
7.3.8.2. Negro de humo	192
7.3.8.3. Scrubbers o lavadores de gases.	192
7.3.9. Comparación: Diesel vs. Petróleo Pirolítico vs. Petróleo Hidrolítico (Degradación del Plástico).....	193
7.3.10. Indicadores y Parámetros.....	195
7.3.11. Flujos de Caja.....	195
7.3.12. Análisis de Sensibilidad	196
7.3.13. Impuesto específico	197
7.3.14. Precio del Petróleo Diesel.....	197
7.3.15. Caso Proyecto General.....	198
7.3.16. Caso Línea Única de Procesamiento de Plásticos.	199
7.3.17. Caso Línea Única de Procesamiento de otros tipos de plásticos.....	200
7.3.18. Precio del Plástico	201
7.3.19. Caso Proyecto General.....	202
7.3.20. Caso Línea Única de Procesamiento de Plásticos	203
7.3.22. Caso Proyecto General.....	205
CONCLUSIÓN	206
Conclusión de la factibilidad de los procesos en la producción del aceite Nafta.	209

REFERENCIAS	217
BIBLIOGRAFÍA	220

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación de residuos en Chile a nivel nacional y según su origen durante el periodo 2015-2016.....	14
Figura 2. Comparación del tratamiento de residuos en Chile y en otros países.	16
Figura 3. Moledora y horno de pirolisis.....	17
Figura 4 Productos obtenidos de la pirolisis.	17
Figura 5 Máquina de pirolisis.....	19
Figura 6. Máquina de hidrolisis.....	19
Figura 7. Máquina hidrolisis enzimática.....	19
Figura 8. Máquina hidrolisis glucolisis.....	19
Figura 9. Destilación fraccionaria del petróleo.	23
Figura 10. Muestra una maquina de distalación a pequeña escala.	24
Figura 11. Estructura de la molécula petrolífera.	31
Figura 12. Efecto sobre el volumen libre de a) los grupos terminales, b) ramificaciones, c) vibraciones consecuencia del aumento de la temperatura y d) la adición de plastificantes.	48
Figura 13. Las moléculas plastificadas con estos plastificantes presentan una buena flexibilidad.....	51
Figura 14. Capa límite de lubricante entre la superficie metálica y el polímero fundido.	54
Figura 15. Barril de petróleo.	56
Figura 16. Diagrama esquemático del reactor de pirólisis experimental.	62
Figura 17. Planta de pirólisis de plásticos de desecho de CQU.	63
Figura 18. Rendimiento de aceite pirolítico plástico a partir de pirólisis térmica (en % en peso).....	64
Figura 19. Cambios en BTE con cargas variables para PPO, mezclas de PPO y diésel. .	70
Figura 20. Variación de la temperatura de los gases de escape tanto para el diésel como para el PPO con diferentes potencias de frenado.	78
Figura 21. Emisión de CO con carga variable.....	80
Figura 22. Cambios en la emisión de CO ₂ al usar PPO y su mezcla con diésel y DEE...	82
Figura 23. Emisión de hidrocarburos no quemados frente a la carga.	86
Figura 24. Contenido de PAH en PPO crudo (CS) y fracción de diésel destilado (DC). Plastic the facts 2017. Plastic Europe Market Research Group.	88
Figura 25. Variación en la emisión de NO _x con respecto a la carga.....	91
Figura 26. Costo operativo de la planta por kg vs. capacidad de la planta.	95
Figura 27. Esquema del proceso de reciclaje de gasificación.	104

Figura 28. Tipos de pirolisis: Pirólisis térmica y catalítica.	122
Figura 29. Productos de la pirolisis.	123
Figura 30. Representa cómo es la reacción química en forma interna del reactor.	127
Figura 31. Proceso de reciclaje químico de residuos de PET.	128
Figura 32. Hidrólisis neutra del tereftalato de polietileno (PET) a ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG).	129
Figura 33. Hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno (PET) con hidróxido de sodio, recuperación de TPA con H ₂ SO ₄	132
Figura 34. Mecanismo de hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno (PET): (a) etapa de disociación, (b) etapa de adición nucleofílica, (c) etapa de hidrólisis, (d) etapa de desprotonación y (e) etapa de formación. 218 - 220.	133
Figura 35. Mecanismo de hidrólisis del tereftalato de polietileno (PET) con H ₂ SO ₄	139
Figura 36. Mecanismo para la hidrólisis ácida del tereftalato de polietileno (PET), (a) paso de disociación, (b) primer paso de protonación, (c) paso de ataque de la molécula de agua, (d) segundo paso de protonación, (e) paso de formación, propuesto por Li et al.	140
Figura 37. Hidrólisis neutra de tereftalato de polietileno (PET) a ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG).	146
Figura 38. Esquema del proceso de reciclaje de hidrocraqueo/hidrogenación.	147
Figura 39. Esquema del proceso de reciclaje de hidrocraqueo/hidrogenación.	148
Figura 40. Esquema del proceso de reciclaje de la glucólisis.	149
Figura 41. Representación esquemática del mecanismo de glucólisis de PET.	149
Figura 42. Representación de la hidrólisis de polisacáridos. PET.	150
Figura 43. Esquema propuesto del proceso de reciclaje de metanolisis.	151
Figura 44. Representación esquemática del mecanismo de la metanolisis del PET.	151
Figura 45. Esquema propuesto del proceso de reciclaje de aminólisis.	152
Figura 46. Representación esquemática del mecanismo de aminólisis de PET.	152
Figura 47. Esquema del proceso de reciclaje enzimático.	154
Figura 48. Representación esquemática del mecanismo de degradación enzimática del PET.	154
Figura 49. Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de degradación hidrolítica.	157
Figura 50. Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de biodegradación.	158
Figura 51. Variación del pH de la solución amortiguadora durante el proceso de degradación hidrolítica.	160
Figura 52. Espectro Infrarrojo de la solución amortiguadora utilizada en el proceso de degradación hidrolítica.	161
Figura 53. Espectro infrarrojo del PP, PET y PLA. (a) Al inicio del proceso, día 0. (b) Al final del proceso de biodegradación, día 68. (c) Al final del proceso de degradación hidrolítica, día 68.	163
Figura 54. Diagrama de flujo de la propuesta metodológica para la reconversión de centrales termoeléctricas a carbón. (Elaboración propia).	165
Figura 55. Ubicación e infraestructura de la central Guacolda.	169
Figura 56. Diagrama de flujo del plástico y combustible sintético. PET.	170

Figura 57 Viabilidad por sectores de empresas derivadas del combustible sintético. PET.	177
Figura 58. Variaciones VAN Proyecto General frente a cambios en el Precio del Diésel.	198
Figura 59. Variaciones VAN Línea Plásticos frente a cambios en el Precio del Diésel.	199
Figura 60. Variaciones VAN Línea plásticos frente a cambios en el Precio del Diésel.	201
Figura 61. Variaciones VAN del Proyecto General frente a cambios en el Precio del Plástico.	203
Figura 62. Variaciones VAN Línea Plásticos frente a cambios en el Precio del Plástico.	204

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de Reciclado de Plásticos Postconsumo.....	29
Tabla 2. Estructura de algunos plásticos de altas prestaciones.....	42
Tabla 3. Aditivos para plásticos.....	46
Tabla 4. Aditivos para plásticos.....	50
Tabla 5. Composición de los elementos componentes del petróleo y aceite.....	56
Tabla 6. Propiedades del petróleo crudo según la Opex.	57
Tabla 7. Datos crudos completos.....	58
Tabla 8. Hidrocarburos ligeros.	59
Tabla 9. Rendimiento de productos de pirólisis de distintos residuos plástico.	64
Tabla 10. Propiedades comparativas del PPO y diésel.	68
Tabla 11. Efecto del PPO en el rendimiento del motor diésel.	71
Tabla 12. Efecto de diferentes aceites pirolíticos sobre las emisiones del motor en comparación con el combustible diésel comercial.	93
Tabla 13. Cuadro comparativo de los productos resultantes de la pirolisis en comparación a hidrolisis y petróleo diesel.	126
Tabla 14. Resultados según la opex de los diferentes plásticos y sus propiedades térmicas y de ramificación.	126
Tabla 15. Clasificación del plástico P.M. g/mol.....	127
Tabla 16. Estudios destacados reportados en la literatura sobre la hidrólisis neutra del PET.	130
Tabla 17. Estudios destacados reportados en la literatura sobre la hidrólisis ácida del PET.	136
Tabla 18. Valores de Índice de Fluidéz obtenido para los materiales puros utilizados y de las mezclas preparadas a diferentes proporciones de PLA.....	155
Tabla 19. Porcentaje de pérdida de masa (%Pm) durante los procesos de degradación.	157
Tabla 20. Inversión estimada en equipos e infraestructura para una planta de procesamiento de plásticos mediante el método “Medio Hecho”.	171
Tabla 21. Generación de residuos sólidos municipales por región.....	172
Tabla 22. Generación de Residuos sólidos municipales por región.....	172
Tabla 23. Normativas Asociadas a la Manipulación de Combustibles.	174
Tabla 24. Otras normas asociadas al proyecto.....	175
Tabla 25. Consumo de Diesel por Sector en miles de m3 (años 2004 a 2008).....	179
Tabla 26. Distribución Regional del Consumo de Diésel.	180
Tabla 27. Numero de vehículos a abastecer.	182
Tabla 28. Costos de Marketing.....	186
Tabla 29. Desgloce de la Inversión.	187
Tabla 30. Costos Fijos Mensuales.....	188
Tabla 31. Costos variables mensuales para línea de plásticos.....	189
Tabla 32. Costos Mensuales Totales y Unitarios.	190
Tabla 33. Precio a Distribuidor Mayorista (en USD/m3).....	191

Tabla 34. Penetración de Mercado	192
Tabla 35. Comparación: Diésel vs. Petróleo Pirolítico vs. Petróleo Hidrolítico (Degradación del Plástico)	193
Tabla 36. Ingresos Promedio Mensuales y Anuales.....	195
Tabla 37. Resultados Flujos de Caja	196
Tabla 38. Resultados Flujo de Caja con Impuesto Específico.....	197
Tabla 39. Resultados Simulación para el Proyecto General.....	199
Tabla 40. Resultados Simulación para Línea de Plásticos.	200
Tabla 41. Resultados Simulación de otros tipos de Línea de plásticos, PVC, PET, PE, PP	200
Tabla 42. Resultados Simulación para Proyecto General.	202
Tabla 43. Resultados Simulación para Línea de Plásticos.	203
Tabla 44. Resultados para Proyecto General.....	205
Tabla 45. Aspectos Generales.....	214
Tabla 46. Productos generados.	215
Tabla 47. Composición de productos.....	215
Tabla 48. Rendimiento típico.	215
Tabla 49. Comparación resumida de productos derivados del proceso.	216

INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre es hombre ha utilizado utensilios para resolver sus problemas y necesidades, para hacer más fácil la vida. Desde que apareció la tecnología y nuevos materiales. Ha permitido resolver los diferentes problemas y necesidades, del ser humano. Como el plástico ha permitido un gran avance en la tecnología, tanto a niveles industrial como domiciliario, esto abarato costo, y permitió reemplazar muchos materiales, que las empresas usaban como el vidrio, que su producción y compras a entre el mundo empresarial, por el bien de abaratar costo y aumentar las ganancias implementaron, estos nuevos materiales. Como el plástico, que se han usado de diferentes maneras. Pero provoco otro problema la acumulación y la no absorción por parte de la naturaleza, porque no hay o encontramos muy pocos organismos, capaces de degradarlos.

Aun así, es posible imaginar soluciones donde la tecnología trabaje a favor de la naturaleza. Por ejemplo, disminuir el uso innecesario de plásticos, emplearlos como materia prima para materiales alternativos —como maderas sintéticas— o combinarlos con otros compuestos que reduzcan su impacto ambiental.

Mediante análisis, experimentación y simulación, es posible desarrollar tecnologías capaces de disminuir la cantidad de plástico en el medio ambiente. Complementado con legislaciones que reduzcan su producción y promuevan su reutilización, este enfoque puede aportar significativamente a la mitigación del problema global de los residuos plásticos.

Muchos tipos de plásticos pueden transformarse en combustible, principalmente mediante pirólisis, o hidrólisis un proceso termoquímico que descompone los polímeros en sus componentes derivados del petróleo. Los materiales más adecuados para este proceso son el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (LDPE) y el polipropileno (PP) —correspondientes a los códigos de identificación 2, 4 y 5— debido a que están compuestos principalmente de carbono e hidrógeno. Pero especialmente los tipo de plásticos que podemos usar son el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el tereftalato de polietileno (PET), el cloruro de polivinilo (PVC) y el poliestireno (PS). Algunos plásticos termoestables son el poliuretano (PUR).

Algunas empresas que en Chile ya están funcionando con este método son estas empresas que han resultados uso adecuado de su combustible reciclado.

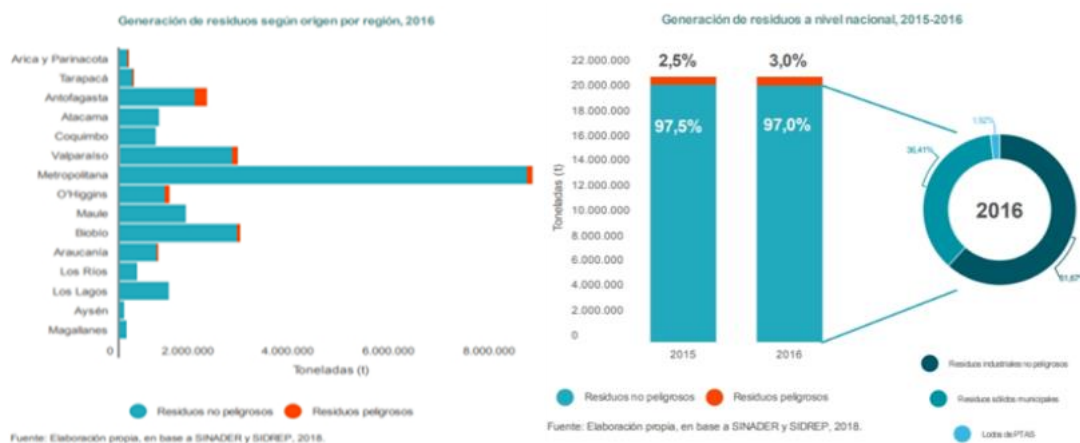
Justificación

El uso del plástico ha aumentado considerablemente, llegando incluso a formar grandes acumulaciones o “islas” de este material, las cuales afectan la flora y la fauna del planeta, incluido Chile. Esta contaminación puede provocar daños tanto en animales como en plantas y cultivos, generando más problemas que beneficios debido a la dificultad para encontrar soluciones efectivas para su degradación y reciclaje.

Esta situación se relaciona con la producción de grandes cantidades de plástico y con su escaso tratamiento posterior. Frente a este problema, se propone la creación de materiales reciclados a partir de plásticos de un solo uso, buscando la mejor alternativa para su reutilización mediante procesos químicos.

Como parte de los desechos sólidos, los residuos plásticos se generan durante la producción y transformación del plástico en distintos productos, así como después de su consumo en los ámbitos industrial, comercial y doméstico. Se estima que, del millón de toneladas de plástico consumidas anualmente en Chile, solo un 8,5 % es reciclado. Esto significa que la mayor parte, aproximadamente un 91,5 %, termina en vertederos u otros lugares de disposición final. Esta situación se inserta en un contexto de alta generación de residuos, ya que en 2016 el país produjo más de 20 millones de toneladas de residuos totales, principalmente no peligrosos. **Oceana Chile. (2023). Nadando en plásticos: la preocupante situación de nuestros océanos.** [Oceana Chile](#)

Figura 1. Generación de residuos en Chile a nivel nacional y según su origen durante el periodo 2015-2016.



Nota. El gráfico muestra la generación de residuos en Chile a nivel nacional y según su origen durante el periodo 2015-2016. Tomado de *Residuos. Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente* [Gráfico], por SINADER y SIDREP, 2018, SINIA Ministerio del Medio Ambiente (<https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/8-residuos-pdf.pdf>).

Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica del plástico de un solo uso como combustible mediante la aplicación de técnicas termoquímicas, con el fin de aprovechar los residuos plásticos como fuente alternativa de energía.

Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades químicas de plásticos de un solo uso (PET; PP y PE) para determinar su viabilidad en la producción de combustible mediante procesos termoquímicos.
- Analizar las condiciones de operación o sistema experimental de pirólisis, e hidrólisis que permita transformar residuos plásticos en combustibles líquidos o gaseosos de manera eficiente y sostenible.
- Caracterizar la viabilidad técnica de combustible sintético obtenidos por medio de la pirólisis e hidrólisis, que resultaron derivado de plásticos comparándolo con un combustible natural, evaluando, propiedades caloríficas y eficiencia en condiciones controladas de prueba.

Metodología

El objetivo principal del desarrollo experimental de experiencias de otros investigadores fue probar la capacidad de la técnica de pirólisis por microondas para su aplicación en el tratamiento de residuos de plástico, con la obtención de subproductos de alto valor añadido. Como primer paso, se realizó una revisión de la literatura, la cual permitió recopilar antecedentes y planificaciones experimentales más detalladas. Esta información aportó los conocimientos necesarios para plantear un desarrollo bibliográfico y experimental orientado al cumplimiento de los objetivos propuestos.

Para conocer el comportamiento del material ante diferentes situaciones y cuál de ellas puede ser considerada la más favorable, se planifica una tanda de pruebas en las que se modifican de forma ordenada las siguientes variables:

1. Se buscará información de los plásticos como son transformados en combustible, su forma de trabajarlo y procesarlo desde la elección del plástico de un solo uso., separación.
2. Buscar material que Caracterice la viabilidad técnica de combustible sintético obtenidos por medio de la pirólisis e hidrólisis, que resultaron derivado de plásticos comparándolo con un combustible natural, evaluando su desempeño, propiedades caloríficas y eficiencia en condiciones controladas de prueba.
3. La experiencia de uso de que tamaño es la mejor forma de una reacción de una pirólisis e hidrólisis, Una moladora de plástico permite disminuir el tamaño de los plásticos, en pequeños cuadrados más fácil de trabajar, y llevar a fundir.

4. Como ocurre la reacción en Horno de pirólisis para degradar los plásticos, las reacciones diferentes de hidrólisis donde de los diferentes plásticos reaccionan dejando sitios activos para reacción química.
5. Los resultados contenidos al introducir al estanque de Hidrólisis acida, básica o enzimática. Para romper los enlaces polimeros y hacerlo más pequeños. A nivel molecular de reacciones químicas. Otra parte va al estanque de químiolisis en donde las moléculas son rotas e degradadas por ácido y bases fuertes. Para dejarlo en moléculas sencillas y fácil de destilar.
6. Los productos de los tres procesos pasan a un destilador a escala de los grandes de petróleo, dejando subproducto y todos los demás productos que se destilen del proceso, por separado. Si se hace juntos se debe medir la cantidad de ácido y bases presentes en los procesos químicos, para evitar daño al destilador.
7. Analizar las condiciones de operación o sistema experimental de pirólisis e hidrólisis que permita transformar residuos plásticos en combustibles líquidos o gaseosos de manera eficiente y sostenible. Se analizarán las pruebas y los diferentes materiales, productos de la reacción química. Se evitará los desechos tóxicos y cuyos reactantes serán eliminados de la producción.
8. Se analizarán resultados de las pruebas y los diferentes materiales, productos de la reacción química. Se evitará los desechos tóxicos y cuyos reactantes serán eliminados de la producción.
9. Anotaciones de los resultados y desempeño de los diferentes combustibles, como resultados de la pirolisis e hidrolisis, en vehículo, ya probados en otras investigaciones científicas y económicas.

Figura 2. Comparación del tratamiento de residuos en Chile y en otros países.



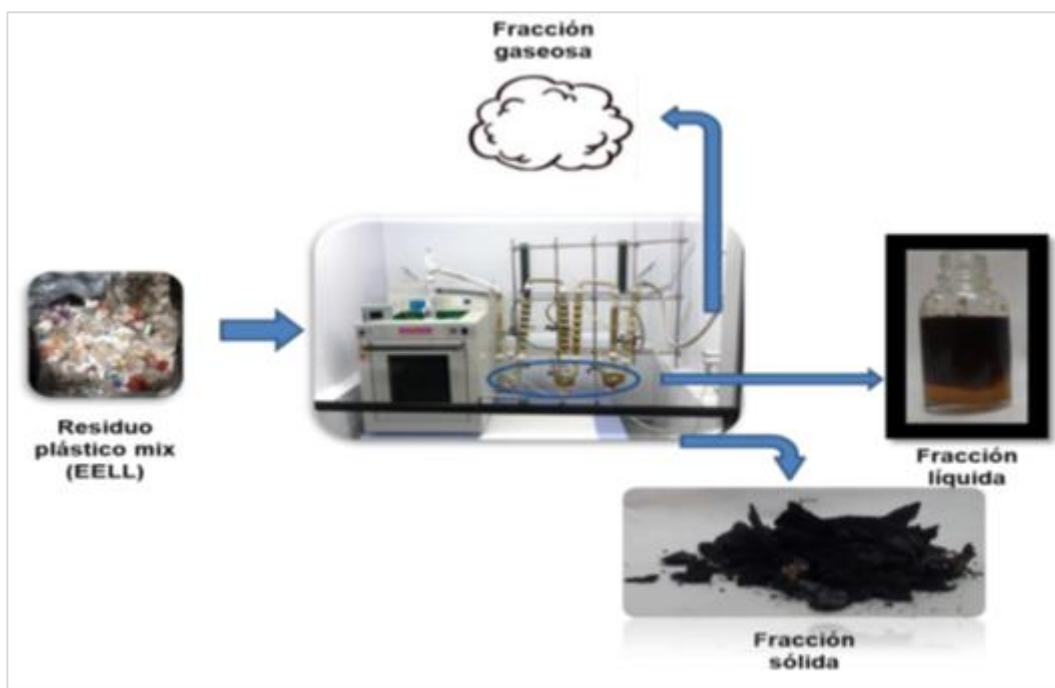
Nota. El gráfico muestra una comparación del tratamiento de residuos en Chile y en otros países [Gráfico], Tomado de *Nadando en plásticos: la preocupante situación de nuestros océanos* por Oceana Chile, 2023, Oceana Chile (<https://chile.oceana.org/blog/nadando-en-plasticos-la-preocupante-situacion-de-nuestros-océanos/>)

Figura 3. Moledora y horno de pirolisis.



Nota. La fotografía muestra una moleadora y trituradora para plásticos y un horno de pirolisis. Tomado de “*Molinos y Trituradores para plásticos*” [Fotografía], por RRC Maquinarias, 2023, RRC Maquinarias (<https://rrcltda.cl/index.php/molinos-y-trituradores-para-plasticos/>)

Figura 4 Productos obtenidos de la pirolisis.



Nota. La fotografía muestra los productos obtenidos de la pirolisis. Tomado de “*Avances de investigación para el reciclado químico de residuos plásticos, mediante pirólisis, para la obtención de productos comerciales*” [Fotografía], por S. González Egido, 2018, Pyrolysis Machine (<https://www.pyrolysismachine.com/es/pyrolysis-of-mixed-plastic-waste/>)

Como primera etapa del proyecto, se realizará una revisión bibliográfica sobre la historia, el origen y las principales características del petróleo y del plástico. Posteriormente, se estudiarán los conceptos relacionados con el petróleo pirolítico y los procesos de pirólisis, hidrólisis. Esta revisión permitirá establecer los fundamentos teóricos necesarios para analizar la viabilidad del proyecto y planificar su posible desarrollo experimental.

También será necesario conocer las principales características de la industria del petróleo en Chile, su proceso productivo y la elaboración de combustibles sintéticos. Además, se revisarán las normativas relacionadas con el tratamiento de residuos, la producción de combustibles y la protección ambiental.

Estos antecedentes permitirán evaluar la posibilidad de transformar residuos plásticos en productos con valor energético mediante procesos químicos y térmicos, considerando también los resultados de investigaciones anteriores.

El estudio comenzará con el análisis del proceso de reciclaje de los residuos plásticos, incluyendo su recolección, clasificación, selección, limpieza y reducción de tamaño. Estas etapas son necesarias para retirar impurezas y obtener un material que pueda ser procesado en condiciones más controladas.

Para desarrollar el estudio, se abordarán los siguientes contenidos:

- Definición, composición y origen del petróleo.
- Historia, características y clasificación de los plásticos.
- Fundamentos de la pirólisis, la hidrólisis.
- Marco jurídico y normativas aplicables.
- Cotización de equipos para el tratamiento y la transformación de residuos plásticos.
- Comparación de las propiedades físicas y químicas de los combustibles convencionales y sintéticos.
- Posibles tratamientos de purificación antes de utilizar o comercializar el combustible.
- Análisis de los precios y de la posible competitividad del producto en el mercado.

Entre los materiales que se pretende estudiar se encuentran principalmente los plásticos de un solo uso. Después de su clasificación y acondicionamiento, estos residuos serán sometidos a diferentes procesos de transformación. Los productos obtenidos serán separados, tratados y caracterizados para determinar sus propiedades y establecer si pueden utilizarse como combustibles, materias primas u otros productos de interés.

Los procesos de pirólisis, hidrólisis y quimiólisis tienen como finalidad romper las largas cadenas de los polímeros y transformarlas en moléculas más pequeñas. La información bibliográfica permitirá seleccionar las condiciones más apropiadas para cada tratamiento y evaluar nuevos métodos de transformación de los residuos plásticos.

Figura 5 Máquina de pirolisis.



Figura 7. Máquina hidrolisis enzimática



Figura 6. Máquina de hidrolisis.



Figura 8. Máquina hidrolisis glucolisis



Nota. (Figuras 5, 6, 7 y 8) Las fotografías muestran las maquinarias que se deben usar en los procesos de pirolisis e hidrolisis. Tomado de *Avances de investigación para el reciclado químico de residuos plásticos, mediante pirólisis, para la obtención de productos comerciales* [Fotografías], por S. González Egido, 2018, Pyrolysis Machine, (<https://www.pyrolysismachine.com/es/pyrolysis-of-mixed-plastic-waste/>)

Alcance del proyecto

Desde comienzos de la década del 2000, el uso del plástico ha aumentado considerablemente, pasando de una utilización más limitada a convertirse en una materia prima presente en una gran variedad de productos y actividades. Entre los principales tipos de plásticos se encuentran el polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS). También existen plásticos termoestables, como el poliuretano (PUR), cuyas características químicas deben considerarse al momento de seleccionar un proceso de transformación.

Este proyecto se centra en la modificación y transformación de residuos plásticos para la obtención de productos con potencial uso energético. La propuesta se sustenta en tres aspectos principales: disminuir la cantidad de residuos plásticos presentes en el medio ambiente, buscar alternativas que permitan reutilizarlos en beneficio de la comunidad y evaluar la posibilidad de obtener productos que puedan tener un valor económico.

De esta manera, el proyecto podría contribuir al reciclaje y a la disminución de residuos plásticos destinados a disposición final. Para ello, se propone estudiar procesos de degradación y transformación química que permitan obtener productos líquidos o gaseosos con potencial energético. Los productos obtenidos deberán ser posteriormente caracterizados y, cuando sea necesario, sometidos a procesos de purificación o refinamiento antes de evaluar su posible utilización como combustibles.

Para alcanzar este propósito se estudiarán diferentes alternativas de transformación de los residuos plásticos, entre pirólisis, y hidrólisis. Se espera desarrollar el estudio durante un periodo aproximado de cuatro meses, obteniendo resultados cuantificables y reproducibles que permitan evaluar las condiciones necesarias para implementar estos procesos y determinar su factibilidad.

Centrar en la modificación de plástico para la creación de combustible, creando tres fundamentos principales una eliminar la cantidad de plástico del medio ambiente. Dos buscar la forma de usarlo para un bien para la comunicada, y la tercera propiedad es buscar dinero al vender o usarlo en una recuperación económica.

Con este proyecto tendrá una serie de beneficios como el reciclaje limpieza de medio ambiente. En el termito de este proyecto es lograr actividades de degradación por medios de la química, para la obtención de un combustible que se pude usar en hoguera en calderas de invierno, empresa en calderas de gran escala y motores de vehículos particulares o de empresas de transporte.

En el termito de este proyecto es logra con cuatro o modificaciones químicas, para la aplicación y modificación química de plásticos. El tiempo requerido es de cuatro meses medibles en datos duros y cuantificable e repetible para cualquier persona natural

En Chile se consumieron aproximadamente **1,4 millones de toneladas de productos plásticos en 2022**, de los cuales se recicló un **7,8%**, es decir, unas 106.870 toneladas. No hay datos disponibles sobre la producción por regiones, pero la Región Metropolitana es la que más residuos municipales genera, seguida por Valparaíso y Biobío, ya que concentran la mayor parte de la población del país. Los pocos datos que se tienen es Consumo y reciclaje de plástico en Chile. (ASIPLA 2024). Los pocos datos que se tienen es de:

La generación de residuos se concentra principalmente en aquellas regiones que presentan una mayor población y actividad económica, como la Región Metropolitana, Valparaíso y Biobío.

Por esta razón, al momento de diseñar estrategias de recolección, clasificación y valorización de residuos plásticos, también será necesario considerar las características particulares de cada territorio.

En este contexto, la sustitución total de los plásticos no necesariamente constituye la única solución al problema ambiental. Otra alternativa consiste en disminuir la cantidad de residuos que llegan a vertederos y aumentar su reutilización, reciclaje y valorización. El aprovechamiento de materiales que ya han requerido materias primas y energía para su fabricación podría contribuir, además, a disminuir la necesidad de producir nuevos materiales a partir de recursos vírgenes.

Por lo tanto, uno de los propósitos del proyecto es establecer las bases de factibilidad técnica, económica y logística necesarias para desarrollar un sistema de transformación de residuos plásticos. Con ello se busca generar antecedentes que permitan evaluar si la propuesta puede ser implementada y posteriormente reproducida en diferentes contextos. Asimismo, se propone considerar la implementación de iniciativas de recolección y separación de residuos plásticos a nivel municipal, incorporando establecimientos de educación básica y media. De esta manera, el proyecto podría integrar un componente educativo orientado a promover la separación de residuos en los hogares y favorecer cambios de comportamiento relacionados con el reciclaje y el cuidado del medio ambiente.

En Chile existen empresas, centros de investigación e iniciativas que han desarrollado proyectos relacionados con la valorización y transformación de residuos plásticos, entre ellos Elementum, la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT) vinculada a la Universidad de Concepción y GreenPlast. Estas experiencias constituyen antecedentes relevantes para analizar la factibilidad técnica de este tipo de procesos y conocer las alternativas que actualmente se están desarrollando en el país.

El 45,7% de estos residuos provino de la Región Metropolitana. Tenemos también la de la región de Valparaíso es de 10. La región Metropolitana, 10 en la región de Bio Bío es de 8.7 %. Y la región de Coquimbo es de 4.7% de reciclaje de plástico en las regiones más conocidas de Chile.

Puede verse entonces, que la sustitución de los plásticos no es un camino en favor de la ecología; en general, las soluciones deben enfocarse a eliminar y evitar los vertederos como tales, además de a tratar de reaprovechar en todo lo posible, los materiales que tienen energía de transformación acumulada, y que pueden también contribuir a disminuir la producción de material "virgen", que a su vez implica más consumo de recursos naturales para producir la energía necesaria para transformarlos.

En determinadas palabras el objetivo es lograr dar las bases de factibilidad económica, logística, además de sumar la parte de inteligencia para llevar a cabo dicho proyecto por cualquier persona que quiera desarrollarlo y lograr los dos objetivos que se plantea en dicho proyecto.

Lograr la ejecución en una ciudad a nivel de alcaldía, educacional de nivel básico e incluso media la separación de residuos plásticos en familias e hogares a lo modo de educacional e científicos, permitiendo las futuras generaciones el cambio de paradigma e comportamiento humano.

Se debe nombrar que en Chile ya hay tres empresas que trabajan de esta manera, los cuales podemos encontrar Elementum, Universidad de Concepción (UdeC / UDT), GreenPlast. Chile produce aproximadamente **12.858 barriles de petróleo diarios** (cifra de 2016). Al producir este tipo de petróleo plástico o sintético. “Consumo y reciclaje de plástico en Chile. (ASIPLA 2024).

Justificación del problema

Entre los aspectos que se deberán evaluar se encuentran los costos de producción, con el propósito de determinar si los productos obtenidos podrían alcanzar un precio competitivo frente a otras alternativas disponibles en el mercado. Además, será necesario considerar el tratamiento y disposición de los residuos generados durante el proceso, procurando disminuir al máximo su impacto ambiental.

Una vez obtenidos los productos líquidos mediante la transformación de los residuos plásticos, estos deberán pasar por etapas de separación y purificación. La Figura 9 representa el principio de la destilación fraccionada, proceso mediante el cual una mezcla de hidrocarburos puede separarse en distintas fracciones de acuerdo con sus rangos de ebullición. Aunque la figura corresponde al procesamiento convencional del petróleo, permite comprender el fundamento de una posible etapa de separación de los productos obtenidos a partir de residuos plásticos.

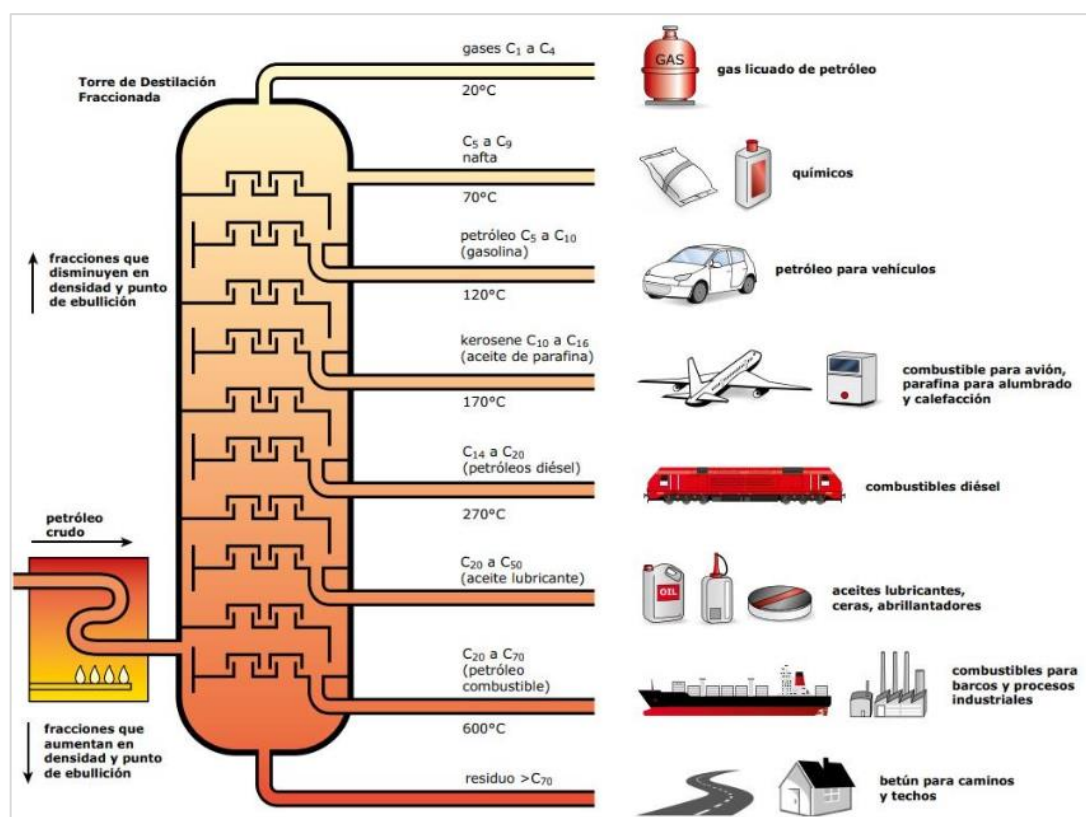
Otro aspecto que justifica esta propuesta es la baja producción nacional de petróleo y la elevada cantidad de residuos plásticos generados en Chile. Sin embargo, el propósito del proyecto no es plantear que el país pueda reemplazar su producción de petróleo convencional mediante residuos plásticos, sino **evaluar una alternativa de valorización que permita transformar parte de estos residuos en productos con potencial energético**.

En Chile se consumieron aproximadamente 1,4 millones de toneladas de productos plásticos durante 2022, de las cuales se recicló alrededor de un 7,8 %, equivalente a aproximadamente **106.870 toneladas**. Estos antecedentes evidencian que una proporción importante de los residuos plásticos no retorna actualmente al ciclo productivo, por lo que resulta relevante investigar alternativas complementarias de reciclaje y valorización.

A modo de estimación teórica, si se consideraran las 106.870 toneladas de plástico recicladas y se alcanzara un rendimiento de 300 litros de producto líquido por tonelada procesada, podrían obtenerse aproximadamente **32,1 millones de litros al año**. En un escenario con un rendimiento de 500 litros por tonelada, esta cantidad podría alcanzar aproximadamente **53,4 millones de litros anuales**. Estas cifras corresponden únicamente a una proyección y deberán contrastarse con los rendimientos experimentales, el tipo de plástico utilizado, la eficiencia del proceso y las características del producto obtenido.

De esta manera, la propuesta busca estudiar la posibilidad de aprovechar residuos plásticos como materia prima para obtener productos con potencial valor energético, contribuyendo tanto a disminuir su disposición final como a explorar nuevas alternativas de valorización dentro de un modelo de economía circular. “Consumo y reciclaje de plástico en Chile. (ASIPLA 2024).

Figura 9. Destilación fraccionaria del petróleo.



Nota. La fotografía muestra la destilación fraccionaria del petróleo. Tomado de ¿Cómo se elabora el Diesel? [Fotografía], por Duran Mtz., J., 2023, Facturei MX. (<https://www.facturei.mx/news/articulo/como-se-elabora-el-diesel-37>)

Figura 10. Muestra una maquina de distalación a pequeña escala.



Nota. La fotografía muestra una máquina de destilación a pequeña escala. Tomado de *¿Cómo se elabora el Diesel?* [Fotografía], por Duran Mtz., J., 2023, Facturei. (<https://www.pyrolysismachine.com/es/pyrolysis-of-mixed-plastic-waste/>)

1. CONVENIO DE BASILEA Y LA ENMIENDA SOBRE RESIDUOS PLÁSTICOS.

1.1. Historia

El Convenio de Basilea es el tratado internacional de partes y países sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación. El Convenio fue adoptado el 22 de marzo de 1989 y entró en vigor el 5 de mayo de 1992.

El objetivo principal del Convenio de Basilea¹ es proteger la salud humana y el ambiente de los efectos adversos que provocan los desechos peligrosos en la salud humana y de los ecosistemas y, toma en cuenta, la vulnerabilidad de los países en vías de desarrollo.

Su ámbito de aplicación comprende al comercio transfronterizo de los residuos denominados “peligrosos”, basándose en sus características, origen y composición. También incluye los residuos sólidos domiciliarios (RSD) y las cenizas resultantes de la incineración, los cuales están definidos dentro de una categoría de “otros residuos”.

Desde 2019, su ámbito de acción se expandió para incluir los desechos plásticos sucios, mezclados, halogenados o no destinados al reciclaje ambientalmente racional.

El tratado tiene, actualmente, 188* partes o países y Chile es signatario desde 19902.

Los principios fundamentales del tratado incluyen:

1. Reducir y minimizar los residuos de la fuente
2. Manejo de residuos dentro del país en el que se generan
3. Reducir al mínimo el movimiento transfronterizo de residuos
4. Una gestión ambientalmente racional para el manejo adecuado de residuos
5. Controlar estrictamente el comercio transfronterizo de residuos a través del mecanismo de notificación y consentimiento conocido como “Consentimiento previo informado o consentimiento fundamentado previo”.

Es un hecho que, a finales de 1980, numerosos casos internacionales relacionados con el tráfico de residuos peligrosos propiciaron la realización de este tratado, y pese a los acuerdos alcanzados posteriormente, las naciones en desarrollo de todo el mundo acusaron de “colonialismo tóxico” los acuerdos alcanzados. Aquí aparecen responsables del lobby -naciones ricas como Estados Unidos y Japón³-, que vetaron cualquier idea sobre prohibiciones de tipo comercial. El texto resultante de este tratado no prohibía la exportación de residuos tóxicos a ningún lugar del mundo, con excepción de la Antártida.

A causa de esto, las naciones en desarrollo, africanas especialmente, que han recibido la fracción más tóxica de la industria europea durante los últimos 40 años, se retiraron del tratado.

1.2. Comercio Internacional en Chile

Durante 2019, las exportaciones chilenas alcanzaron aproximadamente US\$69.682 millones FOB, mientras que las importaciones totalizaron US\$69.593 millones CIF. China se mantuvo como el principal socio comercial del país, concentrando cerca del 32 % de las exportaciones y el 24 % de las importaciones. Estados Unidos también representó uno de los principales socios comerciales de Chile durante ese período (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2026).

Dentro de las actividades exportadoras, el sector silvoagropecuario y pesquero tiene una participación relevante en el comercio exterior chileno, particularmente a través de la exportación de frutas. Esta actividad requiere diversos sistemas de envases y embalajes para proteger, almacenar y transportar los productos hacia los mercados internacionales. Entre ellos se encuentran los envases tipo *clamshell*, que pueden ser fabricados con PET y son utilizados especialmente para la conservación y transporte de frutas. En este contexto, la actividad agroexportadora contribuye a la demanda de materiales plásticos destinados a envases y embalajes. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2026). Buscar po o a través del [AIP Publishing Journal Portal](#).

1.3. Exportación de residuos plásticos desde Chile

Chile exporta residuos plásticos. Existe un movimiento comercial de residuos plásticos desde el país hacia el exterior. Esto es posible mediante la identificación de las partidas arancelarias de Aduana Chile, bajo códigos arancelarios de la partida del grupo 39. Empresas dedicadas a la gestión de residuos en Chile, declaran exportar desechos plásticos y/o materia prima plástica (se consultó a la empresa Enfaena, pero se negaron a presentar datos para este informe), lo que supone una situación irregular no verificada por las autoridades, al menos en el marco de la Enmienda al Convenio de Basilea. ¿Qué es el Grupo de los 39? Grupo de residuos plásticos definidos como Desechos, Desperdicios y Recortes; Semi factura; Manufacturas. Abarca los grupos arancelarios del 39.15 al 39.26. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2026).

1.4. Importación de Resinas plásticas

En cuanto a la importación de resinas plásticas -tanto virgen como reciclada- en la Tabla N°2 el movimiento durante el año 2017, fue de 744.221 toneladas equivalente a 1.068,6 MM USD en CIF. De ellas, sólo 7.636 toneladas, -equivalente al 1% del total del total de las importaciones- fueron de origen reciclado, el cual en su totalidad corresponde a PET semielaborado/reciclado. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2026).

En cuanto a los registros, desde el año 2009, ya es posible identificar flujos de importación de PET reciclado (rPET), el cual alcanzó un total de 5.000 toneladas. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2026).

1.5. Caracterización del consumo de resinas plásticas en Chile

A nivel nacional, los envases y embalajes representan uno de los principales usos de los materiales plásticos. Estos productos son utilizados transversalmente por distintos sectores económicos para el almacenamiento, protección, conservación y transporte de bienes. En la agroindustria, por ejemplo, se utilizan envases plásticos, como los del tipo clamshell, para proteger frutas y otros productos durante su almacenamiento, comercialización y transporte hacia los mercados de destino.

Durante 2018, el consumo de materias primas plásticas en Chile alcanzó 742.441 toneladas. De este total, el polietileno de alta y baja densidad representó aproximadamente un 47 %, el PET un 13 % y el PP un 12 %, por lo que estos tres grupos concentraron cerca del 72 % del consumo de materias primas plásticas. El PVC representó aproximadamente un 13 %, mientras que el resto correspondió a poliestireno y otras resinas. Por otra parte, aproximadamente un 48 % del consumo aparente de plásticos en Chile se destinó al sector de envases y embalajes. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2026).

1.6. Datos actualizados hasta el 2022. En Chile

De acuerdo a Estudio, Chile registró un alza del consumo aparente del 7%, impulsado principalmente por la reactivación de sectores como la minería y la agricultura.

ASIPLA lanzó su informe estadístico anual de la industria del plástico, correspondiente a 2024, y como es habitual, los datos de importaciones y exportaciones reflejaron el pulso de la economía nacional, al ser este un material que abastece transversalmente todos los sectores productivos.

En ese sentido, si en 2023 observamos una baja en la importación de materia prima plástica virgen producto de la evidente ralentización de rubros como la construcción, este año pudimos ver que la reactivación de la minería impulsó el consumo aparente de plásticos en Chile en 2024.

En concreto, de acuerdo al Estudio Estadístico de ASIPLA -elaborado por el Comité de Estudios del gremio-, en el país se consumieron 1.238.000 toneladas de plástico en 2024, lo que significó un alza del 7% con respecto al consumo de 2023, generada por una mayor importación de resinas de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Polietileno de Baja Densidad (PEBD) para su uso en la fabricación de aplicaciones específicas de larga vida útil en sectores como la minería y la agricultura, ambos intensivos en uso de plásticos.

Otro de los factores que incidió en el alza de las importaciones de resinas vírgenes fue la necesidad de disponer de mayores inventarios a nivel local, dada la extensión en los tiempos de tránsito de los fletes marítimos con materia prima a Chile.

Al igual que en años anteriores, la resina con mayor importación fue el PEAD, representando cerca del 25% de la cantidad total de resinas importadas en 2024, seguido por el PEBD Lineal con un 17% y el PET con una representación del 14%, en línea con lo que ocurre a nivel global.

En cuanto al consumo de materia prima plástica reciclada, este reporte evidencia también que la instalación de dos plantas Bottle to Bottle, producto de la implementación de la Ley de Plásticos de Un Solo Uso (Ley PUSU), generó un fuerte incremento en la demanda local de residuos de botellas plásticas, provocando un alza de 64% en la importación de PET reciclado (rPET) respecto del año 2023.

“Hoy vemos una situación de desequilibrio entre la disponibilidad de residuos de botellas PET y la demanda que hay por este material. La oferta de PET recuperado y reciclado a nivel local está siendo absorbida casi en su totalidad por las dos nuevas plantas Bottle to Bottle que, con la entrada en vigencia de la Ley PUSU, tienen la obligación de incorporar un 15% de material recuperado en el territorio nacional para la fabricación de nuevas botellas, porcentaje que, además, irá aumentando gradualmente en los próximos años.

Si a esto se suma que el PET también es y ha sido ampliamente utilizado por décadas en aplicaciones como fruta para consumo local y exportación- o zunchos plásticos para embalaje, la falta de material recuperado en Chile ha obligado a los productores de esas otras aplicaciones a importar PET reciclado para poder producir”, consignó Magdalena Balcells, gerenta general de ASIPLA.

Con respecto a la importación de productos plásticos manufacturados, China, Brasil y Perú continúan siendo los principales países de origen, siendo el gigante asiático quien lidera la representación al pasar de un 48% en 2023 a un 56% en 2024.

La suma de Brasil y Perú, en cambio, presentó una proporción menor variando de un 22% a 13% entre 2023 y 2024.

Adicionalmente, en 2024 se observó una baja en distintos tipos de bienes de capital importados, sin embargo, la máquina extrusora tuvo un crecimiento en su inversión de un 22% lo que podría estar relacionado con un mayor desarrollo de la industria de valorización de residuos plásticos y la reactivación de la minería, señalada anteriormente.

1.7. Situación de la industria

2024 fue un año difícil para la industria del plástico. A nivel de generación de empleos directos en el sector, se observó un decrecimiento del 12% entre 2022 y 2023, debido en parte al cierre o traslado a otros países de empresas manufactureras del rubro.

A ello se suman una menor inversión en maquinaria y la disminución en la producción y consecuente exportación de manufactura plástica, lo que evidencia el impacto que ha tenido para esta industria elementos como el aumento del precio de la energía y la cantidad de exigencias regulatorias en el ámbito laboral, que han significado

-para las empresas un importante aumento de costos y consecuente pérdida de competitividad frente a la misma industria en países vecinos como Perú, Brasil y Argentina.

“En el escenario económico actual del país, no es posible concluir que el aumento del consumo aparente de plástico en 2024 vaya a ser una tendencia para los próximos años, más bien pareciera ser un elemento circunstancial”, concluyó Magdalena Balcells. Asociación Gremial de Industriales del Plástico. (2025, 25 de junio). *ASIPLA lanzó las Estadísticas de la Industria del Plástico 2024*. ASIPLA — Estadísticas de la Industria del Plástico 2024

Tabla 1. Tipos de Reciclado de Plásticos Postconsumo.

Proceso	Concepto	Observaciones
Primario	Procesado de residuos plásticos, obteniendo productos con propiedades similares a las “originales”	Se facilita mediante agentes de refuerzo.
Secundario	Procesado de residuos plásticos, obteniendo productos que requieren menor demanda en propiedades que las “originales”	La degradación del material es notoria por su uso y/o reprocesamiento.
Terciario.	Recuperación de sustancias químicas a partir de desechos plásticos.	Por ejemplo, al obtener algunos monómeros u otras sustancias por pirólisis.
Cuaternario	Recuperación de energía a partir de desechos plásticos.	Al reducirse volumen se aprovecha su poder calorífico como combustible

Nota. Desde *Desarrollo Del Reciclado De Plásticos En El Siglo XX Y Perspectivas En El Siglo XXI*, por Jasso, C. y Ortega, P., 2023, <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2023/06/2023-24-1-30-48-3.pdf>

1.8. Definición del petróleo

El petróleo es una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. El petróleo ha recibido varios nombres a lo largo de la historia, así del griego πετρέλαιον, "aceite de roca". Piedra (petra) y aceite (oleum) son los dos términos latinos que se encuentra en la etimología de la palabra petróleo.

En Oriente Medio, en las proximidades del Golfo Pérsico se le atribuyen otros nombres como “asfalto”, como prueba el nombre de “Lago Asfaltites”, con el que los romanos conocían el mar Muerto. Otros nombres son los de “betún”, “pez” o, simplemente, “brea”. También es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo.

1.9. Composición del petróleo

El aceite petrolífero está constituido por hidrocarburos, desde el metano C1, según la forma de expresión petrolera, hasta especies complejas, tipo C40 y aún más altas, que no pueden destilarse sin descomposición.

Una composición media elemental puede ser: 85% de carbono, 12% de hidrógeno, 3% de azufre, oxígeno y varios elementos metálicos. A veces el yacimiento sólo contiene gas natural, es decir hidrocarburos gaseosos (C1-C4) con pequeñas cantidades de otros líquidos (C5-C8).

A la parte de hidrocarburo le acompañan, en ocasiones importantes cantidades de otros gases (18% SH₂, en Lacq, Francia; 90% de CO₂, en California; 80% N, en Kansas, Estados Unidos; 7% Hidrocarburos en Colorado, Estados Unidos).

Otros yacimientos, generalmente menos profundos, solo contienen hidrocarburos de gran número de átomos de carbono, ya que al aflorar el crudo de forma natural a la superficie se evaporan sus fracciones más ligeras. Es el caso del famoso lago asfáltico en la Isla Trinidad, en las Antillas. Lo más corriente es que los depósitos sean mezclas de líquidos, sólidos y gases.

La identificación de especies es posible en las fracciones más ligeras. A partir del término 8-10 ya es más difícil por la presencia de muchos isómeros y estructuras complejas, puede decirse que se han utilizado todas las técnicas físicas y químicas conocidas para identificar y separar las especies contenidas en el petróleo, pero, aun así, algunas estructuras no han sido capaces de ser identificadas.

El petróleo está formado principalmente por hidrocarburos, que son compuestos de hidrógeno y carbono, en su mayoría parafinas, náftenos y aromáticos. Junto con cantidades variables de derivados saturados homólogos del metano (CH₄). Su fórmula general es C_nH_{2n+2}.

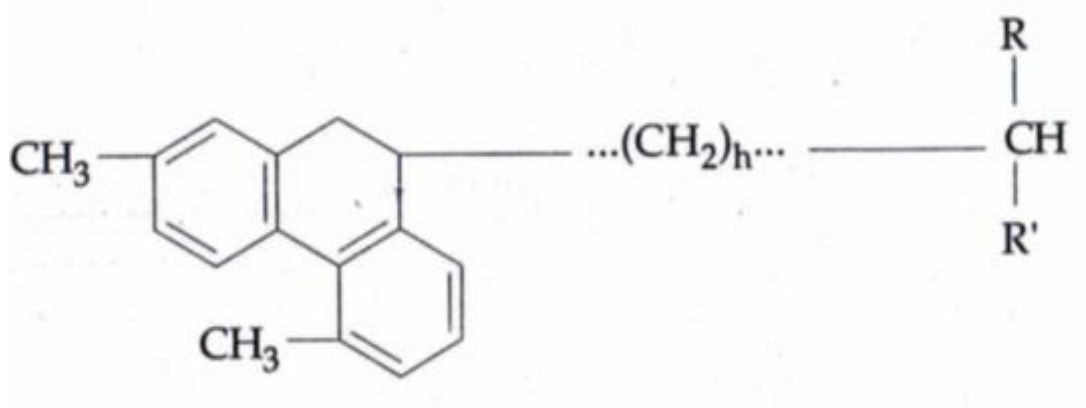
- Cicloalcanos o cicloparafinas-naftenos: hidrocarburos cíclicos saturados, derivados del ciclopropano (C₃H₆) y del ciclohexano (C₆H₁₂). Muchos de estos hidrocarburos contienen grupos metilo en contacto con cadenas parafínicas ramificadas. Su fórmula general es C_nH_{2n}.
- Hidrocarburos aromáticos: hidrocarburos cíclicos insaturados constituidos por el benceno (C₆H₆) y sus homólogos. Su fórmula general es C_nH_n.
- Alquenos u olefinas: moléculas lineales o ramificadas que contienen un enlace doble de carbono (-C=C-). Su fórmula general es C_nH_{2n}. Tienen terminación -"eno".
- Dienos: Son moléculas lineales o ramificadas que contienen dos enlaces dobles de carbono. Su fórmula general es C_nH_{2n-2}.
- Alquinos: moléculas lineales o ramificadas que contienen un enlace triple de carbono. Su fórmula general es: C_nH_{2n-2}. Tienen terminación "ino".

Además de hidrocarburos, el petróleo contiene otros compuestos orgánicos, entre los que destacan sulfuros orgánicos, compuestos de nitrógeno y de oxígeno. También hay trazas de compuestos metálicos, tales como sodio (Na), hierro (Fe), níquel (Ni), vanadio (V) o plomo (Pb).

Entre los componentes hidrocarburos están representados funcionalmente las siguientes series: parafínicas lineal (parafinas), ramificada (isoparafinas), ciclada (naftenos), aromática (benceno, naftaleno, etc.) y mixta, en la que se incluyen las especies complejas.

Salvo los primeros términos (metano a etano, ciclohexano, benceno) es difícil clasificar químicamente una fracción petrolífera, pues su composición responde principalmente a especies mixtas. Por ejemplo, el etiltetrahidronaftaleno, tiene un 50% de carbonos aromáticos, un 33.3% de nafténicos y un 16.7% de parafínicos. Por tanto, no hay que incluirlo en una u otra serie. A efectos puramente conceptuales, se ha propuesto la estructura reflejada en la figura 1.1. como representativa de la molécula petrolífera media:

Figura 11. Estructura de la molécula petrolífera.



Nota. Fotografía de la estructura de la molécula petrolífera. Tomado de *El Petróleo, Historia y refino* [Fotografía], por Patricia Casas Blanco, 2010, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza (<https://zaguan.unizar.es/record/5134/files/TAZ-PFC-2010-205.pdf>)

La complejidad y enorme número de especies presentes en el petróleo obliga a considerarlo como un conjunto de fracciones, más que de especies, entendiendo por tales las partes en que prácticamente puede dividirse el petróleo en razón de la distinta volatilidad de los diferentes hidrocarburos que lo componen.

Los compuestos oxigenados del petróleo están representados principalmente por fenoles y ácidos alifáticos y, en particular, por funciones ácidas como los ácidos nafténicos (ácidos de alcoholcicloparafinas), no se dan en proporciones superiores al 0.06% del petróleo bruto. Los compuestos nitrogenados existen como máximo en

proporción de un 0.5%. Se trata de bases orgánicas, como la piridina y sus análogos derivados.

Los compuestos de azufre son de gran significación, no sólo por su cantidad (de 0,5 a 5%) sino por la corrosividad, olor y otras propiedades indeseables que comunican las fracciones petrolíferas, que obligan a una 9 depuración (refino).

Contienen azufre los gases (sulfhídrico), los líquidos (tiofeno, mercaptanos, disulfuros, sulfuros orgánicos) y hasta las fracciones sólidas como los asfaltos y compuestos resinosos de alto peso molecular disueltos en el aceite.

Los compuestos conocidos como asfaltos son en realidad, estructuras complejas de C, H, O y S.

También son complejas las estructuras de los carboides, carbenos, asfaltenos y resinas, que actúan como coloides protectores de otros componentes macromoleculares. La instauración de las cadenas hidrocarbурadas no se da en los componentes más ligeros. Igualmente, el contenido en azufre, nitrógeno y oxígeno aumenta al aumentar el punto de ebullición de la fracción petrolífera considerada. Las proporciones relativas tanto al contenido de impurezas (no hidrocarburos, como de los tipos de hidrocarburos presentes, varían de uno a otro yacimiento.

1.10. Características físicas y químicas del petróleo.

1.10.1. Color

Generalmente se piensa que todos los crudos son de color negro, lo cual ha dado origen a cierta sinonimia y calificativos: "oro negro", "más negro que el petróleo crudo". Sin embargo, por transmisión de la luz, los crudos pueden tener color amarillo pálido, tonos de rojo y marrón hasta llegar a negro.

Por reflexión de la luz pueden aparecer verdes, amarillos con tonos azules, rojo, marrón y negro. Los crudos pesados y extrapesados son negro casi en su totalidad. Crudos con altísimo contenido de cera son livianos y de color amarillo; por la noche al bajar bastante la temperatura tienden a solidificarse notablemente y durante el día, cuando aparecía el sol, muestra cierto hervor en el tanque. El crudo más liviano o condensado llega a tener un color blanquecino, lechoso y a veces se usa en el campo como gasolina cruda.

1.10.2. Olor

El olor de los crudos es aromático como el de la gasolina, del queroseno otros derivados. Si el crudo contiene azufre tiene un olor fuerte y hasta repugnante. Si contiene sulfuro de hidrogeno, los vapores son irritantes, tóxicos y hasta mortíferos. Para atestiguar la buena o rancia calidad de los crudos es común que la industria los designe como:

- Petróleo Dulce (Sweet Crude Oil), es aquel que contiene menos de 0,5% de contenido sulfuroso, es decir, con presencia de azufre. Es un petróleo de alta calidad y es ampliamente usado para ser procesado como gasolina.
- Petróleo Agrio (Sour Crude Oil), es aquel que contiene al menos 1% de contenido sulfuroso en su composición.

Debido a la mayor presencia de azufre su costo de refinamiento es mayor, razón por la cual es usado mayormente en productos destilados como el diesel, dado su menor costo de tratamiento.

1.10.3. Densidad

La densidad de una sustancia, simbolizada habitualmente por la letra griega, es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. Los crudos pueden pesar menos que el agua (livianos y medianos) o tanto o más que el agua (pesados y extrapesados).

De allí que la densidad ρ pueda tener un valor de 0,75 g/mL a 1,1 g/mL. Estos dos rangos equivalen a 57,2 y -3 ° API. La gravedad API es también usada para comparar densidades de fracciones extraídas del petróleo. Por ejemplo, si una fracción de petróleo flota en otra, significa que es más liviana, y por lo tanto su gravedad API es mayor. Matemáticamente la gravedad API no tiene unidades.

Sin embargo, siempre al número se le coloca la denominación grado API. La gravedad API es medida con un instrumento denominado hidrómetro.

1.10.4. Fórmula de gravedad API

La fórmula usada para obtener la gravedad API es la siguiente:

Gravedad API = $(141,5/\rho_r \text{ a } 60^\circ \text{F}) - 131,5$ Donde ρ_r es la gravedad específica que es un sinónimo de densidad relativa que se utiliza en los países con fuerte influencia anglosajona. La densidad específica es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de otra que se toma como referencia. La densidad relativa es adimensional (sin unidades), ya que queda definida como el cociente de dos densidades, por tanto, para calcularla:

$$\rho_r = \rho_o / \rho$$

donde ρ_r es la densidad relativa, ρ es la densidad absoluta y ρ_o es la densidad de sustancia. Para los líquidos y los sólidos, la densidad de referencia habitual es la del agua líquida a la presión de 1 atm y la temperatura de 4 °C. En esas condiciones, la densidad absoluta del agua es de 1000 kg/m³, es decir, 1 kg/L y para los gases, la densidad de referencia habitual es la del aire a la presión de 1 atm y la temperatura de 0 °C

60°F es usado como el valor estándar para la medición y reportes de mediciones. Por lo tanto, un crudo pesado con una gravedad específica de 1 (esta es la densidad del agua pura a 60 °F) tendrá la siguiente gravedad API:

$$\left(\frac{141,5}{1,0}\right) - 131,5 = 10,0 \text{ grados API}$$

1.10.5. Índice de refracción

Se define como la relación de la velocidad de la luz al pasar de uno a otro cuerpo. Medido con un refractómetro, los hidrocarburos acusan valores de 1,39 a 1,49. Se trata de un valor adimensional.

1.10.6. Coeficiente de expansión

Cociente que mide el cambio relativo de volumen que se produce cuando un fluido experimenta un cambio de temperatura. Varía entre

$$0,00036 \text{ y } 0,00096^{\circ}\text{C} - 1.$$

1.10.7. Punto de congelación

El punto de congelación de un líquido es la temperatura a la que dicho líquido se solidifica debido a una reducción de temperatura, a presión atmosférica. Varía desde 15,5 °C hasta la temperatura de -45 °C.

Depende de las propiedades y características de cada crudo o derivado. Este factor es de importancia al considerar el transporte de los hidrocarburos y las estaciones, principalmente el invierno y las tierras gélidas.

1.10.8. Punto de deflagración

Es la temperatura a la que se produce una reacción vigorosa que produce calor acompañado de llamas y/o chispas. Varía desde -12 °C hasta 110 °C.

1.10.9. Poder calorífico

Puede ser entre 8.500 a 11.350 calorías/gramo. Entre BTU/libra puede ser de 15.350 a 22.000. (BTU es la unidad térmica británica).

1.10.10. Calor específico

La cantidad de calor requerida para que la unidad de masa de gas aumente su temperatura un grado.

Varía entre 1674,77 y 2176,72 J/Kg k. El promedio de la mayoría de los crudos es de 1884,06 J/kg K.

1.10.11. Calor latente de vaporización

Calor latente de fusión o calor de cambio de estado, es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado de líquido a gaseoso. Para la mayoría de los hidrocarburos parafínicos y metílenos oscila entre **70 a 90** kilocalorías/kilogramo ó **130 a 160 BTU/libra**.

1.10.12. Caracterización del petróleo

Para la caracterización del petróleo, y sus fracciones se utilizan también correlaciones como el factor de caracterización (FK) de Watson y Nelson y en el índice de correlación (IC): El FK y el IC es un valor que permite identificar o caracterizar el tipo de crudo en cuanto a su composición química, (base parafínica, mixta, nafténica, aromática).

Los valores que deben tener estos factores para ser clasificados se explican en el apartado 1.5.4.

$$FK = \frac{1,215t^{\frac{1}{3}}}{D}$$

$$IC = 48640 + 473,7 - 456,8T$$

En las que T= temperatura media de ebullición, en grados Kelvin, o sea aquella a la que pasa por destilación la mitad del producto, **y d=peso específico a 15°C en kg/ L**

La viscosidad es una de las características más importantes de los hidrocarburos en los aspectos operacionales de producción, transporte, refinación y petroquímica. La viscosidad, que indica la resistencia que opone el crudo al flujo interno, se obtiene por varios métodos y se le designa por varios valores de medición. El poise o centipoise (0,01 poise) se define como la fuerza requerida en dinas para mover un plano de un centímetro cuadrado de área, sobre otro de igual área y separado un centímetro de distancia entre sí y con el espacio relleno del líquido investigado, para obtener un desplazamiento de un centímetro en un segundo. La viscosidad de los crudos en el yacimiento puede tener 0,2 hasta más de 1,0 centipoise. Es muy importante el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los crudos, en el yacimiento o en la superficie, especialmente concerniente a crudos pesados y extrapesados.

- **Viscosidad relativa:** es la relación de la viscosidad del fluido respecto a la del agua. A 20 °C la viscosidad del agua pura es de 1,002 centipoises.
- **Viscosidad cinemática:** es equivalente a la viscosidad expresada en centipoises dividida por la gravedad específica, a la misma temperatura. Se designa en stokes o centistokes.

1.10.14. Clasificación

La industria petrolera clasifica el petróleo crudo según su lugar de origen (por ejemplo "West Texas Intermediate" o "Brent") y también relacionándolo con su peso API (American Petroleum Institute) (ligero, medio, pesado, extrapesado); los refinadores también lo clasifican como "dulce", que significa que contiene relativamente poco azufre, o "ácido", que contiene mayores cantidades de azufre y, por lo tanto, se necesitarán más

operaciones de refinamiento para cumplir las especificaciones actuales de los productos refinados.

1.10.15. Crudos de referencia

Un crudo de referencia es aquel que se emplea para determinar el precio del mercado de la producción de una zona que se encuentra próximo geográficamente.

Brent Blend, compuesto de quince crudos procedentes de campos de extracción en los sistemas Brent y Ninian de los campos del Mar del Norte, este crudo se almacena y carga en la terminal de las Islas Shetland.

La producción de crudo de Europa, África y Oriente Medio sigue la tendencia marcada por los precios de este crudo. West Texas Intermediate (WTI) para el crudo estadounidense.

- Dubai se usa como referencia para la producción del crudo de la región Asia-Pacífico.
- Tapis (de Malasia), usado como referencia para el crudo ligero del Lejano Oriente.
- Minas (de Indonesia), usado como referencia para el crudo pesado del Lejano Oriente.
- Arabia Ligero de Arabia Saudita
- Bonny Ligero de Nigeria
- Fateh de Dubai
- Istmo de México (no-OPEP)
- Minas de Indonesia
- Saharan Blend de Argelia
- Tía Juana Ligero de Venezuela.

1.10.16. Clasificación del petróleo según su gravedad API

Relacionándolo con su gravedad API el American Petroleum Institute clasifica el petróleo en "liviano", "mediano", "pesado" y "extrapesado".

- Crudo liviano o ligero: tiene gravedades API mayores a 31,1 °API
- Crudo medio o mediano: tiene gravedades API entre 22,3 y 31,1 °API.
- Crudo pesado: tiene gravedades API entre 10 y 22,3 °API.
- Crudo extrapesado: gravedades API menores a 10 °API.

1.10.17. Según el hidrocarburo predominante

Atendiendo al tipo de hidrocarburo predominante, se distinguen tres tipos de petróleo:

- De base parafínica: con un mínimo de 75% de cadenas parafínicas.
- De base nafténica: con un mínimo de 75% de naftenos.
- De base aromática: con un mínimo de 50% de aromáticos
- Cinco tipos de base mixta: aromático-asfálticos, parafinanafténica...

El conocimiento de la base constitutiva del petróleo es importante para el refinador, como se verá luego, el tratamiento que conviene aplicar a un petróleo depende de su constitución.

Salvo para la fracción de gas, que es fundamentalmente parafínica en todos los casos, la estructura de los componentes de cada fracción de un determinado petróleo no varía mucho cualquiera que sea la volatilidad que se analice.

Los análisis de las fracciones se hacen en las refinerías con los analizadores de flujo continuo, que permiten la separación cromatográfica de los distintos hidrocarburos y el análisis de los productos de forma continuada.

Los detectores utilizados pueden llevar acoplados espectrofotómetros de absorción o espectrofotómetros de masas para una mejor identificación de las fracciones salientes.

1.10.18. Según la caracterización del petróleo

Los productos con FK alto (superiores a 12) son parafínicos. Los aromáticos dan el mínimo (de 9 a 11). En cuanto al IC<15, parafínico; 15-50, nafténico; >50, aromático.

18

1.10.19. Derivados

Un derivado del petróleo es un producto procesado en refinerías usando como materia prima el petróleo. Según la composición del crudo y la demanda, las refinerías pueden producir distintos productos derivados del petróleo.

1.10.20. Combustibles

Son cualquier material capaz de liberar energía cuando se quema, y luego cambiar o transformar su estructura química. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable, por ser una reacción como energía química.

a) Gasolina.

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos derivada del petróleo que se utiliza como combustible en motores de combustión interna con encendido a chispa.

b) Queroseno.

El queroseno, es un líquido transparente (o con ligera coloración amarillenta) obtenido por destilación del petróleo.

Se utiliza como combustible en los motores a reacción y de turbina de gas o bien se añade al gasóleo de automoción en las refinerías. Se utiliza también como disolvente y para calefacción doméstica.

c) Diésel.

El gasóleo, también denominado gasoil o diésel, es un líquido de color blancuzco o verdoso, compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en motores diésel y en calefacción.

d) Gas Natural.

El gas natural es una fuente de energía no renovable formada por una mezcla de gases que se encuentra frecuentemente en yacimientos de petróleo. El gas natural tiene diversas aplicaciones en la industria, el comercio, la generación eléctrica, el sector residencial y el transporte de pasajeros.

e) Gas licuado del petróleo.

El gas licuado del petróleo (GLP) es la mezcla de gases condensables presentes en el gas natural o disueltos en el petróleo. Los componentes del GLP, aunque a temperatura y presión ambientales son gases, son fáciles de condensar. Se usa principalmente para la obtención de olefinas y como combustible.

f) Productos industriales.

Un producto industrial es cualquier producto que es el resultado de una serie de transformaciones o procesos de una materia prima.

g) Gasolina Blanca.

Es una mezcla de hidrocarburos que se utiliza como combustible en motores de combustión interna con encendido a chispa.

h) Aguarrás Mineral.

Es el producto constituido por derivados del petróleo, utilizado como sucedáneo de la esencia de trementina, en la preparación de pinturas, barnices y afines.

i) Xileno Industrial.

El Xileno, Xilol o dimetilbenceno, $C_6H_4(CH_3)_2$ es aquel el cual se obtiene a partir del Benceno. Se trata de líquidos incoloros e inflamables con un característico olor parecido al tolueno. Los xilenos son buenos disolventes e importantes productos de partida en la obtención de los ácidos ftálicos que se sintetizan por oxidación catalítica.

j) Fuel oil.

El fuel oil es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada. El fuel oil se usa como combustible para plantas de energía eléctrica, calderas y hornos.

k) Asfalto.

El asfalto es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas.

l) Nafta.

La nafta (del árabe, nafta), también conocido como éter de petróleo, es un derivado del petróleo extraído por destilación directa, utilizado principalmente como materia prima de la industria petroquímica ("nafta petroquímica" o "nafta no energética"), en la producción

-de alquenos, como etileno y propileno, así como de otras fracciones líquidas como benceno, tolueno y xilenos. En la industria química se usa como disolvente.

m) Productos petroquímicos.

Son los productos químicos obtenidos a partir de materias primas como el petróleo o gas natural, es decir, en la industria petroquímica.

n) Etileno.

El etileno o eteno es un compuesto químico orgánico formado por dos átomos de carbono enlazados mediante un doble enlace. La mayor parte del etileno se utiliza para la formación de polímeros. Se usa para la fabricación de alcohol etílico, polietileno (PE), PVC y ácido acético.

o) Metanol.

El compuesto químico metanol, también conocido como alcohol metílico o alcohol de madera, es el alcohol más sencillo. Se emplea como anticongelante, disolvente, y combustible. Su fórmula química es CH_3OH .

p) Tolueno.

El tolueno o metilbenceno, ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) es la materia prima a partir de la cual se obtienen derivados del benceno, el ácido benzoico, el fenol, la caprolactama, la sacarina, el TDI (diisocianato de tolueno) materia prima para la elaboración de poliuretano, medicamentos, colorantes, perfumes, explosivos TNT y detergentes.

2. El origen del plástico: la historia de un material que conquistó el mundo.

2.1. Origen y características generales del plástico.

Los plásticos corresponden a una amplia variedad de materiales constituidos principalmente por polímeros, es decir, macromoléculas formadas por la unión repetida de unidades más pequeñas denominadas monómeros. La palabra *plástico* deriva del término griego *plastikos*, que significa “capaz de ser moldeado”, característica que representa una de las principales propiedades que ha favorecido su utilización en numerosos productos. Crawford, R. J. (1999). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Los primeros materiales plásticos fueron desarrollados a partir de polímeros naturales modificados. Un ejemplo fue el celuloide, producido durante el siglo XIX a partir de derivados de la celulosa. Posteriormente, en 1907, Leo Hendrik Baekeland desarrolló la baquelita, considerada el primer plástico completamente sintético. Este avance marcó el comienzo del desarrollo de numerosos polímeros sintéticos y contribuyó

al crecimiento de la industria moderna del plástico. Ma, C., Yu, J., Wang, B., Song, Z., Xiang, J., Hu, S., Su, S., & Sun, L. (2017). Catalytic pyrolysis of flame-retarded high-impact polystyrene over various solid acid catalysts. *Fuel Processing Technology*, 155, 32–41.

La producción y utilización de plásticos aumentó considerablemente a partir de mediados del siglo XX. Sus propiedades, como su versatilidad, resistencia, bajo peso y facilidad de fabricación, permitieron incorporarlos en una gran diversidad de aplicaciones, incluyendo envases y embalajes, construcción, transporte, equipos eléctricos y electrónicos, vestuario y dispositivos médicos. Actualmente, los plásticos constituyen uno de los grupos de materiales manufacturados de mayor utilización a nivel mundial. Crawford, R. J. (1999). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. La mayor parte de los plásticos convencionales se produce a partir de materias primas de origen fósil, principalmente petróleo y gas natural. Sin embargo, también existen plásticos de origen biológico o biobasados, que pueden producirse total o parcialmente a partir de biomasa, como caña de azúcar, cultivos vegetales o determinados residuos orgánicos. Es importante distinguir que un plástico biobasado no necesariamente es biodegradable, ya que el origen de la materia prima y la capacidad del material para biodegradarse corresponden a características diferentes. Crawford, R. J. (1999). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

El presente proyecto se enfocará principalmente en plásticos convencionales de origen fósil que presentan una elevada persistencia ambiental. Entre ellos se encuentran materiales ampliamente utilizados como el polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS).

Estos materiales pueden permanecer durante largos periodos en el ambiente y fragmentarse progresivamente en partículas de menor tamaño, por lo que su adecuada recolección, clasificación, reciclaje y valorización constituye un desafío relevante. Crawford, R. J. (1999). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

En el contexto de este proyecto, será necesario conocer el origen, composición y características de los distintos tipos de plástico antes de seleccionar aquellos que serán utilizados experimentalmente. Posteriormente, los residuos deberán ser separados y acondicionados de acuerdo con sus características, ya que el tipo de polímero puede influir significativamente en el proceso de transformación y en los productos obtenidos. Kaufmann, C. B. (2011). Leo H. Baekeland. En *100+ years of plastics: Leo Baekeland and beyond*. ACS Symposium Series. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1080.ch001>

2.2. ¿Cuándo se inventó el plástico?

Desde la antigüedad se han trabajado plásticos naturales como el carey, el ámbar, el caucho y la goma laca, explica el Museo de Ciencias de Londres (Inglaterra).

Sin embargo, el plástico sintético es mucho más joven y uno de sus antecedentes fue la parkesina, patentada en 1862 por el artesano y químico inglés Alexander Parkes.

Considerado el primer plástico manufacturado, era un sustituto barato del marfil o el carey. Este invento fue adoptado y desarrollado por otros, y así se creó el celuloide (cuya aplicación más popular fue en las películas de cine).

No obstante, la aparición de plástico totalmente sintético ocurrió después. En 1907 Leo Baekeland, un comerciante y químico belga, patentó la baquelita.

Este material, que combinaba formaldehído y fenol (ambas sustancias químicas) bajo calor y presión, tenía un aspecto marrón oscuro, se podía producir en masa y desencadenó un boom de consumo de productos antes reservados a unas pocas personas, señala el Museo de Ciencias londinense. Crawford, R. J. (1999). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

2.3. Descubrimiento y uso del polietileno

En las primeras décadas del siglo XX, diversas industrias petroleras y químicas empezaron a investigar cómo aprovechar los desechos del procesamiento del petróleo crudo y del gas natural. Entre ellos, continúa el organismo, estaba el gas etileno, un subproducto con el que una conocida empresa británica logró fabricar un plástico en la década de 1930. American Chemical Society. (s. f.). *Bakelite®: The world's first synthetic plastic*. National Historic Chemical Landmarks.

El gran avance ocurrió en 1933, cuando un equipo de esa empresa intentó combinar etileno y benzaldehído bajo alta presión y calor y, luego de una fuga de oxígeno en el recipiente, encontraron una sustancia cerosa blanca en un tubo de reacción: el polietileno, el plástico más abundante en el mundo en la actualidad.

Descubrieron que se trataba de un material fuerte, flexible y resistente al calor y rápidamente le dieron uso. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

La primera aplicación del polietileno ocurrió durante la Segunda Guerra Mundial como aislante para cables de radar, explica la Enciclopedia Britannica (una plataforma de conocimiento). Pero rápidamente se trasladó a productos de consumo, como las bolsas de plástico para compras. En tanto, una empresa estadounidense tuvo una serie de éxitos en el sector de los plásticos en la década de 1930, en particular el nailon y el teflón, agrega el organismo.

De los 7000 millones de toneladas de desechos plásticos generados a nivel mundial hasta el momento, menos del 10% se ha reciclado, según datos del PNUMA. Crawford, R. J. (1999). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

2.4. El desarrollo de otros tipos de plásticos

Otros tipos de plástico se desarrollaron en la época. Como el PVC (policloruro de vinilo), segundo entre los plásticos en producción y consumo después del polietileno,

según Britannica, que se utiliza actualmente en productos domésticos e industriales (desde cortinas de ducha hasta fontanería interior).

“El PVC fue elaborado por el químico francés Henri Victor Regnault en 1835 y después por el químico alemán Eugen Baumann en 1872, pero no se patentó hasta 1912, cuando otro químico alemán, Friedrich Heinrich August Klatte, utilizó la luz solar para iniciar la polimerización del cloruro de vinilo”, explica la Enciclopedia.

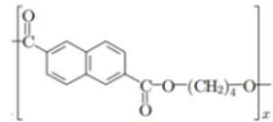
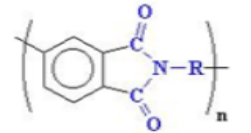
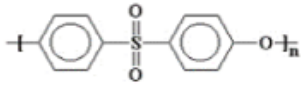
Debido a su extrema rigidez, su aplicación comercial se vio limitada en un principio, pero en 1926, Waldo Lunsbury Semon, un inventor norteamericano que trabajaba para una importante empresa en Estados Unidos produjo lo que hoy se denomina PVC plastificado. “El descubrimiento de este producto flexible e inerte fue el responsable del éxito comercial del polímero”.

Entre otros plásticos sintéticos que se desarrollaron en el siglo XX destacan el poliestireno, que se utiliza comúnmente en bandejas de comida; el polipropileno que se usa en mascarillas faciales desechables y tapas de botellas; y el tereftalato de polietileno (PET), utilizado en botellas de bebidas desde la década de 1970. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

2.5. Polímero Abreviatura Estructura

TERMOESTABLES

Tabla 2. Estructura de algunos plásticos de altas prestaciones.

Polímero Abreviatura Estructura	Polímero Abreviatura Estructura	Figura de la molecula
Poliésteres aromáticos	APE	
Poliimidas	PI	 Poliimida heterociclica aromática
Polisulfonas	PSU	 Poliéter sulfona 200 P

Nota. Desde *Pirólisis catalítica de residuos plásticos: Una reseña*, por R.; Barakat, M.A.; Aburiazaiza, A.S.; Rehan, M.; Nizami, A.S., 2016, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582016301082>)

2.6 Termoestables

Como ya se comentó, los termoestables son materiales que adquieren un estado final reticulado (entrecruzado), que los hace insolubles e incapaces de fundir. A estos materiales se llega partiendo de materias primas de bajo peso molecular de las que se obtiene, en una primera fase, un producto intermedio (prepolímero o termoendurecible), muy poco o nada reticulado, todavía capaz de fundir y fluir, y por tanto de rellenar un molde.

La reticulación espacial que da lugar a la formación de la macromolécula termoestable tiene lugar por reacción química (curado) durante el moldeo de la pieza.

Puesto que no funden y no reblandecen son materiales que presentan muy buenas propiedades a elevadas temperaturas. Junto con su alta resistencia térmica presentan alta resistencia química, rigidez, dureza superficial, buena estabilidad dimensional, entre otras ventajas sobre otros materiales. Sin embargo, el empleo de estos materiales ha ido disminuyendo en los últimos años.

Existen numerosas razones por las que esto ha ocurrido. Los termoestables requieren métodos de transformación lentos, puesto que la reacción de polimerización tiene lugar dentro del molde. Los acabados son pobres comparados con los de la mayoría de los termoplásticos; por lo general, las resinas termoestables son bastantes opacas y en muchos casos presentan cierta coloración amarillenta.

Los ejemplos más corrientes de estos materiales son los poliuretanos reticulados (PUR), las resinas de fenol-formaldehído (fenoplastos) que se mostraron en la tabla 1.2, junto con las resinas de amina formaldehído (aminoplastos).

2.7. Elastómeros

Los elastómeros o cauchos son generalmente polibutadienos (tabla 1.1) o compuestos que contienen dobles enlaces en la cadena principal, de modo que las cadenas de polímero se encuentran enrolladas sobre sí mismas, lo que les confiere gran flexibilidad. Estos materiales son capaces de soportar deformaciones muy grandes recuperando su forma inicial una vez que se elimina el esfuerzo.

En los elastómeros suele producirse un entrecruzamiento parcial de las cadenas para evitar que cada vez que estos materiales se ven sometidos a un esfuerzo las moléculas se deslicen unas sobre otras, lo que provocaría deformaciones irreversibles. El entrecruzamiento o curado a que se somete a estos materiales es similar al de los termoestables, pero en este caso el grado de entrecruzamiento es mucho más bajo, puesto que debe ser suficientemente espaciado, de modo que no impida el desenrollamiento de las cadenas, que es en definitiva lo que confiere al material la capacidad de recuperar su forma inicial cuando cesa el esfuerzo al que es sometido.

Los elastómeros son materiales muy tenaces, resistentes a aceites y grasas y al ozono, y presentan buena flexibilidad a bajas temperaturas. De hecho, todos los elastómeros tienen temperaturas de transición vítrea inferiores a la temperatura ambiente.

Presentan, sin embargo, algunas de las desventajas de los termoestables: requieren un procesamiento lento, lo que consume grandes cantidades de tiempo y energía, y en principio no son reciclables.

En los últimos años se ha desarrollado un grupo de elastómeros conocidos como elastómeros termoplásticos (TR). Estos elastómeros pueden estar reticulados de forma química o física. En los reticulados químicamente la reticulación es reversible a altas temperaturas, convirtiéndose en termoplásticos amorfos semicristalinos.

Tienen, por tanto, el comportamiento de uso de los elastómeros y el comportamiento de fusión de los termoplásticos. Los elastómeros reticulados físicamente consisten, por lo general, en una mezcla de una matriz termoplástica, generalmente PP, mezclada con un caucho, por lo general EPDM (caucho de etileno-propileno- monómero de dieno).

La matriz termoplástica permite que el material funda y sea moldeado, mientras que las partículas de caucho contribuyen dando tenacidad y elasticidad al material. En general, la capacidad de deformación de los elastómeros termoplásticos es menor que la de los demás elastómeros (elastómeros permanentes).

2.8. Composites

Los composites o plásticos compuestos, son materiales con muy buenas propiedades mecánicas; elevada dureza y resistencia a la tracción. Están formados por dos componentes inmiscibles que forman dos fases separadas, lo que les confiere propiedades muy interesantes.

Constan de una matriz, que se trata generalmente de un polímero termoplástico, aunque ocasionalmente puede ser termoestables, y de una carga, que se suele tratar de una fibra con muy buena resistencia a la tracción, por lo general fibra de vidrio o de carbón. Las propiedades de los materiales compuestos no sólo dependerán de las características de cada componente, sino también de la naturaleza de la interfase. En estos materiales la carga o refuerzo mejora las propiedades de la matriz polimérica, de modo que combinan las ventajas de los termoplásticos o termoestables, según se trate, con las del refuerzo. En contraposición, estos materiales resultan caros y su procesamiento es más complejo que el de otros materiales.

2.9. Plásticos espumados

Son, por lo general, termoplásticos con una estructura celular, que contienen grandes proporciones de celdillas finas llenas de gas. Estas celdillas pueden ser cerradas o abiertas. La forma de conseguir estas estructuras celulares inmersas en la matriz polimérica se explica en el siguiente apartado (agentes espumantes).

Las propiedades físicas de los materiales resultantes serán intermedias entre las del sólido y las del gas. En los plásticos espumados se consiguen importantes reducciones de la densidad, conductividad térmica, propiedades dieléctricas y disipación de energía acústica y mecánica. En la mayoría de las propiedades de los plásticos espumados se cumple la ley de mezclas.

La *densidad* del material celular disminuye proporcionalmente a la fracción volumétrica de la fase gaseosa.

La conductividad térmica de los gases es muy inferior a la de los sólidos, de modo que la transferencia de calor por conducción disminuye linealmente al disminuir la densidad de la espuma. Igualmente, la conductividad eléctrica, la constante dieléctrica y las pérdidas dieléctricas disminuirán proporcionalmente a la disminución de la densidad. En cuanto a las propiedades mecánicas la rigidez de un producto celular es relativamente alta si se utiliza como base el peso de muestra (en lugar del espesor o la sección del material) y lo mismo ocurre con la energía de impacto. Por otra parte, los materiales celulares pueden usarse tanto como aislantes del sonido generado directamente en el aire como del sonido resultante de vibraciones resonantes de las estructuras.

2.10. Cristales líquidos

Los cristales líquidos (LCP) son termoplásticos basados en poliésteres aromáticos similares al mostrado en la tabla 2.1 que presentan estructuras altamente ordenadas al menos en una dirección espacial, incluso en estado líquido o fundido.

Cuando estos materiales son sometidos a un esfuerzo las moléculas pueden deslizarse unas sobre otras, pero sin llegar a perder nunca la estructura ordenada. Esta estructura tan especial les confiere propiedades térmicas, mecánicas y ópticas excepcionales. Actualmente han despertado un gran interés pues presentan amplias aplicaciones tecnológicas, especialmente en los dispositivos de visualización gráfica.

2.11. Tipos de aditivos

La industria de los plásticos conoce desde siempre que la obtención de productos verdaderamente útiles sólo es posible si a la matriz polimérica se añaden ciertos aditivos. En general, se consideran aditivos aquellos materiales que van dispersos físicamente en una matriz polimérica, sin afectar a su estructura molecular. Por tanto, quedan excluidas sustancias tales como catalizadores, reticulantes, etcétera. La incorporación de aditivos a plásticos puede alterar considerablemente las propiedades del material.

Por ejemplo, en el caso del caucho según los aditivos que se empleen se pueden obtener neumáticos, suelas de zapatillas, colchones, bandas elásticas, gomas de borrar, etc.

En el caso del PVC se pueden obtener tubos rígidos, botellas, recubrimientos de cables, bandas transportadoras, ropa, balones, muñecas, etc., todos ellos materiales con propiedades y aspecto muy diverso.

Los aditivos se clasifican según su función y no en relación con su constitución química (tabla 2.2). Por su especial importancia, en este tema trataremos los plastificantes, estabilizantes, lubricantes, modificadores de impacto, retardantes de llama, agentes espumantes, cargas y pigmentos y colorantes.

La concentración de los aditivos en las formulaciones de plásticos generalmente se expresa en peso referida a 100 gramos de polímero o phr (partes por 100 de resina).

2.12. Plastificantes

Según el Consejo de la IUPAC “un plastificante es una sustancia que se incorpora a un material plástico o elastómero para aumentar su flexibilidad y facilitar su transformación. Un plastificante puede reducir la viscosidad del fundido, rebajar la temperatura de transición vítrea o disminuir el módulo elástico del fundido”. Esta definición pone de manifiesto las múltiples funciones que puede desarrollar un plastificante en un sistema polímeroplastificante.

Desde el punto de vista tecnológico, la eficacia de un plastificante se suele expresar como la cantidad de plastificante necesaria para alcanzar un valor dado de una propiedad de interés práctico; por ejemplo, la cantidad en que el valor de la Tg del polímero disminuye al introducir el plastificante.

En muchos casos, una buena eficacia es una propiedad muy importante; sin embargo, en otros puede suceder lo contrario: por ejemplo, si el plastificante es bastante más barato que el polímero, cuanto menor sea la eficacia mayor será la cantidad de plastificante necesaria para alcanzar un módulo o dureza dados, por lo que el coste de la formulación final será más bajo.

En formulaciones de plastisoles de PVC puede lograrse viscosidad más baja y, normalmente, menor envejecimiento si se usan cantidades mayores de un plastificante de menor eficacia. Los plastificantes se emplean en concentraciones que pueden oscilar entre 40 y 180 phr.

Tabla 3. Aditivos para plásticos.

Función del aditivo	Tipo de aditivo	Función específica	Ejemplos comunes
Facilitar el procesado	Lubricantes	Reducen fricción durante extrusión e inyección	Estearatos, ceras
Facilitar el procesado	Estabilizantes térmicos	Evitan degradación del polímero por calor	Ca-Zn, organoestánicos
Modificar propiedades mecánicas	Plastificantes	Aumentan flexibilidad y elongación	Ftalatos, adipatos

Modificar propiedades mecánicas	Cargas reforzantes	Incrementan rigidez y reducen costos	$CaCO_3$, Talco
Modificar propiedades mecánicas	Modificadores de impacto	Mejoran resistencia a golpes	Cauchos, copolímeros
Protección del material	Antioxidantes	Previenen oxidación térmica	Fenoles, fosfitos
Protección del material	Estabilizadores UV	Evitan degradación por radiación solar	Benzofenonas, HALS
Función estética/comercial	Colorantes y pigmentos	Aportan color e identificación	Óxidos metálicos, pigmentos orgánicos
Función funcional	Agentes antibloqueo	Evitan adhesión entre films	Sílice, talco fino

Nota. Desde *Plastic Pollution*, por Ritchie, H. et al, 2026, OurWorldInData.org. (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

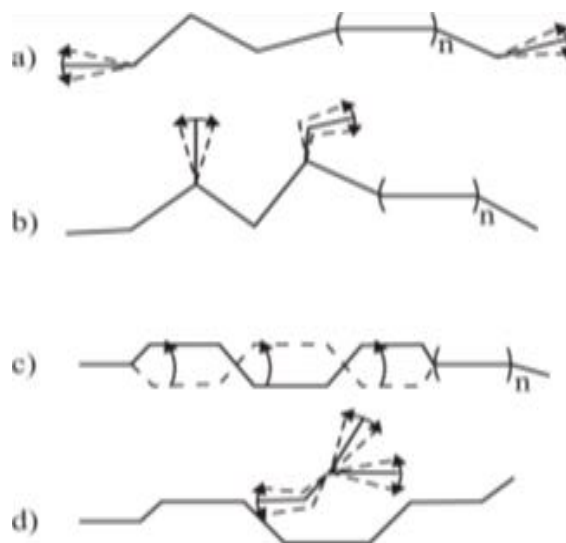
2.13. Teorías de la plastificación

La Teoría del volumen libre de Sears y Darby propone que entre las moléculas de un polímero tan sólo existe volumen libre y que suficiente volumen libre permite libertad de movimiento. A mayor volumen libre mayor facilidad de movimiento de las moléculas o partes de las mismas y, por tanto, mayor flexibilidad y menor T_g .

Se puede conseguir un aumento del volumen libre aumentando los grupos terminales (introduciendo ramificaciones o disminuyendo el peso molecular), o aumentando la temperatura, como se esquematiza en la figura 11. La adición de pequeñas moléculas de plastificante con cadenas flexibles implica gran cantidad de volumen libre.

El resultado de aumentar el volumen libre de una molécula al incorporar un plastificante es una reducción de la T_g , una mayor flexibilidad, aumento de la elongación a la rotura, etc.

Figura 12. Efecto sobre el volumen libre de a) los grupos terminales, b) ramificaciones, c) vibraciones consecuencia del aumento de la temperatura y d) la adición de plastificantes.



Nota. La fotografía muestra el efecto sobre el volumen libre de a) los grupos terminales, b) ramificaciones, c) vibraciones consecuencia del aumento de la temperatura y d) la adición de plastificantes. Tomado de *El Petróleo. Historia y refino*. [Fotografía], por Patricia Casas Blanco, 2010, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, (<https://zaguan.unizar.es/record/5134/files/TAZ-PFC-2010-205.pdf>)

La teoría del volumen libre está ampliamente difundida, sin embargo, no explica aspectos básicos de la plastificación, como por qué algunas sustancias son útiles como plastificantes y otras no, ni el hecho de que algunos polímeros se plastifican con facilidad mientras que otros no lo hacen.

Moorshead desarrolló un enfoque empírico para explicar el fenómeno de la plastificación, el cual trataremos con un cierto detalle por considerarlo muy práctico y fácilmente comprensible. Se refiere al PVC en particular y se plantea el por qué este polímero puede ser plastificado tan eficazmente, por qué determinados productos químicos son apropiados como plastificantes y, lo que es más importante, por qué ciertas estructuras químicas en un plastificante comunican propiedades tan interesantes.

2.14. Modelo de Moorshead

En general todas las teorías de la plastificación están de acuerdo en que un plastificante penetra en el interior de la masa del polímero y separa las cadenas, reduciendo así las fuerzas de atracción entre ellas. Las moléculas de un polímero altamente reticulado se mantienen juntas por enlaces covalentes, que no permiten que el plastificante separe las cadenas entre sí. En el caso de un polímero altamente cristalino, las fuerzas de asociación

son casi tan fuertes como los enlaces covalentes, por lo que el efecto es similar al caso anterior.

Estos polímeros no se pueden plastificar. De igual manera, todos los líquidos, de acuerdo con su estructura química, poseen una cohesión característica.

Para conseguir que el polímero y el plastificante se mezclen adecuadamente la fuerza cohesiva que atrae las moléculas del líquido entre sí debe ser del mismo orden que la que atrae las moléculas del polímero.

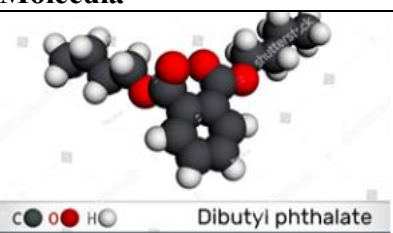
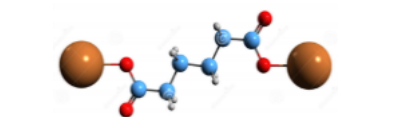
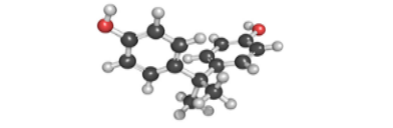
Si la fuerza cohesiva entre las moléculas de polímero es mucho mayor que entre las del líquido, las cadenas del polímero se asocian entre sí preferentemente y rechazan al líquido, cuyas moléculas se asocian también entre sí para formar gotitas, y lo mismo ocurriría en caso contrario.

En el caso del PVC, las cadenas son casi lineales y hay muy pocas zonas cristalinas. Los átomos de cloro, que son voluminosos, separan las cadenas del polímero reduciéndose así las fuerzas de Van der Waals, responsables de la cohesión en polímeros tales como el PE. Sin embargo, en el PVC, hay un átomo de Cl que sustituye a un átomo de H en átomos de C alternos.

El átomo de Cl no equilibrado, da lugar al desplazamiento de una carga, por lo que forma un dipolo. Las fuerzas de atracción debidas a los dipolos y, en menor proporción, las fuerzas de Van der Waals debidas al C y al H, así como las zonas cristalinas que pudieran existir, proporcionan la cohesión total del polímero. Por tanto, en el PVC la fuerza de cohesión dominante es la debida a la interacción dipolo-dipolo. Los líquidos que posean una estructura dipolar adecuada serán los más compatibles con el PVC. Los dipolos más corrientes en los plastificantes son los grupos éster de ácidos carboxílicos o de oxiácidos inorgánicos.

Otro dipolo particularmente útil e interesante es el anillo de oxirano (grupo epoxi). En la tabla 3 se muestra la estructura de 4 plastificantes pertenecientes a las familias más comunes (ftalatos, fosfatos, adipatos y epoxi).

Tabla 4. Aditivos para plásticos.

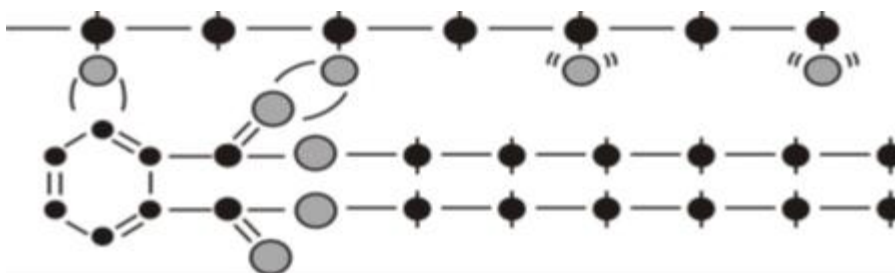
Familia	Plastificante	Molécula
Ftalato	DINP Diiso-nonil ftalato	 Dibutyl phthalate
Fosfato	TFF Trifenil fosfato	
Adipato	DOA Diiso-octil adipato	
Epoxi	Epoxiestearato de octilo	

Nota. Desde *Plastic Pollution*, por Ritchie, H. et al, 2026, OurWorldInData.org. (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

La estructura de la molécula de plastificante en su conjunto tiene un profundo efecto en las propiedades del compuesto plastificado. Mientras que los grupos polares son esenciales para lograr una buena compatibilidad, el resto de la molécula puede ser cíclica o alifática, o lo que es más corriente, parte cíclica y parte alifática. Si el plastificante contiene grupos polares y polarizables (caso de los ftalatos y de los fosfatos de arilo), la resistencia a la tracción en el polímero plastificado será grande pero su flexibilidad sólo mejorará moderadamente, ya que habrá puntos de alta cohesión en muchas zonas de las cadenas del polímero (de forma similar a cuando el polímero se encuentra sin plastificar).

Sin embargo, si la molécula de plastificante contiene además grupos alifáticos no-polares y nopolarizables, estos grupos separarán los dipolos del polímero sin introducir nuevos puntos de interacción entre las cadenas. Los dipolos del polímero que resultan apantallados por grupos alifáticos del plastificante se comportan como líquidos, como se esquematiza en la figura.

Figura 13. Las moléculas plastificadas con estos plastificantes presentan una buena flexibilidad.



Nota. La fotografía muestra las moléculas plastificadas con plastificantes que presentan una buena flexibilidad. Tomado de *Apuntes sobre Tecnología de Polímeros* [Fotografía], por M. Beltrán y A. Marcilla, s.f., Scribd, (<https://es.scribd.com/document/459146933/TECNOLOGIA-DE-POLIMEROS-M-BELTRAN-pdf>)

2.15. Estabilizantes

Desde que los polímeros sintéticos comenzaron a emplearse han interesado todos los procesos que, desencadenados por la acción de factores externos (calor, atmósfera, radiaciones, etc.), conducen al deterioro de su estructura, por lo que existen tipos muy diversos de estabilizantes. Generalmente los estabilizantes tan sólo ejercen una acción retardante sobre el proceso de degradación.

Un buen estabilizante debe ser capaz de controlar los procesos que tienen lugar durante la descomposición de los polímeros, pero además hay una serie de propiedades de otra índole que se suele exigir a los estabilizantes, como buena compatibilidad con el polímero, efectividad a bajas concentraciones, no afectar a otras propiedades de la formulación, bajo coste, y en ocasiones, estar exentos de color, olor y toxicidad. Se suelen emplear en concentraciones entre 0,1 y 6 phr.

2.16. Antioxidantes

Algunos polímeros como el polipropileno, que presentan átomos de carbono terciarios, tienden a oxidarse cuando se exponen a la intemperie. Las reacciones de oxidación comienzan con la formación de radicales libres, que en presencia de oxígeno forman peróxidos, produciéndose finalmente la rotura de la cadena y por tanto la degradación del material.

En general, se supone que los antioxidantes interrumpen las reacciones de degradación combinándose con los radicales libres o con los peróxidos formados, dando lugar a especies no reactivas. Muchos de los antioxidantes (también conocidos como estabilizantes primarios) son fenoles estéricamente impedidos o aminas aromáticas. En el esquema se muestra la reacción de estabilización de un polímero con di-ter-butil-p-cresol.

2.17. Estabilizantes Ultravioletas

Los estabilizantes ultravioletas generalmente se utilizan junto con los antioxidantes. La energía de la radiación UV que alcanza la superficie de la tierra puede ser lo suficientemente elevada para producir la rotura de los enlaces covalentes en los polímeros, con el amarilleo de su superficie y la consiguiente pérdida de propiedades. Estos estabilizantes absorben energía a una longitud de onda que resultaría perjudicial para los polímeros y la reemiten a una longitud de onda diferente.

Se utilizan las 4-alcóxibenzofenonas, benzotriazoles, acrilonitrilos sustituidos, entre otros. A modo de ejemplo del modo de actuación de estos compuestos, en la siguiente reacción se muestra la absorción de energía del salicilato de fenilo para formar una hidroxibenzofenona, y la posterior emisión de energía del quelato para formar una quinona.

2.18. Estabilizantes térmicos

Los estabilizantes térmicos generalmente se emplean con polímeros halogenados. Los polímeros halogenados, tales como los derivados del cloruro de vinilo y de vinilideno tienen una gran importancia comercial, a pesar de que presentan problemas especiales con respecto a su estabilidad térmica durante el procesado.

Además de las reacciones oxidativas que tienen lugar en el resto de polímeros, en el caso de los polímeros halogenados puede tener lugar un proceso de deshidrohalogenación muy rápido.

El haluro de hidrógeno formado durante la descomposición de estos polímeros actúa además como catalizador de la misma. Otra desventaja adicional en estos polímeros es que los dobles enlaces conjugados formados durante el proceso de deshidrohalogenación confieren una fuerte coloración a los productos.

Muchos polímeros halogenados, como el PVC, presentan una temperatura de descomposición inferior a su temperatura de procesado, de modo que el empleo de estabilizantes térmicos es imprescindible con estos materiales.

Dentro de las sustancias que pueden actuar como estabilizantes térmicos para el PVC y otros polímeros halogenados, los carboxilatos metálicos (R2M) constituyen el grupo más numeroso y homogéneo, y además cubren el mayor número de aplicaciones. Al igual que el mecanismo de degradación del PVC, la forma en que los estabilizantes interaccionan con éste no está del todo clara.

Los siguientes mecanismos que se muestran hacen referencia al PVC, pero serían igualmente válidos para otros polímeros halogenados. Un modo de acción de los estabilizantes podría ser que reaccionaran con el cloruro de hidrógeno formado en la descomposición del PVC (o en general con el haluro de hidrógeno para otros polímeros halogenados):



La otra posibilidad es que el estabilizante reaccione directamente con las estructuras lábiles del polímero. Los carboxilatos metálicos de Cd y Zn y de otros metales como Pb, Ba, Sn, pueden reaccionar con los átomos de cloro lábiles, impidiendo el crecimiento de las cadenas poliénicas, de la forma siguiente:



2.19. Lubricantes

Los lubricantes se utilizan para disminuir las fuerzas de fricción y reducir el desgaste de dos cuerpos que rozan entre sí. En la industria de transformación de plásticos es frecuente que en diferentes etapas del procesado del polímero aparezcan problemas como consecuencia de una fricción excesiva. En ocasiones ésta ocurre en las tolvas de alimentación de la granza del polímero creando problemas en el transporte y alimentación a los equipos de transformación. También es frecuente que se produzca fricción excesiva entre el polímero fundido y las superficies metálicas de los equipos de transformación, que podría dificultar seriamente el flujo del fundido, dando lugar a efectos indeseables tales como baja producción o mala calidad superficial del producto acabado.

En ocasiones también se presentan problemas de este tipo durante las operaciones de acabado, por ejemplo, durante la impresión, envasado y embalaje. Para resolver estos problemas se suelen emplear lubricantes internos (lubricación de capa sólida) y lubricantes externos (lubricación en la capa límite).

Realmente los lubricantes no pueden dividirse categóricamente en externos e internos, ya que es probable que la mayor parte de ellos actúen de ambas maneras, por lo que esta clasificación se refiere al comportamiento dominante.

2.20. Lubricantes externos

Tienen como misión reducir y controlar la adhesión entre el polímero y las partes metálicas de los equipos de transformación. Deben tener baja solubilidad en el polímero, sobre todo a las temperaturas de procesado, pero han de tener suficiente polaridad de modo que tengan afinidad tanto por el polímero como por las superficies metálicas.

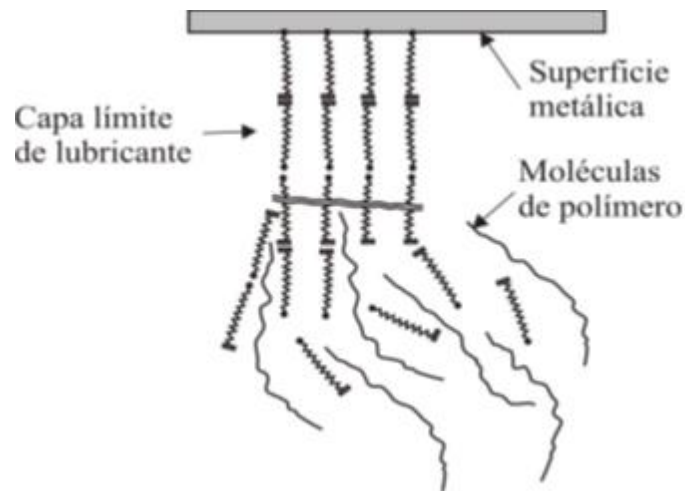
Esto se consigue con moléculas que posean una zona polar y una apolar. En el proceso de lubricación los grupos polares de las moléculas del lubricante se orientan hacia la superficie metálica y forman una capa permanente.

Esta capa límite de la película lubricante consiste en moléculas orientadas hacia la parte metálica del equipo, como se muestra en la figura 2.3, que evitan así ser solvatadas por las moléculas móviles del polímero. Este mecanismo se aplica a todos los sistemas poliméricos, sean o no polares.

En general, la compatibilidad de estos lubricantes con el polímero es baja y, por consiguiente, la formación de una capa límite se puede lograr con niveles muy bajos de incorporación. La velocidad de migración de los lubricantes a la interfase es bastante baja debido a su peso molecular relativamente alto y a la baja concentración en el sistema.

Al aumentar la concentración de lubricante y debido a su reducida compatibilidad con el polímero, puede producirse una exudación o migración hacia la superficie, que podría incluso arrastrar partículas de pigmentos o de cargas y formar un depósito en las superficies del equipo y del material.

Figura 14. Capa límite de lubricante entre la superficie metálica y el polímero fundido.



Nota. La fotografía muestra la capa límite de lubricante entre la superficie metálica y el polímero fundido. Tomado de *Apuntes sobre Tecnología de Polímeros* [Fotografía], por

M. Beltrán y A. Marcilla, s.f., Scribd,

(<https://es.scribd.com/document/459146933/TECNOLOGIA-DE-POLIMEROS-M-BELTRAN-pdf>)

Los lubricantes externos más usados son ácido esteárico, estearato cálcico y de plomo, ceras de parafina y otras ceras, PE de bajo peso molecular, ciertos ésteres tales como palmitato de etilo, etcétera. Las concentraciones empleadas se sitúan normalmente entre 0.5 y 1.0 phr.

2.21. Lubricantes internos

La función de estos aditivos consiste en disminuir la fricción de las moléculas de polímero entre sí, de modo que mejore el flujo del material. Idealmente, los lubricantes internos deben ser compatibles con el polímero sólo a altas temperaturas. Si la compatibilidad se mantiene también a temperaturas bajas el lubricante debe usarse en pequeñas concentraciones. Un exceso de lubricación podría provocar el deslizamiento excesivo de las partículas entre sí y de las partículas sobre las superficies metálicas. Esta situación daría lugar a una velocidad menor de fusión y en consecuencia provocaría una disminución en la producción. En general, los lubricantes internos son químicamente similares a los externos, con la excepción de que tienen mayor compatibilidad con el polímero y no migran fácilmente a la superficie.

Además de los productos ya citados como lubricantes externos, se usan como internos los siguientes: derivados de ceras, como ésteres de cera de Montana; gliceril ésteres, tales como los de los ácidos esteárico y oleico; alcoholes de cadena larga, etcétera. Se emplean en concentraciones entre 1 y 2 phr.

2.22. Cargas

El concepto de carga es muy amplio, pero se puede definir una carga como un material sólido que se añade a las formulaciones de plásticos y adhesivos, con objeto de reducir costes. Una carga debería no interferir en las propiedades del polímero (propiedades mecánicas, comportamiento reológico, color) y debería dispersarse con facilidad, de modo que la distribución sea adecuada, lo que difícilmente se consigue en la práctica.

Por otra parte, las cargas deben ser baratas de modo que supongan una clara disminución del coste de la formulación. Sin embargo, en el caso de cargas con densidades muy bajas se puede conseguir una disminución sustancial del precio de una formulación aún cuando la carga sea más cara que el resto de componentes, pues al reducir la densidad de la formulación se puede reducir el peso de la pieza acabada, lo que puede ser doblemente interesante.

La naturaleza química de las cargas puede ser muy diversa. Se utilizan desde las sustancias inorgánicas minerales más sencillas como carbonato de calcio, sulfatos de metales alcalinotérreos, silicatos, sílices y otros óxidos, hasta negro de humo, microesferas de vidrio o cerámica, entre otras.

Entre las cargas orgánicas se encuentran la celulosa, almidón, cáscara de almendra, etc. Se emplean generalmente en concentraciones entre 5 y 50 phr.

En general, los materiales cargados presentan peores propiedades mecánicas (resistencia a la tracción e impacto) y problemas de blanqueamiento al aplicar un esfuerzo (deshumedecen), por ello sólo se suelen emplear para aplicaciones de bajos requerimientos. No es este el caso de las fibras y otros materiales empleados como refuerzos que en ocasiones se llaman cargas reforzantes. European Commission. (2019).

Communication from the Commission: The European Green Deal (COM (2019) 640 final).
https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF

Figura 15. Barril de petróleo.



Nota. La fotografía muestra barriles de petróleo. Tomado de *Apuntes sobre Tecnología de Polímeros* [Fotografía], por M. Beltrán y A. Marcilla, s.f., Scribd, (<https://es.scribd.com/document/459146933/TECNOLOGIA-DE-POLIMEROS-M-BELTRAN-pdf>)

Tabla 5. Composición de los elementos componentes del petróleo y aceite.

Elemento/Componente	Contenido típico	Unidad	Observaciones
Carbono ©	83,0 – 87,0	% en masa	Principal componente; alto poder calorífico
Hidrógeno (H)	10,0 – 14,0	% en masa	Influye en la relación H/C del combustible
Azufre (S)	0,05 – 6,0	% en masa	Genera emisiones SO _x y problemas de corrosión
Nitrógeno (N)	0,1 – 0,2	% en masa	Relacionado con formación de NO _x

Oxígeno (O)	0,05 – 2,0	% en masa	Reduce estabilidad térmica
Níquel (Ni)	< 120	ppm	Metal pesado; envenena catalizadores
Vanadio (V)	< 1200	ppm	Metal pesado; afecta procesos de refinación

Nota. Desde *Plastic Pollution*, por Ritchie, H. et al, 2026, OurWorldInData.org. (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

La Tabla 5 presenta la composición elemental típica del petróleo y sus principales componentes. Se observa que el carbono y el hidrógeno constituyen la mayor parte de su composición, lo que explica su carácter combustible y su elevado poder calorífico. También se encuentran elementos como azufre, nitrógeno y oxígeno, además de pequeñas cantidades de metales como níquel y vanadio. Estos componentes son relevantes debido a que pueden influir en las características del combustible, las emisiones generadas durante su combustión y los procesos de refinación. Esta composición resulta de interés para el presente estudio, ya que permite establecer una referencia para comparar las características de los productos líquidos obtenidos a partir de la transformación de residuos plásticos.

Tabla 6. Propiedades del petróleo crudo según la Opex.

Propiedad	Valor típico / Rango	Unidad / Notas
Estado físico	Líquido oleoso	
Densidad relativa (a 15-20°C)	0,80 – 0,98	sin unidades; más liviano que el agua (Ministerio de Transición Ecológica)
Gravedad API	10 – 45	Grados API (clasifica peso del crudo) (Anton Paar)
Viscosidad cinemática	2 – 10+ (varía con temp.)	cSt a 40-50°C (puede ser mayor en crudos pesados) (Ministerio de Transición Ecológica)
Punto de ebullición inicial	~30 – 125	°C (depende del crudo) (Ministerio de transición ecológica).
Azufre total	0,08 – 5	% en peso (indica crudo dulce o amargo) (Ministerio de transición ecológica)
Ceras (parafinas)	Hasta ~15	% en peso (Ministerio de transición ecológica)

Asfaltenos	Hasta ~5	% en peso (Ministerio de transición ecológica)
Punto de inflamación (aprox.)	Variable	Depende de la composición y fracción (Ministerio de Transición ecológica).
Color	Amarillo a negro	Cambia según impurezas y peso (Gobierno de México).
Olor	Característico a hidrocarburos	Depende de compuestos de S y aromáticos.

Nota. Desde *Plastic Pollution*, por Ritchie, H. et al, 2026, OurWorldInData.org. (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

La Tabla 6 resume algunas de las principales propiedades físicas y químicas del petróleo crudo, entre ellas la densidad, gravedad API, viscosidad, punto de ebullición inicial, contenido de azufre, ceras y asfaltenos. Estas propiedades pueden variar considerablemente dependiendo del tipo y origen del crudo. La gravedad API permite clasificar el petróleo de acuerdo con su densidad, mientras que la viscosidad y el rango de ebullición son parámetros importantes para su procesamiento y separación en distintas fracciones. En el contexto de este estudio, estas propiedades sirven como referencia para evaluar las características de los productos líquidos obtenidos mediante la transformación de residuos plásticos y determinar su posible semejanza con fracciones derivadas del petróleo.

Tabla 7. Datos crudos completos.

Datos crudos completos		
Gravedad específica	oAPI 60/60	31.6 0.8676
Azufre Punto de fluidez	Wt.% oF	1.08 -5
Agua y sedimentos	Vol %	0.0
Contenidos de sal, NaCl	Ptb	0.85
Presión de vapor	psi	4.9
Reid	ppm	0
H ₂ S (disuelto)	mg KOH/gm	0.11
N.º neutro (D664)		
Viscosidades:	cs	16.1
Cinemática a 70°F	cs	10.2
100°F		
Saybolt Universal a 70°F	sec	81.4
100°F	sec	59.5

Nota. Desde *Plastic Pollution*, por Ritchie, H. et al, 2026, OurWorldInData.org. (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

La Tabla 7 presenta los datos correspondientes a la caracterización de una muestra de petróleo crudo, incluyendo gravedad específica, gravedad API, contenido de azufre, punto de fluidez, agua y sedimentos, presión de vapor y viscosidad.

Los valores obtenidos permiten describir el comportamiento físico del crudo y sus características de transporte y procesamiento. En particular, la gravedad API, la viscosidad y la presión de vapor son parámetros relevantes para comparar diferentes corrientes de hidrocarburos. Estos datos se utilizan como referencia en este trabajo para contrastar las propiedades de los productos líquidos obtenidos a partir de residuos plásticos con las características de un crudo de referencia.

Tabla 8. Hidrocarburos ligeros.

Hidrocarburos ligeros		
% sobre crudo	Peso	Vol.
Metano	0,02	0,04
Etano	0,22	0,37
Propano		
Isobutano Butano normal	0,18	0,27
	0,60	0,89
Isopentano	0,56	0,77
Pentano normal	0,82	1,13

Nota. Desde *Plastic Pollution*, por Ritchie, H. et al, 2026, OurWorldInData.org. (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

La Tabla 8 muestra la presencia de hidrocarburos ligeros en el petróleo crudo, incluyendo metano, etano, propano, butanos y pentanos. Estos compuestos presentan bajas masas moleculares y corresponden a las fracciones más ligeras de los hidrocarburos presentes en el crudo. Su presencia es importante debido a que estos compuestos poseen una elevada volatilidad y pueden formar parte de las corrientes gaseosas generadas durante los procesos de transformación térmica. La información presentada permite establecer una referencia para analizar la composición de los productos gaseosos que pueden generarse durante la conversión de residuos plásticos. European Commission. (2019). *Communication from the Commission: The European Green Deal* (COM (2019) 640 final). https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF

3. INTRODUCCIÓN A LA PIROLISIS

En 1950, la producción mundial de plástico era de aproximadamente 2 millones de toneladas. Actualmente, ronda los 400 millones de toneladas, lo que representa un aumento de casi el 20000 %.

Como material, este puede durar hasta 500 años en algunos casos. Aun así, los fragmentos de plásticos no desaparecen por completo, se descomponen en fragmentos cada vez más pequeños, convirtiéndose en microplásticos que acaban en el suelo donde cultivamos nuestro alimento, al agua que bebemos y al aire que respiramos. Los investigadores han vinculado estos microplásticos con problema de salud como diabetes enfermedades cardiacas y baja fertilidad masculina.

3.1. ¿Qué es la pirólisis de plástico?

La pirólisis de plástico es un proceso químico que implica la descomposición química de los plásticos en otras moléculas calentándolos a temperaturas extremadamente altas en ausencia de oxígeno.

Un diagrama que muestra el proceso de pirólisis, desde la reacción de la condensación del gas hasta la destilación. A diferencia del reciclaje tradicional del plástico, la pirolisis, en teoría, no se limita a tipos específicos de plástico.

Podría adaptarse a muchos de ellos, aunque las tecnologías actuales se limitan a unos pocos tipos polietileno y polipropileno, utilizados en envases y botellas de alimentos a escala industrial.

La pirolisis también puede gestionar residuos plásticos más complejos, como neumáticos y aparatos electrónicos desechados, aunque los gestores y recicladores de residuos sólidos evitan ciertos tipos de plásticos en la pirolisis, como el cloruro de polivinilo (o PVC), presente en tuberías y productos para techos, y el polietileno, utilizando en embalaje, ya que puede generar subproductos nocivos.

Durante la pirolisis, los polímeros plásticos se descomponen en moléculas más pequeñas, lo que da como resultado la producción de petróleo líquido, gases fuertes de combustibles como metano, propano y butano, y carbón.

El carbón vegetal es el residuo sólido que queda al final del proceso de pirolisis. Se puede utilizar como material rico en carbono para diversas aplicaciones, incluyendo su adicción al suelo para hacerlo más saludable para la agricultura, ya que aumenta la humedad y el pH del suelo, lo que favorece la absorción de nutrientes. El carbón vegetal también tiene la capacidad de absorber gases de carbono nocivo del aire, lo que puede ayudar a prevenir el cambio climático. Miandad, R.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Rehan, M.; Nizami, A.S. Pirólisis catalítica de residuos plásticos: Una reseña. *Proceso Saf. Entorno. Prot.* 2016, 102, 822–838.

3.2. ¿Cómo funciona la pirólisis?

El proceso de pirólisis de plástico normalmente implica varios pasos clave.

En la primera etapa de la pirólisis, los recicladores comunicativos recogen los residuos plásticos y los limpian para eliminar cualquier contaminante. Posteriormente, el plástico se tribula en trozos más pequeños para facilitar el proceso de pirólisis. A diferencia del reciclaje tradicional, requiere una clasificación mínima.

Los recicladores químicos que operan plantas de pirólisis introducen el plástico triturado en un reactor de pirólisis, donde se calientan a temperaturas que oscilan entre 315 y 871 grados Celsius (600 y 1600 grados Fahrenheit). Sin oxígeno, los plásticos en el reactor no se incendian ni emiten humo al aire. En cambio, este entorno de alta temperatura provoca la descomposición de los polímeros plásticos en moléculas de hidrocarburos más pequeñas. Estas moléculas más pequeñas pueden refinarse aún más. (Miandad, R.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Rehan, M.; Nizami, A.S. Pirólisis catalítica de residuos plásticos: Una reseña. *Proceso Saf. Entorno. Prot.* 2016, 102, 822–838.)

La alta temperatura convierte algunas moléculas en vapores, que se condensan formando aceite líquido. Las empresas químicas pueden refinar aún más este aceite para utilizarlo como combustible o como materia prima para fabricar otros productos químicos o plásticos. Estos productos pueden durar entre 8 y 24 horas.

Además del petróleo líquido, el proceso de pirólisis genera gases naturales, como metano, etano, butano y propano. Los operadores de pirólisis capturan estos gases y, en ocasiones, pueden utilizarlos como fuentes de energía para alimentar el reactor de pirólisis u otros procesos industriales.

3.3. Producción de PPO mediante pirólisis

La pirólisis térmica se ha utilizado ampliamente en investigación para analizar plásticos de un solo tipo o en mezclas. La pirólisis de residuos plásticos produce aceite crudo con propiedades similares al diésel y la gasolina comerciales, además de gas y carbón vegetal. Entre estos productos de pirólisis, el aceite de pirólisis de plástico (PPO) es el más valioso. Para llevar a cabo la pirólisis de residuos plásticos, el rango de temperatura óptimo suele ser de 400 a 500 °C (Chen et al., 2014). Los rangos de temperatura para los procesos de pirólisis lenta y rápida son de 300 a 400 °C y de 500 a 800 °C, respectivamente (Das y Tiwari, 2018 ; Scott et al., 1990).

Çepelioğullar y Pütün estudiaron la pirólisis térmica del PVC a 500 °C en un reactor de lecho fijo con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y obtuvieron un alto rendimiento de gas del 87,7 % en peso y solo un 12 % en peso de aceite líquido (Çepelioğullar y Pütün, 2013). Kumar y Singh realizaron la pirólisis térmica del HDPE en un reactor semicontinuo y observaron una mayor producción de gas que de combustible líquido (Kumar y Singh, 2011).

Indicaron que el mayor rendimiento de aceite líquido se alcanzó a 450 °C; sin embargo, a temperaturas más elevadas de 500 °C y 550 °C, se produjo una cantidad considerable de cera debido a la descomposición incompleta del plástico en componentes de hidrocarburos de mayor masa molecular.

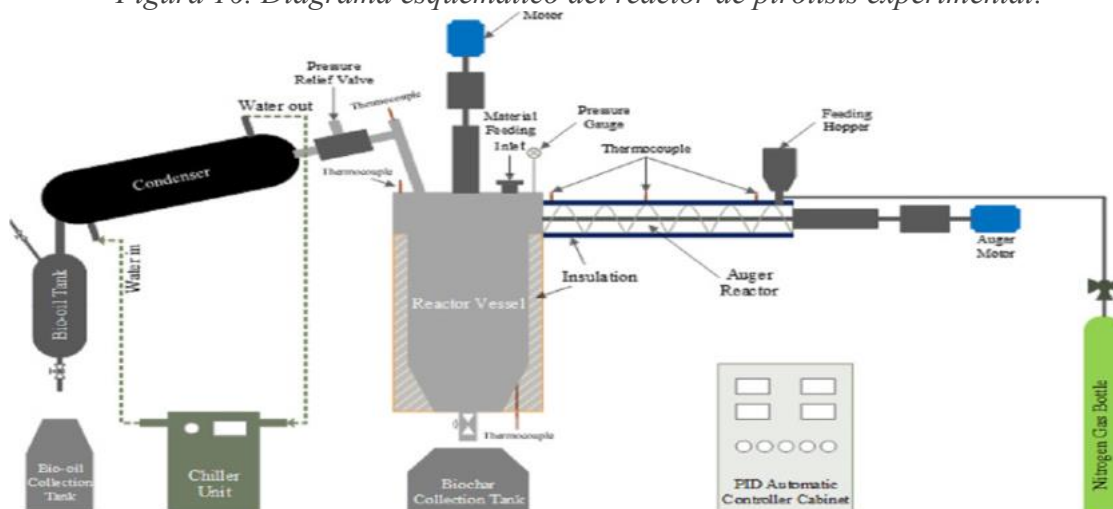
Por otro lado, la producción de gas fue mayor a temperaturas más bajas debido a la descomposición secundaria de los productos de pirólisis dentro de la cámara del reactor.

Se obtuvo alrededor del 95,80 % en peso de aceite líquido a partir de la pirólisis térmica de PS utilizando un reactor de pirólisis por lotes a 500 °C y se formó muy poca cantidad de carbón (0,99 % en peso) (Lerici et al., 2015).

Kalargaris et al. también realizaron pirólisis térmica de residuos plásticos mixtos a 900 °C y documentaron un rendimiento de aceite líquido del 60-65 % en peso (Kalargaris et al., 2017a). Otro artículo de investigación documentó un rendimiento de aceite líquido del 85 % en peso a partir de la pirólisis térmica de HDPE en un reactor de lecho fluidizado a una temperatura de reacción de 500 °C y un tiempo de reacción de 60 minutos (Luo et al., 2000). La utilización de PPO en motores diésel de automóviles puede reducir la presión sobre los combustibles fósiles derivados del petróleo y puede proporcionar una solución eficaz para reducir los efectos negativos de los residuos plásticos en la salud humana y el medio ambiente.

Los autores de este artículo trabajan actualmente en la pirólisis térmica de residuos plásticos (individualmente o en mezclas). En la figura 1 se muestra un diagrama esquemático del reactor de pirólisis que utilizan, y en la figura 2, una fotografía del mismo. El reactor tiene una capacidad de 20 L y se encuentra en el Laboratorio de Investigación de Combustibles y Energía de la Universidad Central de Queensland, campus Rockhampton North, Australia.

Figura 16. Diagrama esquemático del reactor de pirólisis experimental.



Nota. La fotografía muestra un diagrama esquemático del reactor de pirólisis experimental. Tomado de *Schematic diagram of experimental pirolisis reactor*

[Fotografía], por F. Faisal, et al., 2023,

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

Figura 17. Planta de pirólisis de plásticos de desecho de CQU.

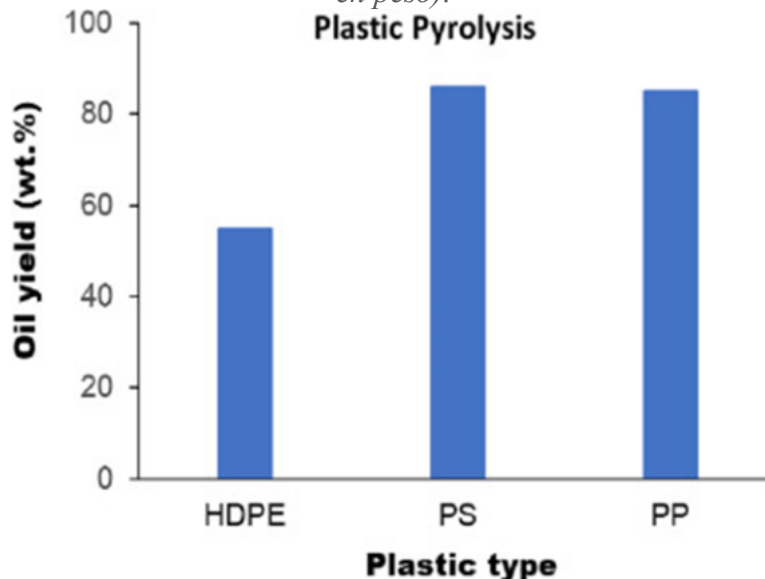


Nota. La fotografía muestra una planta de pirólisis de plásticos de desecho de CQU. Tomado de *CQU's waste plastic* [Fotografía], por F. Faisal, et al., 2023, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

El componente principal de este pirolizador es el reactor pirolítico, un recipiente de acero inoxidable. Antes de realizar los experimentos de pirólisis, se utiliza nitrógeno gaseoso para purgar el sistema y eliminar el oxígeno. Este pirolizador puede funcionar tanto como reactor de tornillo sin fin como reactor discontinuo. Sin embargo, para los presentes estudios experimentales de pirólisis térmica de HDPE, PS y PP a 540 °C durante 6 h para obtener PPO, se utilizó como reactor discontinuo. Se instalaron resistencias eléctricas alrededor del cilindro del recipiente, dentro de la capa aislante externa, para calentar las paredes del reactor. La velocidad de calentamiento se fijó en 6 °C/min y la materia prima dentro del reactor pirolítico se agitó continuamente mediante un agitador mecánico central.

Los vapores generados en la cámara del reactor caliente pasaron a través de un condensador de carcasa y tubos, donde se recogieron los vapores condensables como aceite líquido. Una unidad de refrigeración externa controló la temperatura del condensador y se utilizó un controlador PID para controlar las temperaturas de todo el sistema. Al finalizar el proceso de pirólisis, el aceite crudo plástico se recolectó del tanque de aceite y el residuo sólido (carbón vegetal) se recogió directamente de la salida inferior del reactor pirolítico (Jahirul et al., 2022). Los rendimientos de aceite pirolítico obtenidos en los trabajos de los autores mediante la pirólisis térmica de PS, PP y HDPE se muestran en la figura 3. Se observa que los resultados fueron de 55 % en peso, 86 % en peso y 85 % en peso, respectivamente, valores comparables con los hallazgos de otros investigadores (Ahmad et al., 2015 ; Miandad et al., 2017).

Figura 18. Rendimiento de aceite pirolítico plástico a partir de pirólisis térmica (en % en peso).



Nota. La fotografía muestra un gráfico que muestra el rendimiento de aceite pirolítico plástico a partir de pirólisis térmica (en % en peso). Tomado de *Plastic pyrolytic oil yield from thermal pyrolysis (in wt%)* [Gráfico], por F. Faisal, et al., 2023, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

Tabla 9. Rendimiento de productos de pirólisis de distintos residuos plástico.

Materia prima	Tipo de reactor	Temperatura (°C)	Líquido (% peso)	Gas (% peso)	Carbón (% peso)	Referencia
PS	Lote	500	95.8	3.2	1.0	Lerici et al., 2015
PS	Continuo (mufla)	—	90	—	—	Olalo, 2021
PS	Lote semicontinuo (FCC)	400	90	6	4	Lee et al., 2002
PS	Lote presurizado	425	97	—	—	Onwudili et al., 2009
PVC	Cama fija	500	12.3	87.7	—	Çepelioğullar y Pütün, 2013
PET	—	500	38.9	52.1	9.0	FakhrHoseini y Dastanian, 2013
HDPE	Lote	450	74.5	5.8	19.7	Miskolczi et al., 2004
LDPE	Lote	430	75.6	8.2	~8	Uddin et al., 1997

MPW	Cama fija	900	60–65	30–35	10	Kalargaris et al., 2017a
-----	-----------	-----	-------	-------	----	--------------------------

Nota. Adaptado desde *Plastic the facts 2017 (versión reducida)*, por Plastic Europe Market Research Group, 2017, (<https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2017-Plastics-the-facts.pdf>)

Los investigadores han utilizado diversos tipos de plásticos de desecho para producir aceite plástico. La variación en el rendimiento del producto obtenida al utilizar diferentes tipos de plásticos como materia prima, junto con los tipos de reactores, la velocidad de calentamiento y la temperatura de operación, se muestra en la Tabla 9.

Algunos investigadores mencionaron el pretratamiento de los residuos plásticos antes de realizar la pirólisis, ya que es necesario eliminar partículas indeseables como tierra, suciedad, residuos de alimentos, etc., que pueden quedar mezcladas con ellos. Por ejemplo, Almohamadi et al. mencionaron la reducción del tamaño de los residuos plásticos mixtos (MPW) a <2 mm mediante el uso de un molino de martillos (Almohamadi et al., 2021). Sembiring et al. (2018) trituraron botellas de plástico (mezcla de PET y PP) para transformarlas en escamas de plástico de 2 a 3 cm.

Olalo informó sobre pretratamientos de materia prima de plástico de desecho (PS, PE y plástico mixto) que implican limpieza, trituración y secado al aire (Olalo, 2021). Miandad et al. también indicaron que se trituran las muestras de plástico de desecho para reducir el tamaño a trozos pequeños de 2 cm² a partir de plásticos de desecho de tipo PE, PS y PET (obtenidos de bolsas de supermercado, vasos para bebidas y platos desechables) (Miandad et al., 2017).

Los catalizadores en la pirólisis pueden mejorar significativamente la calidad del aceite pirolítico, reducir el tiempo y el consumo de energía para la pirólisis y ayudar a eliminar los contaminantes de los desechos plásticos. Se encontró una mayor cantidad de rendimiento de producto gaseoso en la pirólisis catalítica en comparación con el aceite líquido (Pakiya Pradeep y Gowthaman, 2019). En el caso de la pirólisis catalítica de HDPE en un reactor discontinuo a 450 °C utilizando catalizador FCC, el rendimiento de aceite líquido también fue mayor (82,5 % en peso) en comparación con el rendimiento de aceite pirolítico térmico del 74,5 % en peso en las mismas condiciones de operación (Miskolczi et al., 2004).

En ese caso, la producción de carbón también fue mayor en la pirólisis térmica (19,7 % en peso) en comparación con la pirólisis catalítica (11,2 % en peso) en el reactor discontinuo. Durante la pirólisis catalítica, se produce el craqueo de los hidrocarburos producidos, que los rompe en moléculas de hidrocarburos más pequeñas y gas hidrógeno. Por lo tanto, durante la pirólisis catalítica, la cantidad de producto gaseoso obtenido es mayor que la del petróleo líquido. Además, el craqueo catalítico puede producir petróleo plástico de mayor calidad utilizando temperaturas y tiempos de retención más bajos en comparación con la pirólisis térmica (Pattiya et al., 2008).

Sembiring et al. analizaron el efecto del plástico de desecho mixto (PP y PET) mientras realizaban pirólisis catalítica a 400 °C (Sembiring et al., 2018). Encontraron que con el aumento de la cantidad de PET en la mezcla de plástico, la producción de petróleo líquido disminuye, pero la producción de carbón y cera aumenta significativamente. La producción de gas aumentó durante el uso (PP:PET = 7,5:2,5) en comparación con el uso de PP y PET en una proporción de mezcla de 9:1, pero se redujo con el aumento de la cantidad de PET en la proporción de la mezcla (PP:PET = 6,5:3,5).

La pirólisis catalítica de HDPE fue realizada por Elordi et al. en un reactor de lecho cónico en surtidor (CSBR) utilizando un catalizador de zeolita HY y encontraron un rendimiento de gasolina del 68,7 % en peso (Elordi et al., 2007).

El tipo de pirólisis, ya sea térmica o catalítica, afecta el rendimiento de petróleo líquido, gas y carbón. En pirólisis catalítico, el rendimiento de líquidos y gases es mayor a temperaturas más bajas debido a una reacción catalítica más alta. El catalizador puede acelerar la velocidad de reacción al reducir la energía de activación de la reacción. La discusión detallada sobre los efectos de los diferentes tipos de catalizadores en el rendimiento del producto pirolítico se ha discutido en otro artículo de revista publicado por los autores (Faisal et al., 2022).

Miskolczi et al. han estudiado tres tipos diferentes de catalizadores (NCM, FCC y HZSM-5) y han comparado los rendimientos de los productos pirolíticos catalíticos con la pirólisis térmica (Miskolczi et al., 2004). El rendimiento del producto varió con la temperatura y los tipos de catalizador. Sin embargo, han documentado que con el uso de catalizador (los tres tipos) el rendimiento de aceite plástico, gas y residuos fue mayor que con la pirólisis térmica a 450 °C.

La razón es la ruptura del hidrocarburo producido en moléculas de hidrocarburo más pequeñas y gas hidrógeno. Además, debido a que tienen un área de superficie microporosa diferente de los diferentes catalizadores, lo que cambia la actividad catalítica y, por lo tanto, causa una variación en el rendimiento del producto. Sin embargo, en el caso del craqueo catalítico, la actividad catalítica disminuyó a temperaturas más altas debido a la formación de coque en el catalizador. Cuando la formación de coque es demasiado alta, puede desactivar completamente el catalizador, y entonces las diferencias entre la pirólisis térmica y la catalítica se reducen a temperaturas más altas.

Lerici et al. descubrieron que, al realizar la pirólisis catalítica para PS utilizando un catalizador HY en un reactor discontinuo, el rendimiento de aceite líquido fue del 71 % en peso a 500 °C con un 4,59 % en peso de carbón en un tiempo de reacción de 20 min (Lerici et al., 2015).

Algunos investigadores han utilizado un proceso de dos etapas para la pirólisis de plásticos de desecho que consiste en pirólisis térmica y catalítica. Se obtuvo una cantidad muy alta de rendimiento de gas (74,3 % en peso) de dicho proceso de pirólisis de dos etapas de LDPE (Aguado et al., 2007). La primera etapa constituye un craqueo térmico de LDPE en el rango de temperatura de 425–475 °C en un reactor discontinuo y los vapores producidos se enviaron a un reactor de lecho fijo donde se realizó la pirólisis

catalítica con catalizador HZSM-5 al 10 % en peso. Artetxe et al. también analizaron la pirólisis termocatalítica de HDPE en un sistema de reacción de dos pasos que consiste en una pirólisis térmica a 500 °C (Artetxe et al., 2013).

Los volátiles producidos en el proceso de pirólisis térmica se someten a un proceso de pirólisis catalítica utilizando el catalizador de zeolita HZSM-5 que tiene $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ en una proporción de 30, 80 y 280. Con una reducción en la proporción $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ a 30 de 280, la producción de olefinas ligeras aumentó del 35,5 % en peso al 58 % en peso, mientras que los hidrocarburos pesados disminuyeron del 28 % en peso al 5,3 % en peso. También han observado que las mayores cantidades de olefinas ligeras se produjeron para el $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ más ácido en una proporción de 30. La Tabla 1 muestra el rendimiento de aceite pirolítico de algunos plásticos de desecho mixtos.

El análisis de los datos presentados en la Tabla 1 condujo a ciertas decisiones, por ejemplo, los plásticos tipo PS producen la mayor cantidad de aceite líquido, que es alrededor del 90% en peso, mientras que la menor cantidad de aceite líquido se produjo durante la pirólisis del PVC (alrededor del 12% en peso). Se produjo una cantidad relativamente mayor de gas a partir de la pirólisis de PET y PVC en comparación con el aceite líquido. Además, el PVC puede generar ácido clorhídrico, que es altamente corrosivo y puede causar corrosión en diferentes partes del motor si se usa.

El polietileno puede producir cera, que tiene un mayor poder calorífico y puede considerarse un producto valioso; sin embargo, la cera puede obstruir el pirolizador e interrumpir el proceso de pirólisis. Sin embargo, en el caso de la pirólisis de MPW, dependiendo de las mezclas de plástico utilizadas, la temperatura, el tiempo de retención, el tipo de pirolizador, etc., afecta los rendimientos del producto y, por lo tanto, se ha notado una variación en los rendimientos.

3.4 Propiedades del aceite pirolítico plástico

Las propiedades del PPO producido a partir de la pirólisis térmica y catalítica se presentan en la Tabla 2. Para mejorar las propiedades del aceite pirolítico crudo, los autores han llevado a cabo procedimientos de postratamiento que son la destilación y el hidrotratamiento del PPO crudo en sus presentes trabajos de investigación. El proceso de destilación separa los petróleos crudos en cortes de combustible y aceite lubricante con puntos de ebullición que oscilan entre 50 y 500 °C.

La destilación se realizó con una unidad de destilación al vacío a escala piloto (Fischer AutoDest 800/860 AC). Las temperaturas de destilación se establecieron por debajo de 170 °C para la gasolina, entre 170 y 380 °C para el diésel y por encima de 380 °C para los residuos. El hidrotratamiento es conocido como el proceso de refinería que puede mejorar la calidad del aceite pirolítico eliminando heteroátomos y saturando alquenos (Bezergianni et al., 2012). Se ha realizado hidrotratamiento para la hidrodesulfuración catalítica (HDS), la eliminación de nitrógeno (HDN) y la hidrodesoxigenación (HDO) del combustible diésel destilado, utilizando las instalaciones disponibles en la Refinería de Petróleo del Norte (NOR) en Gladstone, Australia. NOR es

socio industrial de los autores. Las propiedades del PPO crudo, el PPO destilado y el PPO hidrotratado, obtenidas del trabajo de los autores, se han añadido en la Tabla 10 para fines comparativos.

Tabla 10. Propiedades comparativas del PPO y diésel.

Propiedad	Diésel	PPO térmico	PPO catalítico	PPO destilado	PPO hidrotratado
Valor calorífico (MJ/kg)	46.5	39.5–44.2	40.4–46.2	42.5	46.6
Viscosidad (cSt, 40 °C)	2–4.5	1.9–2.1	2.2–2.6	2.7	2.5
Densidad (g/cm ³ , 15 °C)	0.82–0.85	0.91–0.92	0.81–0.84	0.85	0.82
Punto de inflamación (°C)	≥61.5	38–41	38–62	77	—
Contenido de azufre (ppm)	≤10	0.03	0.03	44.3	2.5
Índice de cetano	≥46	32	51–53	48	58

Nota. Adaptado desde *Plastic the facts 2017 (versión reducida)*, por Plastic Europe Market Research Group, 2017, (<https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2017-Plastics-the-facts.pdf>)

3.5. Características de rendimiento del motor

3.5.1. Eficiencia térmica del freno (BTE)

La eficiencia térmica del freno indica la capacidad de un sistema de combustión para aceptar combustible experimental y evaluar la eficiencia con la que el combustible se convierte en salida mecánica (Ganapathi, 2013). La eficiencia térmica del freno del PPO se documentó como mayor que la del combustible diésel debido a una mayor tasa de liberación de calor que el combustible diésel (Mani et al., 2011 ; Mani et al., 2010 ; Ramesha et al., 2015). Panda et al. encontraron que el BTE para mezclas de PPO y diésel era ligeramente mayor o más cercano al diésel hasta el 80 % de carga debido al mayor poder calorífico de la mezcla de PPO y diésel que el diésel (Panda et al., 2016).

Ramesha et al. han documentado un aumento de aproximadamente el 15,7 % en BTE en comparación con el diésel al utilizar una mezcla de biodiésel y PPO debido a una combustión eficaz al utilizar un contenido rico en oxígeno de éster (AOME) en moléculas

de aceite plástico usado (Ramesha et al., 2015). Los investigadores observaron una mayor eficiencia térmica del freno (Geo et al., 2018 ; Singh et al., 2020) al utilizar mezclas de PPO y diésel. La razón fue una mayor tasa de liberación de calor que provocó una mayor cantidad de calor transportado por los gases de escape y una disminución de la eficiencia.

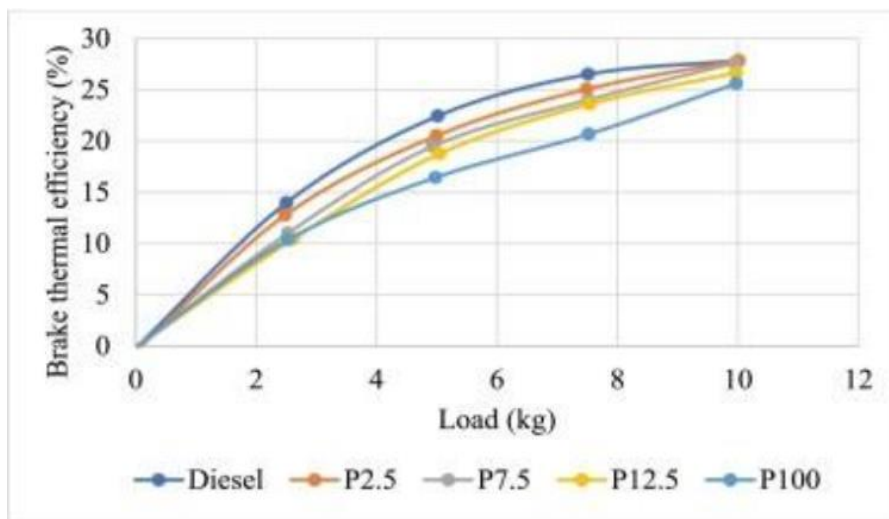
Además, a medida que aumenta el porcentaje de PPO en la mezcla debido al aumento de compuestos oxigenados, se produjo un mayor calor de combustión y, por lo tanto, un BTE más alto.

También se logró un aumento de BTE al mezclar PPO con éter dietílico (DEE) (Ananthakumar et al., 2016) y, a medida que aumenta el porcentaje de DEE, el BTE también aumenta debido a la presencia de oxígeno en DEE, lo que ayuda a lograr una combustión completa . También se encontró que una mezcla de 10 % de DEE en PPO hace que el BTE sea más alto que el diésel a plena carga. El aumento de DEE en el porcentaje de mezcla provoca una reducción de la tensión superficial o la tensión interfacial entre dos o más líquidos inmiscibles que interactúan, lo que provoca una mejor combustión al mejorar la atomización (Devaraj et al., 2015a).

El uso de emulsión de PPO puede aumentar el BTE en comparación con el diésel debido a la ruptura de gotas grandes de aceite en gotas más pequeñas debido a la microexplosión de gotas de agua contenidas en emulsiones de PPO. Por lo tanto, se produjo una aceleración de la evaporación del combustible y la mezcla con el aire, lo que resultó en un proceso de combustión más rápido y un BTE más alto (Kumar y Sankaranarayanan, 2016). Damodharan et al. mencionaron que con la adición de n-butanol en mezclas con PPO y diésel, el BTE aumenta debido a la disminución de la densidad, la atomización mejorada por pulverización y un mayor retraso de ignición, lo que resulta en una mejor mezcla de aire y combustible (Damodharan et al., 2017).

La adición de DEE con PPO mejora la vaporización de PPO al reducir su viscosidad y tiene la capacidad de absorber calor (Ananthakumar et al., 2016). El aumento de DEE (mejorador de encendido) en la mezcla de PPO y DEE también aumenta BTE debido a razones similares que son un mayor contenido de oxígeno, alto número de cetano , baja viscosidad y alta velocidad, lo que resulta en una mayor tasa de combustión (Kaimal y Vijayabalan, 2016a). BTE aumenta con el aumento de la carga debido a una mayor temperatura dentro del cilindro que aumenta la tasa de vaporización del combustible, una menor pérdida de calor y un aumento de potencia con el aumento de la carga (Singh et al., 2020 ; Ananthakumar et al., 2016 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a ; Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016).

Figura 19. Cambios en BTE con cargas variables para PPO, mezclas de PPO y diésel.



Nota. La fotografía muestra los cambios en BTE con cargas variables para PPO, mezclas de PPO y diésel. Tomado de *Variation in BTE with load* [Gráfico], por F. Faisal, et al., 2023, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

La figura 19 representa los cambios en BTE con cargas variables para PPO, mezclas de PPO y diésel (P2,5, P7,5 y P12,5 representan cuando 2,5, 7,5 y 12,5 % de PPO se mezcla con diésel y 2,5 % de DEE respectivamente) y valores mientras se usa diésel comercial para comparación.

En la Fig. 19 se puede observar que el BTE es mayor para el diésel y menor para el PPO. Esto se debe a la mayor viscosidad y menor poder calorífico del PPO, lo que afecta la atomización y vaporización del PPO y sus mezclas, y dificulta la eficiencia de la combustión. Otro hecho destacable es que el BTE aumenta con el aumento del porcentaje de diésel en la mezcla. Con el aumento de la carga, el BTE también aumenta debido a una mayor eficiencia de la combustión. Además, la adición de DEE al PPO y sus mezclas mejora la combustión, ya que el DEE puede absorber calor y acelera la evaporación del PPO, que es altamente viscoso, lo que contribuye a una mejor combustión.

El resultado opuesto fue documentado por algunos investigadores (Khatha et al., 2020 ; Damodharan et al., 2017 ; Devaraj et al., 2015a ; Kaimal y Vijayabalan, 2017) donde el PPO mostró una disminución en BTE que el diésel.

Una mayor tasa de liberación de calor y una mayor temperatura de los gases de escape a plena carga provocan mayores pérdidas de calor y, por lo tanto, menos BTE para el PPO que para el diésel (Walendziewski, 2005). Algunos investigadores (Kaimal y Vijayabalan, 2015 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016b) también han encontrado que el aumento en el porcentaje de PPO en la mezcla de PPO y diésel disminuye aún más la eficiencia térmica del freno y alcanza el valor más bajo mientras se opera el motor con PPO puro.

La razón se mencionó como PPO consiste en cadenas de hidrocarburos más pesadas (C 15 -C 30) y eso da como resultado una mayor viscosidad y densidad en comparación con las mezclas y el combustible diésel y debido a que requiere más energía para romper enlaces aromáticos más altos, lo que reduce la eficiencia térmica (Khatha et al., 2020 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a).

La eficiencia térmica del freno fue menor para la mezcla de PPO-diésel para todas las proporciones de mezcla de PPO debido a la mayor temperatura de combustión del PPO debido a su mayor valor calorífico.

Provoca mayores pérdidas de calor (Kalargaris et al., 2017a ; Mani et al., 2009) y también la presencia de más aromáticos en PPO que requieren más energía para romperse (Kaimal y Vijayabalan, 2015). Kumar et al. (2013) también mencionaron las mismas razones . Los investigadores también obtuvieron una reducción en BTE (Damodharan et al., 2017 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a ; Kaimal y Vijayabalan, 2017) al usar PPO en comparación con combustible diésel. La razón mencionada fue que una mayor viscosidad y una atomización deficiente provocan una preparación deficiente de la mezcla aire-combustible durante la fase de combustión premezclada y contenidos pesados de hidrocarburos en PPO que requieren más energía para romperse y, por lo tanto, menos BTE, lo que concuerda con la indicación de Kaimal y Vijayabalan (2016a).

Además, BTE disminuye con el aumento de los caudales de recirculación de gases de escape debido a la falta de concentración de oxígeno en el proceso de combustión y más aire fue reemplazado por gases de escape (Ladommatos et al., 1996). La reducción en la temperatura de combustión es causada por los altos caudales de EGR y, por lo tanto, la reducción en la eficiencia térmica del freno (Mani et al., 2010).

Tabla 11. Efecto del PPO en el rendimiento del motor diésel.

Combustible	Condición	BSFC	BTE	Tendencia de combustión / emisiones	Referencia
PPO	Carga plena	↑	↓	Mayor CO y HC que diésel	Kaimal y Vijayabalan, 2016a
PPO-Diésel (5-15 %)	Carga plena	≈	≈	Comportamiento cercano al diésel	Kaimal y Vijayabalan, 2016a
PPO-Biodiésel	Carga plena	↑ leve	↓ leve	Mejora frente a PPO puro	Ramesha et al., 2015

PPO con EGR	Carga plena	↑	↓	Reducción de NOx, aumento CO	Mani et al., 2010
PPO hidrocarburos mixtos	Carga plena	↑	↓	Combustión menos eficiente	Janyalrtadun et al., 2017
Diésel	Carga plena	Base	Base	Menores emisiones	Varios autores

Nota. Adaptado desde *Plastic the facts 2017 (versión reducida)*, por Plastic Europe Market Research Group, 2017, (<https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2017-Plastics-the-facts.pdf>)

En esta tabla, PPO = aceite plástico usado; EGR (recirculación de gases de escape). PO25 (25 % PPO + 75 % diésel) (vol%), PO50 (50 % PPO + 50 % diésel) (vol%) y PO75 (75 % PPO + 25 % diésel) (vol%); PJ10 y PJ20 representan el 10 % vol. y el 20 % vol. de aceite de éster metílico de jatropha (JME) mezclado con PPO. PW10, PW20 y PW30 son emulsiones de PPO y agua con porcentajes de agua del 10, 20 y 30, respectivamente, + 2 % de surfactante en las tres emulsiones. PPO 10 = 10 % de aceite plástico usado + 90 % de combustible diésel, PPO 30 = 30 % de aceite plástico usado + 70 % de combustible diésel, PPO 50 = 50 % de aceite plástico usado + 50 % de combustible diésel, PPO 70 = 70 % de aceite plástico usado + 30 % de combustible diésel. 10 % B PPO, 20 % B PPO, 30 % BPPO y 40 % B PPO representan 10, 20, 30 y 40 % de PPO mezclado con diésel, respectivamente.

Con base en los datos presentados en la Tabla 11, se puede concluir que el BSFC puede aumentar y disminuir cuando se usa PPO y sus mezclas en comparación con el combustible diésel.

El consumo específico de combustible para frenos (BSFC) se puede reducir en un 17,88 % usando PPO (Janyalrtadun et al., 2017), mientras que se puede aumentar en un 17,14 % usando mezclas de PPO y éster metílico de jatrofa (JME) en comparación con el uso de combustible diésel (Senhilkumar y Sankaranarayanan, 2016), según la literatura revisada en este documento.

De manera similar, la eficiencia térmica de los frenos (BTE) se puede aumentar en un 15,7 % usando una mezcla de PPO y biodiésel (Ramesha et al., 2015), mientras que se puede producir una reducción del 17,26 % al usar mezclas de PPO y diésel en comparación con el uso de diésel comercial (Kumar et al., 2013). No existen muchos artículos de investigación que documenten la variación de la BSEC al usar PPO y sus mezclas en comparación con el combustible diésel. Muy pocos artículos han analizado este parámetro y, nuevamente, se puede observar en la Tabla 11 que la BSEC puede aumentar o disminuir con el uso de PPO, sin que sea posible determinar una tendencia específica. El mayor aumento de la BSEC documentado fue del 10,08 % con el uso de PPO (Kaimal y Vijayabalan, 2016b), y otra investigación también reportó una reducción del 7,59 % (Janyalrtadun et al., 2017).

Se documentó en la mayoría de los estudios que la temperatura de los gases de escape aumenta al usar PPO y su mezcla en comparación con el combustible diésel comercial.

La mayor cantidad de aumento se documentó como 9,35% al usar PPO diferente al diésel (Mani et al., 2010). El PCP también aumenta principalmente para PPO y su mezcla en comparación con el diésel y la mayor cantidad de aumento documentada fue 17,16% al usar mezclas de PPO y biodiésel (Ramesha et al., 2015).

Excepto un estudio (Kumar y Sankaranarayanan, 2016), todos los demás artículos de investigación mencionados en este documento han documentado un aumento en el retraso de ignición al usar PPO y su mezcla diferente al diésel comercial. Se observó que con el uso de PPO, el retraso de ignición puede aumentar en un 57,14% que el diésel (Kaimal y Vijayabalan, 2017).

Todos los artículos revisados en este documento han documentado un aumento en HRR con el uso de PPO en comparación con el diésel comercial y el mayor aumento mencionado fue del 72,94 % (Kaimal y Vijayabalan, 2015).

3.5.2. Modelado del rendimiento del motor, las emisiones, las características de combustión

La modelización de la dinámica de fluidos computacional (CFD) del rendimiento, las emisiones y la combustión del motor puede ser muy útil para comparar los resultados experimentales y es de bajo coste y requiere menos tiempo que los trabajos experimentales (Chandran et al., 2020). Chandran et al. realizaron una simulación CFD para comparar los parámetros de combustión y emisión de un motor diésel monocilíndrico, de velocidad constante y refrigerado por agua con los resultados experimentales obtenidos (Chandran et al., 2020).

Se utilizó una mezcla de aceite de palma destilado (PPO) y diésel (relación 70:30) en un motor diésel de inyección directa (DI) y los resultados se compararon con los del diésel convencional. El software ANSYS FLUENT se empleó para el modelado CFD de la presión dentro del cilindro, la distribución de temperatura de la mezcla de PPO y diésel, y la tasa de liberación de calor. El software GAMBIT se utilizó para modelar la cámara de combustión, empleando la geometría del pistón y los datos del fabricante del motor.

El tamaño de la malla se fijó en 1,395 y el número de capas de inflado en 3. No se observaron diferencias significativas en los resultados al utilizar 458.754 y 536.796 elementos, y se documentó que un aumento adicional en el tamaño de los elementos solo incrementa el tiempo y el costo. Tras seleccionar las condiciones de contorno y generar la malla, el archivo resultante se importó al solucionador ANSYS FLUENT y, posteriormente, se ejecutó la simulación en segundo plano mediante código C.

Se observó que, durante la simulación, la tasa de liberación de calor de la mezcla fue un 13 % mayor que la del diésel. Las emisiones simuladas de NOx y hollín también

fueron mayores para la mezcla de PPO (8 % y 12 %, respectivamente) que para la simulación con diésel, debido a los mayores valores de carbono y al aumento de la tasa de temperatura de la mezcla de PPO. Se obtuvo una presión en el cilindro mayor en la simulación que en los resultados experimentales, debido a que en la simulación no se consideró la fricción.

Además, se encontró una mayor diferencia entre los valores simulados y experimentales de la presión en el cilindro al usar la mezcla de PPO (6,5 %) en comparación con el diésel (1,8 %).

Las razones del aumento de presión en la simulación podrían ser: la falta de consideración del flujo de gases de escape, los flujos en las ranuras, los puertos de admisión y escape, la diferencia en el retardo de ignición y la falta de consideración de la composición química completa de la mezcla de PPO y diésel. Sin embargo, se observó una mejor distribución de la temperatura para la mezcla de PPO que para el diésel.

Se utilizaron los códigos CFD AVL FIRE para modelar el motor diésel Lister 8.1. Estos códigos incluyeron la formación de la mezcla, la atomización del chorro y su distribución dentro de la cámara de combustión. También se realizaron simulaciones de combustión considerando la interacción entre la pared del chorro y el remolino, así como la configuración del flujo. Los resultados obtenidos en las simulaciones para la tasa de liberación de calor, la presión y las emisiones fueron comparables con los resultados experimentales (Barzegar et al., 2013).

Se utilizó el modelo de ecuación homogénea basado en la ecuación barométrica en el marco de trabajo CFD OpenFOAM para el modelado y la simulación CFD de la cámara de combustión. Los resultados mostraron similitudes entre los valores experimentales y computacionales para el flujo de momento y la masa (Tahmasebi et al., 2015). La turbulencia en la cámara de combustión también se simuló mediante el modelo RANS $k-\epsilon$ SST.

Murad también comparó el rendimiento del motor y los parámetros de emisión obtenidos experimentalmente con PPO y diésel en un motor diésel de cuatro tiempos refrigerado por aire con los resultados numéricos obtenidos mediante el modelado de un motor diésel de prueba de cuatro tiempos en el software ANSYS 19.2 (Murad, 2019). La simulación se realizó siguiendo estos pasos: primero, se creó un proyecto en la interfaz de ANSYS 19.2 para el análisis de motores de combustión interna (tipo Fluent); luego, se creó una geometría con SpaceClaim o DesignModeler, integrados con el software ANSYS, y posteriormente se descompuso la geometría mediante la pestaña de descomposición. A continuación, se generó la malla con el software de mallado integrado y se analizó una sección de 45° de la cámara de combustión.

El siguiente paso fue añadir valores a la pestaña de configuración del motor de combustión interna y, finalmente, configurar el caso en ANSYS Fluent para realizar los cálculos. Los resultados mostraron que la potencia de par simulada para el diésel fue aproximadamente un 40 % menor que los valores experimentales a 1800 y 2000 rpm, pero un 11 % mayor a 2600 rpm. También se observó que, a las máximas revoluciones por

minuto (rpm), la potencia experimental promedio fue un 11 % menor que el valor de potencia simulado para el diésel. La temperatura de escape fue un 8 % mayor en los valores simulados que en los experimentales a todas las velocidades. Se observó una temperatura de escape mayor para el PPO que para el diésel debido a su mayor concentración de oxígeno, lo que conlleva una mayor relación aire-combustible y una combustión más completa, resultando en una mayor temperatura de los gases de escape.

La emisión de NOx fue mayor para el diésel en los resultados simulados que en los experimentales a todas las velocidades del motor y se mantuvo en el rango de 780 ppm a 500 ppm.

Se seleccionó un tamaño de malla de 2,4 mm para la cámara de combustión del motor. El tamaño de la malla se refinó mediante la técnica AMR basada en el gradiente de temperatura, obteniéndose un tamaño mínimo de 0,6 mm (Murad, 2019).

También se probó un motor diésel utilizando PPO derivado de PE residual, comparando los resultados experimentales con los de la simulación bajo condiciones de funcionamiento idénticas (carga completa a 1500 rpm).

La simulación numérica se realizó en un dominio tridimensional dentro del cilindro, utilizando el software CFD Coverage. Se empleó el método RANS y la ecuación de estado de Redlich-Kwong para resolver las ecuaciones clásicas que rigen la masa, el momento, la energía y las especies. Para modelar la inyección de líquido con forma de caudal variable, se utilizó el modelo de inyección de cono de blob .

El modelo KH-RT se empleó para modelar la fragmentación del chorro. Para el modelado de la combustión y la colisión, se utilizaron los modelos shell/CTC y NTC (sin contador de tiempo), respectivamente. El modelo RNG k-epsilon se empleó para modelar la turbulencia. Se obtuvieron resultados similares para la presión dentro del cilindro entre los valores numéricos y experimentales, tanto para el PPO como para el diésel.

Sin embargo, se observó una ligera diferencia en los valores de inicio de ignición entre la presión experimental y la computacional, posiblemente debido a una ligera subestimación de la presión y la temperatura dentro del cilindro en torno al PMS (Punto Muerto Superior).

La predicción errónea de presión y temperatura podría deberse a la formación de la mezcla y al mecanismo de atomización del aerosol, lo que provoca una reducción de la temperatura por la absorción de calor durante la compresión. Tanto para el PPO como para el diésel, la diferencia máxima de presión en el cilindro entre los valores experimentales y numéricos fue de aproximadamente el 1,5 %.

La presión máxima en el cilindro y la temperatura en el cilindro fueron mayores para el diésel que para el PPO, tanto en los valores numéricos como experimentales, debido al mayor retardo de encendido y a la menor tasa de liberación de calor en el diésel. La tasa de liberación de calor y el tiempo de inyección en la fase de combustión premezclada se adelantaron con el PPO en comparación con el diésel debido al menor retardo de encendido (Naima et al., 2018). La producción de CO, NOx, CO₂ y hollín fue

menor para el PPO que para el diésel. Los resultados de la simulación numérica sugieren un adelanto en el tiempo de inyección para el PPO, lo que mejora el rendimiento del motor.

Barzegar et al. (2013) también compararon los resultados obtenidos para el proceso de combustión y las emisiones en un motor diésel de inyección indirecta (Lister 8.1) que utilizaba combustible diésel.

Se empleó un código de dinámica de fluidos computarizado en AVL Fire para el análisis detallado de la atomización del combustible, la formación y la distribución de la mezcla. El modelado del proceso de combustión se realizó tanto a carga parcial como a plena carga, y se utilizó el modelo de turbulencia RNG k- ϵ para calcular la turbulencia dentro de la cámara de combustión.

El modelo verificó que, a plena carga, se quemaba la misma cantidad de combustible en la precámara y en la cámara de combustión principal, mientras que a carga parcial, la mayor parte del combustible se quemaba en la cámara principal.

La formación de una zona de estancamiento impide la rápida evaporación del combustible pulverizado, lo que provoca que este se adhiera a las paredes de la precámara y, por lo tanto, aumente la fracción de masa de hollín.

La diferencia en la presión máxima del cilindro entre el valor experimental y el simulado fue inferior al 0,2 %, y la temperatura en el cilindro aumenta con la carga. Se observaron diferencias muy pequeñas entre los valores experimentales y simulados para el inicio de la combustión y los retardos de ignición. A plena carga, las emisiones simuladas de NO_x y hollín fueron ligeramente superiores a las experimentales. Los resultados de la simulación para la presión media en el cilindro, las emisiones de escape, el rendimiento y la tasa de liberación de calor se encontraron en buena concordancia con los datos experimentales y, por lo tanto, se realizó la verificación del modelo (Barzegar et al., 2013).

El análisis de varianza (ANOVA) es una prueba estadística que permite determinar diferencias estadísticamente significativas entre dos o más grupos categóricos. El ANOVA se realiza calculando las diferencias de medias mediante la varianza.

Existe poca investigación sobre el uso del ANOVA para determinar el efecto del uso de PPO en el rendimiento y los parámetros de combustión de un motor diésel. Sin embargo, en esta sección se analizan algunos artículos que sí han realizado dichos estudios.

Raju et al. llevaron a cabo un análisis ANOVA para un motor de combustible dual biogás-diésel (Raju et al., 2021). El objetivo fue identificar los parámetros con mayor influencia en los principales parámetros de salida del motor, como la eficiencia térmica del freno (BTE) y ciertos parámetros de emisión como CO, humo y NO_x. Tras el análisis, concluyeron que la BTE y el NO_x se ven altamente afectados por la variación de la carga del motor.

Otro estudio realizó un análisis ANOVA para mezclas de diésel y biodiésel (éster metílico de aceite de jatrofa y éster metílico de aceite de ricino) (Vashist y Ahmad, 2014). Se ha observado que, para ambas mezclas de combustible, el tipo de combustible no afecta significativamente el consumo, pero sí la eficiencia térmica. Además, se ha documentado que la variación de la carga impacta considerablemente tanto el consumo como la eficiencia térmica.

Das et al. realizaron un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de diferentes parámetros en el rendimiento y las emisiones del motor (Das et al., 2021). El análisis reveló que los parámetros con mayor efecto en la eficiencia térmica del freno (BTE) y las emisiones de NOx son la relación de compresión, la carga y el porcentaje de aceite de palma (PPO) mezclado con diésel. La BTE aumentó al mezclar un 20 % en peso de PPO con diésel, pero disminuyó al aumentar el porcentaje de PPO.

Las emisiones de NOx aumentaron con una mayor relación de compresión debido al incremento de la temperatura de la llama en el cilindro. Otro estudio realizó pruebas similares mediante un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de la carga, la relación de compresión y la proporción de la mezcla de combustible (PPO y diésel) en la BTE. Se encontró que la BTE se ve altamente afectada por la carga del motor y mínimamente afectada por la relación de compresión. Se encontró que la condición de funcionamiento óptima para el motor era cuando este funcionaba a plena carga con un 20 % de PPO mezclado con diésel y una relación de compresión de 18 (Das et al., 2020).

3.5.3 Características de las emisiones del motor

En esta sección se analizan algunos parámetros de emisión utilizando PPO, mezclas de PPO y diésel y PPO con aditivos oxigenados.

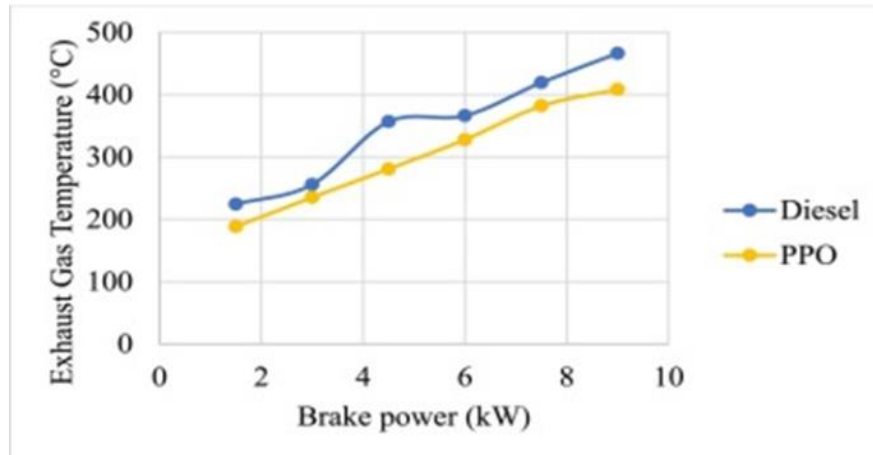
a) El monóxido de carbono (CO)

El CO se genera como resultado de la falta de oxígeno, la escasa entrada de aire , la preparación inadecuada de la mezcla y la combustión incompleta de combustibles hidrocarburos (Janyalertadun et al., 2017 ; Mani et al., 2009). El CO es tóxico y un producto intermedio de la combustión de combustibles hidrocarburos, por lo que su emisión debe controlarse (Mani et al., 2011).

La emisión de CO puede reducirse aumentando la temperatura (1200 °C para la oxidación a CO₂) (Ananthakumar et al., 2016) de la cámara de combustión, ya que esto favorece una combustión más completa (Damodharan et al., 2017 ; Ramesha et al., 2015). Se ha documentado una mayor emisión de CO para el PPO en comparación con el diésel (Panda et al., 2016 ; Ananthakumar et al., 2016 ; Devaraj et al., 2015a ; Kaimal y Vijayabalan, 2016b). J. Devaraj et al. mencionaron que la mayor emisión de CO en el aceite de palma se debe a la baja temperatura del cilindro (Devaraj et al., 2015a). Singh et al. (2020) también documentaron una mayor emisión de CO en comparación con el diésel al usar mezclas de aceite de palma y diésel.

Por otro lado, algunos investigadores observaron menores emisiones de CO para el aceite de plástico reciclado (PPO) en comparación con el diésel (Janyalertadun et al., 2017 ; Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016).

Figura 20. Variación de la temperatura de los gases de escape tanto para el diésel como para el PPO con diferentes potencias de frenado.



Nota. El gráfico muestra la variación de la temperatura de los gases de escape tanto para el diésel como para el PPO con diferentes potencias de frenado. Tomado de *Exhaust gas temperatura vs. Brake power* [Gráfico], por Janyalertadun et al., 2017, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

La figura 20 muestra la variación de la temperatura de los gases de escape tanto para el diésel como para el PPO con diferentes potencias de frenado.

De la Figura 20 se puede observar que la temperatura de los gases de escape para el combustible diésel es más alta que la del PPO con cambios en la potencia de frenado. Por lo tanto, se puede decir que la quema de combustible dentro del cilindro del motor fue más eficiente para el PPO en comparación con el diésel, probablemente debido a una mejor atomización que conduce a una mejor combustión. Si bien el PPO se mezcla con el combustible diésel en diferentes proporciones de mezcla, las temperaturas de los gases de escape generalmente fueron más altas en comparación con las del diésel debido a un mayor retraso de encendido, una combustión más rápida de la mezcla y una menor eficiencia térmica del motor en comparación con el diésel (Panda et al., 2016 ; Singh et al., 2020 ; Kumar et al., 2013 ; Ramesha et al., 2012).

Se convierte menos energía en trabajo cuando la eficiencia del motor es baja. Ramesha et al. describieron la razón como una mayor tasa de liberación de calor y una baja volatilidad de la mezcla de PPO y biodiésel que causa una combustión tardía y un aumento de la temperatura (Ramesha et al., 2012).

Kumar et al. mencionaron otro motivo para la mayor temperatura de los gases de escape del PPO: el alto contenido de oxígeno del aceite plástico usado y sus componentes con un punto de ebullición más alto que el diésel (Kumar et al., 2013).

La temperatura de los gases de escape disminuyó con el aumento del caudal de EGR (recirculación de gases de escape) porque con el aumento de EGR, la temperatura máxima de combustión disminuye en el cilindro del motor (Mani et al., 2010). También se documentó una temperatura reducida de los gases de escape al usar mezclas de PPO y JME (éster metílico de *Jatropha*) en comparación con el diésel debido a la presencia de moléculas de agua en el JME y una menor tasa de liberación de calor (Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016).

También se registró una disminución en la temperatura de los gases de escape (Kumar y Sankaranarayanan, 2016) al usar emulsiones de PPO debido a la presencia de moléculas de agua en el PPO y una menor tasa de liberación de calor (Kim et al., 2002). Janyalertadun et al. también encontraron que la temperatura de los gases de escape del PPO era menor que la del diésel, lo que indica una mejor combustión y una quema eficiente del combustible causada por una mejor atomización (Janyalertadun et al., 2017).

Las emisiones de CO disminuyen al aumentar la relación de compresión debido al incremento de la temperatura de combustión (Ananthakumar et al., 2016). Además, Güngör et al. (2015) encontraron una reducción del 20 % en las emisiones de CO al utilizar una mezcla de PPO y diésel (5 % de PPO). Sin embargo, otros investigadores hallaron mayores emisiones de CO para la mezcla de PPO y diésel en comparación con el diésel solo, y mencionaron como razones la mala preparación de la mezcla, la presencia de zonas ricas en este recurso y la ausencia de compuestos oxigenados en el aceite de plástico reciclado (Mani et al., 2009).

Además, se ha documentado que, al aumentar la cantidad de PPO en la mezcla de PPO y diésel, disminuye la emisión de CO debido a su mayor volatilidad y menor viscosidad, lo que incrementa la atomización y vaporización del combustible y, por consiguiente, la combustión más completa de la mezcla aire-combustible, resultando en una menor producción de CO (Kaimal y Vijayabalan, 2016b ; Ruban et al., 2017).

Ramesha et al. lograron una menor emisión de CO al utilizar biodiésel y mezclas de biodiésel y PPO, debido al mayor contenido de oxígeno en el biodiésel y el PPO en comparación con el diésel (Ramesha et al., 2015). Investigadores (Ananthakumar et al., 2016 ; Devaraj et al., 2015a) también han observado una reducción de CO al aumentar la proporción de DEE en la mezcla de PPO-DEE a plena carga, debido a una mejor atomización del combustible y una mayor disponibilidad de oxígeno, lo que resulta en una combustión más eficiente.

Senthilkumar y Sankaranarayanan documentaron una disminución en las emisiones de CO al utilizar una mezcla de PPO y JME en comparación con diésel y PPO solo, debido a una mejor combustión como resultado del exceso de oxígeno del JME (Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016). Al utilizar DEE con PPO en mezclas, las emisiones de CO disminuyen al aumentar el porcentaje de DEE en la mezcla, debido a su

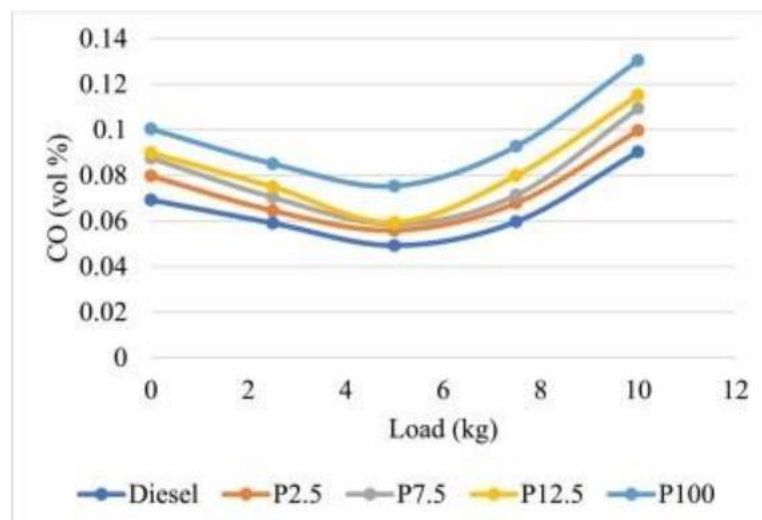
mayor volatilidad y mayor contenido de oxígeno, lo que contribuye a una combustión más completa (Kaimal y Vijayabalan, 2016a). Las emisiones de CO pueden reducirse mediante el uso de un sistema EGR; se observó que, al aumentar el porcentaje de EGR, las emisiones de CO se reducen aún más debido a la sustitución de parte del oxígeno de la cámara de combustión por los gases de escape recirculados, lo que provoca una combustión incompleta (Mani et al., 2010).

Podemos describir la emisión de CO al utilizar cuatro mezclas de PPO (P2.5, P7.5 y P12.5, que contienen 2.5, 7.5 y 12.5 % vol. de PPO y diésel, respectivamente, más 2.5 % vol. de DEE en todas las mezclas) y diésel, con cargas que variaron de 0 a 12 kg. En este estudio también se muestra la emisión de CO del diésel. Se observó la menor emisión de CO con diésel en todas las condiciones de carga y la mayor con PPO puro.

Asimismo, se observa que a medida que aumenta la cantidad de PPO en la mezcla de PPO y diésel, también aumenta la emisión de CO.

Con el aumento de la carga, la emisión de CO comenzó a disminuir y, tras alcanzar un valor determinado, volvió a aumentar en todas las muestras analizadas.

Figura 21. Emisión de CO con carga variable.



Nota. El gráfico muestra Emisión de CO con carga variable. Tomado de *CO emisión with varying load* [Gráfico], por Ananthakumar et al., 2016, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

Geo et al. (2018) observaron mayores emisiones de CO que con diésel al usar una mezcla de aceite de palma aceitera (PPO) y diésel, debido a una combustión incompleta causada por zonas con exceso de combustible y una atomización deficiente (Geo et al., 2018). El aumento de CO en el PPO con respecto al diésel se atribuye a una combustión incompleta resultante de la falta de compuestos oxigenados en el PPO (Kumar et al., 2013).

Daniel et al, y sus colegas. observaron un rápido aumento de las emisiones de CO en mezclas de PPO y diésel al incrementar el porcentaje de recirculación de gases de escape (EGR), pero este aumento se redujo ligeramente con la adición de ésteres (Daniel et al., 2017).

Damodharan et al. documentaron que, al aumentar la carga, las emisiones de CO disminuyen al usar una mezcla de PPO, diésel y n-butanol (Damodharan et al., 2017). Mani et al. también documentaron una disminución de las emisiones de CO a cargas más altas para el PPO y sus mezclas en comparación con el diésel, debido a la menor demora de ignición a cargas más altas, lo que resulta en una menor cantidad de combustible - durante el período de demora y, por lo tanto, una menor producción de CO (Mani et al., 2011). Sin embargo, Ramesha et al. (2015) encontraron que las emisiones de CO eran mayores a plena carga y menores a cargas parciales.

Al observar mayores emisiones de CO al aumentar la carga al usar mezclas de PPO y diésel, y mencionaron como razón un mayor consumo de combustible (Panda et al., 2016).

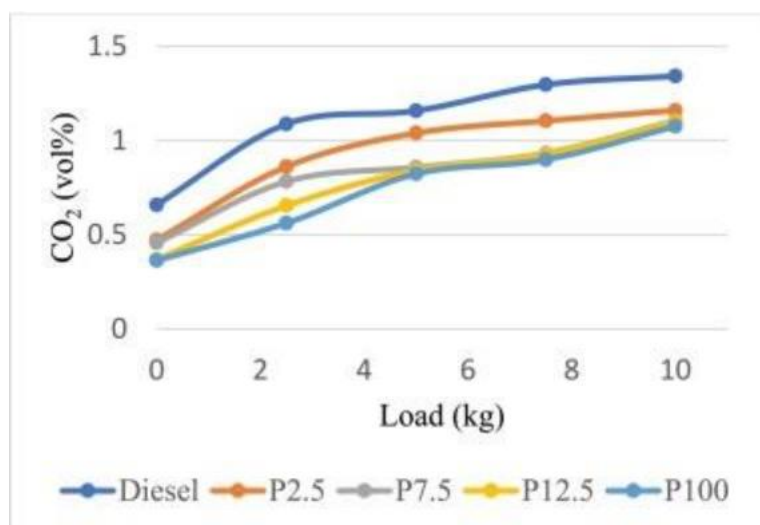
Se observó un aumento en las emisiones de CO con el aumento de la carga debido al mayor consumo de combustible (Daniel et al., 2017 ; Kumar et al., 2013). Por el contrario, Kalargaris et al. Se encontró una reducción en la emisión de CO con el aumento de la carga (Kalargaris et al., 2017a).

b) Dióxido de Carbono CO₂

El CO₂ es el segundo gas de escape más abundante después del nitrógeno y contribuye con el 12 % de los gases de escape (Ananthakumar et al., 2016). La emisión de CO₂ en el PPO es menor que en el diésel (Janyalertadun et al., 2017 ; Mani et al., 2011 ; Geo et al., 2018 ; Ananthakumar et al., 2016). El CO₂ una mayor capacidad calorífica y reduce la temperatura máxima de combustión al absorber calor (Kwon et al., 2001). La menor emisión de CO₂ en el PPO en comparación con el diésel se debe a la inestabilidad de la combustión y la menor cantidad de oxígeno (Janyalertadun et al., 2017 ; Mani et al., 2011 ; Mani et al., 2010), así como a una mayor viscosidad que provoca una combustión incompleta (Ananthakumar et al., 2016).

Cuando aumenta la cantidad de PPO en la mezcla PPO-diésel, la producción de CO_2 , posiblemente debido a la oxidación incompleta del CO causada por la combustión retardada del combustible (Kalargaris et al., 2017a ; Mani et al., 2011 ; Kumar et al., 2013). La cantidad de CO_2 en los gases de escape puede reducirse mediante el uso de un sistema EGR en comparación con el uso exclusivo de PPO sin EGR, debido a la inestabilidad de la combustión y la menor cantidad de oxígeno en el cilindro del motor (Mani et al., 2010). Geo et al. (2018) reportaron una disminución en las emisiones de CO_2 al usar una mezcla de PPO y diésel en comparación con el uso de diésel comercial puro, debido a una mejor combustión con este último (Geo et al., 2018).

Figura 22. Cambios en la emisión de CO_2 al usar PPO y su mezcla con diésel y DEE.



Nota. El gráfico muestra cambios en la emisión de CO_2 al usar PPO y su mezcla con diésel y DDE. Tomado de *Changes in emisión of CO_2 while using PPO and its blend with diesel and DEE* [Gráfico], por Ananthakumar et al., 2016, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

La figura 22 muestra emisión de CO_2 es menor para el aceite pirolítico plástico (PPO) y su mezcla con diésel y diésel puro (DEE) en comparación con el diésel puro.

El PPO tiene una mayor viscosidad, lo que afecta la combustión y provoca una combustión incompleta, aumentando así la emisión de CO y disminuyendo la de CO_2 . La emisión de CO_2 disminuye PPO en la mezcla y alcanza su valor mínimo cuando se utiliza PPO al 100 %.

Sin embargo, algunos investigadores (Kalargaris et al., 2017a ; Devaraj et al., 2015a ; Güngör et al., 2015 ; Ruban et al., 2017) reportan una mayor producción de CO_2 a partir del PPO que del diésel puro. Singh et al. también observaron una mayor emisión de CO_2 en mezclas de PPO y diésel que al usar diésel puro, debido a una mejor combustión en las mezclas gracias a una mayor disponibilidad de oxígeno (Singh et al., 2020).

Al utilizar una mezcla de DEE y PPO, se registró una producción de CO_2 mayor que con diésel. Sin embargo, se observó que aumentar la cantidad de DEE después de cierto

nivel no afecta la formación de CO₂ debido al exceso de oxígeno y a la baja relación carbono/hidrógeno (Devaraj et al., 2015a).

c) Humo

Las partículas sólidas de hollín suspendidas en los gases de escape se conocen como humo (Mani et al., 2011). La emisión de humo es mayor en el caso del PPO (Panda et al., 2016 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a) y en las mezclas de PPO y diésel debido a la falta de homogeneidad en la carga dentro del cilindro del motor, la menor duración de la combustión y la rápida propagación de la llama (Sayin et al., 2008). Ramesha et al. también reportaron una mayor opacidad del humo en el biodiésel y en las mezclas de biodiésel y PPO, y la atribuyeron a una mayor viscosidad que provoca la mezcla de las gotas de combustible con el aire y una baja volatilidad (Ramesha et al., 2015). Balusamy y Marappan mencionan otra razón: las moléculas más pesadas del PPO (Balusamy y Marappan, 2007).

A medida que aumenta la cantidad de aceite de plástico reciclado (PPO) en la mezcla de PPO y diésel, la emisión de humo también aumenta debido a la mayor viscosidad y la baja volatilidad del PPO, lo que afecta las propiedades de la pulverización y la formación de la mezcla, reduciendo así la eficiencia de la combustión (Ananthakumar et al., 2016 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016b). Kaimal y Vijayabalan (2016a) mencionaron razones similares para el aumento de humo en el PPO en comparación con el diésel . El mayor contenido aromático del PPO también puede incrementar la emisión de humo en comparación con su uso en mezclas con diésel (Kidoguchi et al., 2000 ; Murugan et al., 2008). Khatha et al. mencionaron que la mayor opacidad del humo del aceite de plástico reciclado se debe a la premezcla o la carga homogénea dentro de la cámara de combustión, causada por la evaporación temprana del combustible (Khatha et al., 2020).

Mani et al. documentaron una menor emisión de humo que el diésel debido a la presencia de oxígeno en el aceite de palma (PPO), lo que produce una combustión mejor y más completa (Mani et al., 2009). Sin embargo, Daniel et al. (2017) observaron que la opacidad del humo disminuye al añadir ésteres a las mezclas de PPO y diésel.

Damodharan et al. (2017) también mencionaron una mayor opacidad del humo en el PPO en comparación con el diésel, pero tras añadir n-butanol a la mezcla, la opacidad se reduce debido a una mayor disponibilidad de oxígeno. J. Devaraj et al. también documentaron una reducción en la emisión de humo al añadir ésteres de diésel (DEE) al PPO en comparación con el diésel, debido a que la mezcla resulta más pobre con la adición de DEE, ya que este último tiene un mayor contenido de oxígeno (Devaraj et al., 2015a).

Otros investigadores también lograron reducir la opacidad del humo (Khatha et al., 2020 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a ; Mani et al., 2009). Kaimal y Vijayabalan (2016) observaron que, al mezclar DEE con PPO , la emisión de humo disminuía significativamente en comparación con el PPO puro, a medida que aumentaba la proporción de DEE en la mezcla.

Esto se debe a que el mayor contenido de oxígeno en el DEE incrementa la velocidad de combustión durante la combustión por difusión, lo que reduce la emisión de

humos. Se registró una menor opacidad del humo que con el PPO puro al utilizar una mezcla de PPO y JME, y a medida que aumentaba el porcentaje de JME en la mezcla, la emisión de humo disminuía aún más debido al mayor contenido de oxígeno del JME, que favorece la formación de humo durante la fase de combustión por difusión (Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016).

Kumar y Sankaranarayanan también observaron una menor emisión de humo al usar emulsiones de PPO en comparación con el diésel en condiciones de carga elevada, debido a una mejor evaporación del combustible y una mezcla aire-combustible más homogénea gracias a la microexplosión del combustible en emulsión (Kumar y Sankaranarayanan, 2016).

Geo et al. también observaron una menor emisión de humo al usar mezclas de PPO-diésel en comparación con el diésel, debido a la evaporación temprana del combustible, lo que resulta en una carga premezclada u homogénea dentro del cilindro, una mayor liberación de calor y una combustión casi completa (Geo et al., 2018).

El uso de la recirculación de gases de escape (EGR) incrementa las emisiones de humo, según lo reportado por Daniel et al. (2017) y Mani et al. (2010), debido a que los gases de escape reemplazan parcialmente el oxígeno en el cilindro del motor, lo que provoca inestabilidad en la combustión (Wang et al., 2000).

La opacidad del humo aumenta con la carga (Daniel et al., 2017 ; Ananthakumar et al. , 2016 ; Devaraj et al., 2015a ; Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016), ya que a mayor carga se inyecta más combustible, lo que reduce la relación aire-combustible. Otras razones para el aumento de las emisiones de humo (blanco visible) a mayor carga son la falta de aire suficiente y la combustión anormal (Mani et al., 2011 ; Panda et al., 2016 ; Mani et al., 2009 ; Heywood, 2018).

d) Hidrocarburo no quemado

Las emisiones de hidrocarburos no quemados son el resultado de la combustión incompleta de la mezcla aire-combustible y constituyen un parámetro importante para medir la eficiencia de la combustión. Los compuestos orgánicos en estado gaseoso se conocen como hidrocarburos (Mani et al., 2010). La principal causa de la presencia de hidrocarburos no quemados en los gases de escape es el combustible atrapado en grietas durante la combustión (Kaimal y Vijayabalan, 2016b). Kalargaris et al. (2017a), Geo et al. (2018) y Singh et al. (2020) también reportaron mayores emisiones de hidrocarburos no quemados en mezclas de aceite de palma aceitero (PPO) y diésel en comparación con el diésel puro, debido a la combustión incompleta, los hidrocarburos sin reaccionar y el mayor contenido aromático del PPO (Murugan et al., 2008).

Además, las mezclas de PPO tienen mayor probabilidad de impactar la pared del cilindro durante la pulverización debido a su mayor densidad, baja viscosidad y menor índice de cetano, lo que provoca un mayor retardo de ignición.

Otra razón para la mayor concentración de hidrocarburos sin quemar en el aceite de palma aceitera (PPO) y sus mezclas con diésel, en comparación con el diésel puro, se debe a los hidrocarburos insaturados presentes en el PPO, que no se descomponen durante la combustión (Kidoguchi et al., 2000), una mayor tasa de fumigación (Devaraj et al., 2015a), fugas de combustible a través de la boquilla del inyector debido a la baja viscosidad de la mezcla PPO-diésel (Qi et al., 2011) y a que el chorro de combustible no penetra más profundamente en la cámara de combustión (Panda et al., 2016). Otra razón mencionada es la presencia de hidrocarburos gaseosos sin quemar en las paredes del cilindro y en los espacios de contacto (Kaimal y Vijayabalan, 2016b; Muralidharan y Vasudevan, 2011; Nagarajan et al., 2002).

Además, la mezcla no homogénea de PPO-diésel reacciona con el aire durante la inyección, creando zonas en la cámara de combustión con mezclas demasiado pobres y otras demasiado ricas para una combustión adecuada (Celikten, 2003). Panda et al. mencionaron que, al usar mezclas de PPO-diésel, a medida que aumenta el porcentaje de PPO en la mezcla, la emisión de hidrocarburos no quemados (HNC) aumenta aún más (Panda et al., 2016). También se observó un aumento en la emisión de HNC al usar PPO y emulsiones de PPO en comparación con el diésel, debido a la presencia de agua y la menor temperatura de la llama (Kumar y Sankaranarayanan, 2016).

Damodharan et al. también reportaron un fenómeno similar de aumento en la emisión de HNC para la mezcla de PPO y PPO-diésel-n-butanol en comparación con el diésel de ultra bajo azufre (ULSD), debido a los hidrocarburos insaturados que contienen, los cuales son resistentes durante la combustión (Damodharan et al., 2017).

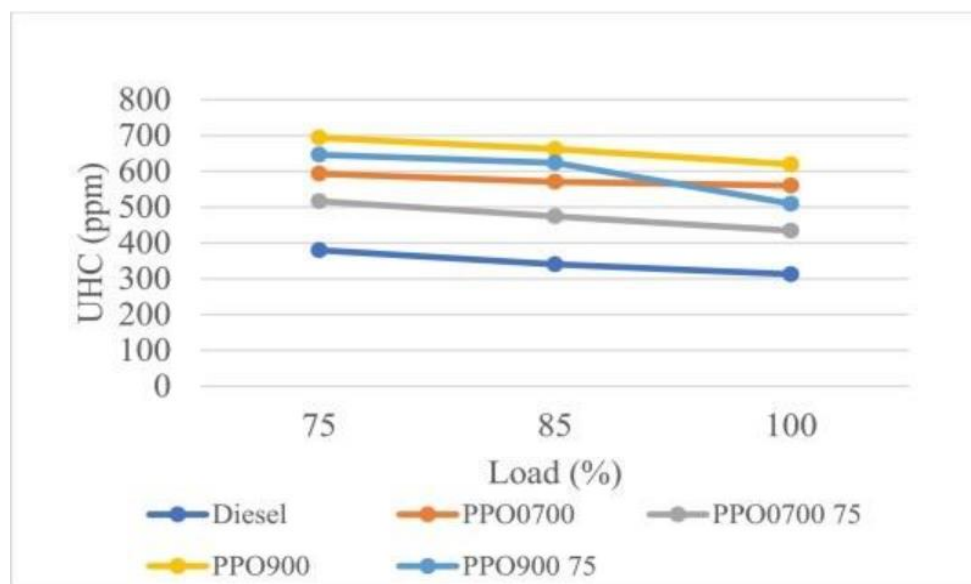
También se observó que, al aumentar el porcentaje de n-butanol en la mezcla, la emisión de hidrocarburos no quemados (HNC) aumenta aún más debido a las zonas de extinción de la llama creadas por el alto calor de evaporación del n-butanol, lo que resulta en una mayor emisión de HNC (Doğan, 2011).

De manera similar, al usar diésel de escape (DEE) con aceite de palma (PPO), se observó que la emisión de HNC aumenta a medida que aumenta el porcentaje de DEE en la mezcla (Devaraj et al., 2015a).

La razón de este fenómeno es que el DEE disminuye la temperatura de combustión debido a su baja temperatura de carga y, durante la inyección de combustible, parte del DEE se mezcla con el aire y se acumula en el espacio entre el pistón y el cilindro, donde no llega la llama de combustión, lo que resulta en una mayor emisión de HNC (Purushothaman y Nagarajan, 2009). Se documentó un aumento en la emisión de HNC para las mezclas de PPO con DEE en comparación con PPO y diésel, y este aumento se produce con el incremento de la proporción de DEE en la mezcla debido a la menor densidad que se reduce con la adición de DEE (Kaimal y Vijayabalan, 2016a).

Otra razón para esto es el elevado calor latente de vaporización del DEE, que provoca la extinción de la llama y la formación de una región de llama pobre con un aumento del DEE (Rakopoulos et al., 2013).

Figura 23. Emisión de hidrocarburos no quemados frente a la carga.



Nota. El gráfico muestra Emisión de hidrocarburos no quemados frente a la carga. Tomado de *Unburnt hydrocarbon emission vs. load* [Gráfico], Kalargaris et al., 2017, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

En la figura 23, se obtuvo Se obtuvo PPO a dos temperaturas diferentes: 700 °C y 900 °C (PPO700 y PPO900, respectivamente). También se analizaron sus mezclas con un 25 % de diésel comercial (PPO700 75 y PPO900 75). Los resultados muestran que la emisión de hidrocarburos no quemados (HNC) es mayor para el PPO y sus mezclas (tanto para el PPO obtenido a 700 °C como a 900 °C) con diésel, en comparación con el diésel puro. Esto podría deberse a un mayor retardo en la ignición y a un mayor contenido de aromáticos, lo que reduce la duración de la combustión. Sin embargo, se observó una menor emisión de HNC para el PPO y sus mezclas producidas a 700 °C.

Asimismo, en la figura 21 se aprecia que la emisión de hidrocarburos no quemados es menor para las mezclas de PPO y diésel que para el PPO puro. Este fenómeno se explica porque el diésel tiene un menor contenido de aromáticos, por lo que la mezcla de diésel con PPO mejora el rendimiento de la combustión.

Senthilkumar y Sankaranarayanan (2016) también registraron un aumento en UHC al usar PPO y también mezclas de PPO y JME en comparación con diésel. Daniel et al. mencionaron que a medida que aumenta la cantidad de EGR (recirculación de gases de escape), la emisión de UHC también aumenta para la mezcla de PPO y diésel, que aumenta aún más con el aumento del porcentaje de PPO en la mezcla (Daniel et al., 2017). El aumento en la emisión de hidrocarburos no quemados con el aumento de la carga fue informado por (Daniel et al., 2017 ; Panda et al., 2016 ; Geo et al., 2018 ; Ananthakumar et al., 2016) y la razón se describió como una mayor cantidad de disponibilidad de

combustible a cargas más altas (Panda et al., 2016 ; Mani et al., 2009). Por el contrario, (Janyalertadun et al., 2017 ; Ananthakumar et al., 2016 ; Ramesha et al., 2012 ; Ruban et al., 2017) informaron una disminución en la emisión de UHC. Daniel et al. (2017) mencionaron que con el uso de éster en la mezcla de PPO-diésel, se puede reducir la emisión de UHC.

La reducción de las emisiones de hidrocarburos no quemados (HNC) en el caso del PPO en comparación con el diésel se debió a la presencia de hidrocarburos sin quemar en las paredes y grietas del cilindro, debido a que la llama no se propagó profundamente en la cámara de combustión (Ananthakumar et al., 2016).

Ramesha et al. observaron que, al utilizar PPO y mezclas de biodiésel y PPO, el oxígeno presente en el biodiésel y el PPO contribuye a una combustión más completa y, por lo tanto, a una menor emisión de HNC que con el diésel (Ramesha et al., 2012).

Kaimal y Vijayabalan informaron que la menor emisión de hidrocarburos no quemados en mezclas de PPO y diésel, en comparación con el uso de PPO puro, se debe a que la alta densidad, la baja volatilidad, el alto contenido aromático y la alta viscosidad del PPO afectan la preparación de la mezcla aire-combustible y disminuyen la eficiencia de la combustión (Kaimal y Vijayabalan, 2016b).

Esto puede provocar una combustión incompleta y, debido a las zonas ricas en combustible, algunas gotas de combustible no reaccionan por falta de oxígeno (Ren et al., 2006 ; Walendziewski, 2002).

Al aumentar la carga, disminuye el retardo de ignición y, por lo tanto, se reduce la emisión de hidrocarburos no quemados para todas las mezclas de combustible. Además, Kalargaris et al. detectaron una reducción en la emisión de hidrocarburos no quemados con el aumento de la carga (Kalargaris et al., 2017a).

e) Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y metales pesados.

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son contaminantes nocivos que llegan al medio ambiente de diversas maneras, por ejemplo, a través de combustibles derivados del petróleo sin quemar u otros materiales orgánicos durante la combustión, o directamente mediante derrames de petróleo (Lima et al., 2005). Los HAP se forman mediante la unión de anillos aromáticos simples, sin heteroátomos ni sustituyentes . Debido a su naturaleza lipofílica, los HAP pueden acumularse en el tejido adiposo y algunos son carcinógenos, teratogénicos y mutagénicos (Conesa et al., 2021). Más de 100 sustancias químicas diferentes constituyen los HAP, y 17 de ellas presentan un mayor potencial para causar problemas de salud en los seres humanos.

El aceite pirolítico procedente de la pirólisis de residuos plásticos contiene HAP y los libera al medio ambiente al utilizarse en motores. La presencia de HAP en plásticos reciclados también está documentada por Conesa et al. (2021) . Los metales pesados se

emiten principalmente como parte del humo. Sin embargo, la literatura existente carece de suficiente información sobre estudios de emisiones de motores que utilizan aceite pirolítico plástico, donde las emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados se han discutido por separado.

Yilmaz et al. estudiaron el efecto de la mezcla de alcoholes de cadena lineal y alto contenido de carbono con diésel y su influencia en las emisiones de HAP de motores diésel (operados a carga parcial y velocidad constante) (Yilmaz et al., 2022).

Utilizaron tres tipos diferentes de alcoholes: n-propanol, n-butanol y n-pentanol, mezclándolos con diésel en proporciones del 5 %, 20 % y 35 %. Observaron una reducción significativa en la emisión de HAP al utilizar las mezclas de alcohol y diésel en comparación con el uso de diésel puro. Se documentó que la reducción de HAP fue mayor con proporciones de mezcla más altas.

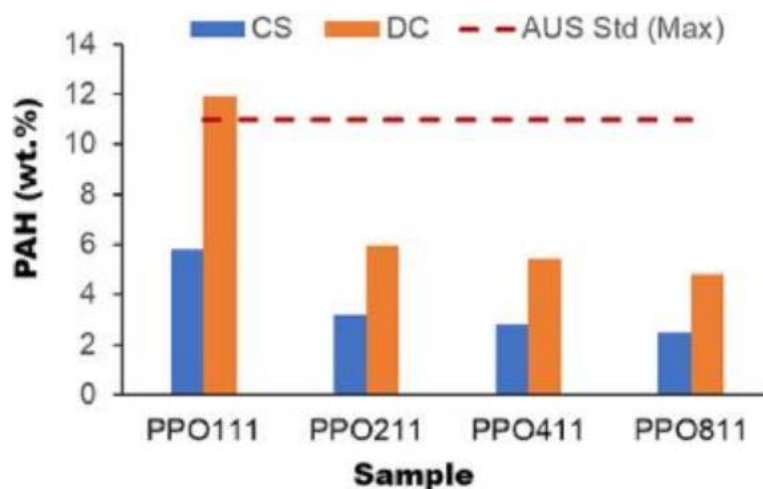
La mayor reducción de HAP se obtuvo al mezclar diésel con un 35 % de n-butanol. Otro trabajo de investigación ha estudiado la emisión de PAH de un motor diésel utilizando combustible diésel, biodiésel y sus mezclas, y documentó una reducción de la emisión de PAH del 19,4 % y del 13,1 % al utilizar biodiésel puro y una mezcla de 20 % de biodiésel y diésel, respectivamente, en comparación con el uso de combustible diésel al 100 % (He et al., 2010).

Los autores de este estudio han estado trabajando recientemente en la determinación del contenido de HAP en diferentes muestras de PPO. Algunos de los resultados se presentan en la figura 13. En este estudio, se analizaron cuatro muestras de PPO crudo y sus correspondientes cuatro fracciones de diésel destilado. El PPO se obtuvo mediante la pirólisis de residuos plásticos mixtos de polietileno de alta densidad (HDPE), poliestireno (PS) y polipropileno (PP) en diferentes proporciones.

En la figura, el primer número indica la presencia de HDPE, mientras que el segundo y el tercero indican la presencia de PS y PP, respectivamente (en % en peso).

Por ejemplo, la muestra PPO111 contiene cantidades iguales de HDPE, PS y PP en peso en la materia prima. En las muestras PPO211, PPO411 y PPO811, se incrementó la cantidad de HDPE manteniendo el volumen total constante.

*Figura 24. Contenido de PAH en PPO crudo (CS) y fracción de diésel destilado (DC).
Plastic the facts 2017. Plastic Europe Market Research Group.*



Nota. El gráfico muestra contenido de PAH en PPO crudo (CS) y fracción de diésel destilado (DC). Tomado de *Crude PPO (CS) and distilled diesel fraction's (DC) PAH content* [Gráfico], F. Faisal et al., 2023, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

La concentración total de HAP en el PPO crudo y en la fracción de diésel destilado correspondiente (DC) (figura 22) La DC obtenida de la muestra PPO111 presenta la mayor concentración de HAP. Se observó que, a medida que aumenta el porcentaje de HDPE en la materia prima plástica, la cantidad de HAP disminuye tanto en el PPO crudo como en la DC.

En la figura 22 también se aprecia que, para todas las muestras, la cantidad de HAP aumentó tras la destilación en la DC en comparación con el PPO crudo. Este fenómeno se debe a la separación de la mayor parte de los hidrocarburos monoaromáticos tras la destilación, los cuales ya no se encuentran en el diésel destilado.

En la muestra de PPO111 destilado (DC), la concentración de HAP supera el valor máximo especificado por la norma australiana; mientras que, en las otras tres muestras, el valor de HAP se encuentra muy por debajo de la norma. Arjharn et al. También se ha documentado la presencia de HAP en PPO destilado (3,1 %), medido según la norma ASTM D6379 (Arjharn et al., 2022). Sin embargo, aún no se ha investigado el perfil de emisión de HAP al utilizar CS o DC en motores diésel. Los investigadores consideran este estudio como parte de su trabajo futuro.

No obstante, un artículo de investigación menciona la emisión de HAP de un motor diésel que utiliza diésel. Dichos autores observaron que entre el 95 % y el 99 % de los HAP presentes en el diésel se convirtieron, destruyeron o retuvieron en el aceite lubricante tras la combustión. Asimismo, documentaron que, a mayor concentración de HAP en el diésel, mayor es la emisión de HAP al utilizar dicho combustible en el motor (de Souza y Corrêa, 2016).

f) NO_x

Los NO_x se componen de óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) y se producen por la oxidación del nitrógeno durante la combustión. La producción de NO_x depende de la temperatura, el tiempo de residencia para la reacción, la concentración de oxígeno y la relación aire/combustible. Además, una combustión adecuada aumenta la temperatura y la cantidad de átomos de oxígeno libres, que pueden reaccionar con el nitrógeno para formar NO_x (Mani et al., 2009 ; Zhu et al., 2011). La producción de NO_x es mayor en los motores de encendido por compresión (CI), ya que operan con una mezcla aire-combustible pobre (Ananthakumar et al., 2016).

La producción de NO_x en la combustión se produce mediante tres mecanismos diferentes : el mecanismo térmico , el mecanismo de reacción rápida y el mecanismo de combustión (Heywood, 1988 ; Semerjian y Vranos, 1977). En los motores diésel, la mayor parte del NO_x se produce mediante el mecanismo térmico. Las emisiones de NO_x son mayores para el PPO que para el diésel a todas las cargas, un fenómeno que, según numerosos investigadores, se debe a su contenido de estructura cíclica (Khatha et al., 2020 ; Mani et al., 2011 ; Daniel et al., 2017 ; Mani et al., 2010 ; Kumar y Sankaranarayanan, 2016 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a ; Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016b ; Mani et al., 2009 ; Ruban et al., 2017).

Algunos investigadores han documentado que las mayores emisiones de NO_x del PPO respecto al diésel se deben a la elevada presión máxima en el cilindro y a la mayor temperatura generada (Daniel et al., 2017 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a). Khatha et al. Se mencionó que la razón de la mayor emisión de NO_x para el PPO que para el diésel es la mayor cantidad de contenido de nitrógeno en el PPO (Khatha et al., 2020).

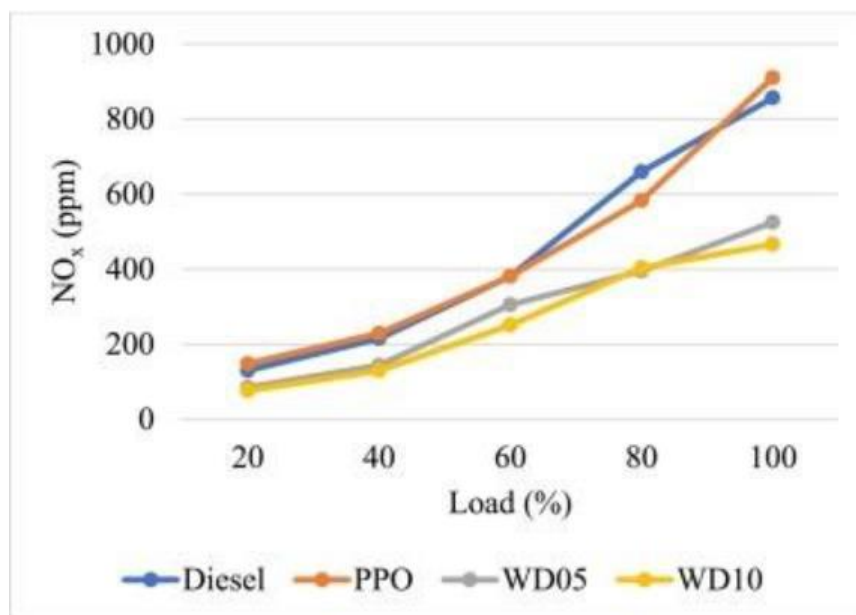
Las emisiones de NO_x son mayores en las mezclas de PPO y diésel que en el diésel puro, pero alcanzan su valor máximo al operar el motor con PPO puro (Kalargaris et al., 2017a ; Mani et al., 2011 ; Panda et al., 2016 ; Geo et al., 2018 ; Ananthakumar et al., 2016 ; Kumar y Sankaranarayanan, 2016 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016b ; Mani et al., 2009 ; Güngör et al., 2015).

La mayor emisión de NO_x del PPO en comparación con las mezclas de PPO y diésel se debe a un mayor retardo de ignición y una mayor presión en el cilindro, lo que resulta en una mayor liberación de calor y una temperatura de combustión más elevada que con otros combustibles (Kaimal y Vijayabalan, 2016b ; Güngör et al., 2015). Esto también puede deberse al mayor contenido aromático del PPO, que incrementa la temperatura de la llama adiabática y provoca una mayor liberación de calor y, por consiguiente, mayores emisiones de NO_x (Kidoguchi et al., 2000 ; Heywood, 2018). Además, Ramesha et al. también observaron mayores emisiones de NO_x al mezclar PPO con biodiésel, debido a la mayor tasa de liberación de calor de la mezcla, lo que aumenta la temperatura en la cámara de combustión y, por lo tanto, las emisiones de NO_x (Ramesha et al., 2015).

Otra razón para las mayores emisiones de NOx es el mayor retardo de ignición del PPO, que provoca una combustión premezclada (Mani et al., 2011). También se observaron mayores emisiones de NOx al utilizar una mezcla de PPO y JME, y a medida que aumenta el porcentaje de JME en la mezcla, las emisiones de NOx aumentan aún más (Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016) debido al mayor contenido de oxígeno en la cámara de combustión. Con el aumento de la carga, las emisiones de NOx también aumentan (Damodharan et al., 2017; Ramesha et al., 2015; Ananthakumar et al., 2016; Devaraj et al., 2015a) debido al incremento de la temperatura. Sin embargo, en el caso de las mezclas de PPO y diésel, a medida que aumenta la cantidad de PPO en la mezcla, también aumentan las emisiones de NOx, lo cual puede deberse a la presencia de hidrocarburos oxigenados en el PPO, que produce una mejor combustión y, por consiguiente, mayores emisiones de NOx (Kumar et al., 2013).

La figura 21 representa los cambios en la emisión de NOx para el PPO y sus mezclas con DEE (en 5 y 10 % en peso, denominadas WD05 y WD10 respectivamente) bajo diferentes condiciones de carga, y compara los resultados con los obtenidos utilizando diésel comercial. Con el aumento de la carga, la emisión de NOx aumentó para todas las muestras de combustible analizadas.

Figura 25. Variación en la emisión de NOx con respecto a la carga.



Nota. El gráfico muestra la variación en la emisión de NOx con respecto a la carga. Tomado de *Variation in NOx emission with respect to load* [Gráfico], Devaraj et al., 2015, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

La figura 25 muestra que, al aumentar la proporción de DEE en la mezcla de PPO y DEE, disminuyen las emisiones de NOx. Esto se debe a que el DEE tiene un mayor contenido de oxígeno y mejora el índice de cetano, lo que facilita la combustión al encender la mezcla aire-combustible con mayor facilidad. Además, el DEE tiene un alto poder calorífico y, por lo tanto, reduce las emisiones de NOx.

Sin embargo, Janyalertadun et al. observaron una menor emisión de NOx para el aceite de palma (PPO) que para el diésel, debido a la menor disponibilidad de oxígeno en la cámara de combustión como resultado de la combustión tardía del combustible (Janyalertadun et al., 2017 ; Mani et al., 2009).

Kumar y Sankaranarayanan también observaron una menor emisión de NOx en emulsiones de aceite de palma debido a la presencia de agua, que absorbe calor para evaporarse y, por lo tanto, reduce la temperatura máxima de la llama (Kumar y Sankaranarayanan, 2016).

Asimismo, Damodharan et al. documentaron una menor emisión de NOx para el PPO y para mezclas de PPO y diésel con un 10 % de n-butanol, en comparación con el diésel puro. No obstante, se observó un aumento en la emisión de NOx al utilizar un 20 % y un 30 % de n-butanol en mezclas con PPO-diésel, debido al incremento de compuestos oxigenados (Damodharan et al., 2017). La disminución de las emisiones de NOx también se logró mediante la mezcla de DEE con PPO (Ananthakumar et al., 2016 ; Kaimal y Vijayabalan, 2016a). A pesar de que el contenido de oxígeno aumenta con el porcentaje de DEE en la mezcla, las emisiones de NOx siguen disminuyendo debido a su baja temperatura de autoignición, que requiere una temperatura baja para iniciar la combustión.

Además, otra razón documentada fue el elevado calor latente de vaporización del DEE, que reduce la temperatura dentro de la cámara de combustión. La reducción de las emisiones de NOx también es posible mediante la recirculación de gases de escape (EGR), ya que al introducirla en el cilindro, reemplaza el oxígeno con CO₂ no reactivo . Esto reduce la capacidad calorífica específica de la mezcla de gases del cilindro y la temperatura máxima de la llama al absorber la energía liberada por la combustión, lo que resulta en una menor temperatura máxima de combustión y, por lo tanto, en menos NOx (Daniel et al., 2017 ; Mani et al., 2010).

Se documentó que, al aumentar el caudal de EGR, la emisión de NOx disminuye en comparación con el uso de PPO puro, aunque sigue siendo mayor que la del diésel (Mani et al., 2010). La emisión de NOx puede reducirse aún más mediante la adición de éster a la mezcla de PPO y diésel (Daniel et al., 2017). Se observó una reducción de la emisión de NOx al aumentar el porcentaje de la mezcla debido a la disminución de la fase de combustión premezclada (Churkunti et al., 2016). Asimismo, Devaraj et al. (2015a) documentaron una reducción de NOx al aumentar el porcentaje de DEE en la mezcla de PPO y DEE, debido a que el DEE tiene un mayor índice de cetano, mayor contenido de oxígeno, menor liberación de calor y mayor calor de evaporación (Karabektas et al., 2014 ; Nagdeote y Deshmukh, 2012).

La cantidad de emisión de NOx también disminuyó con el aumento de la carga para todas las mezclas de PPO y diésel debido a la menor disponibilidad de oxígeno para la combustión, lo que resultó en menos NOx (Singh et al., 2020 ; Mani et al., 2009 ; Kumar et al., 2013).

La tabla 12 describe el impacto del uso de PPO y sus mezclas en las emisiones de un motor diésel. Se analizan las emisiones de CO, CO₂, NO_x, humo y UHC para el PPO y sus mezclas con diésel y diferentes aditivos, y se comparan con las del diésel comercial.

Tabla 12. Efecto de diferentes aceites pirolíticos sobre las emisiones del motor en comparación con el combustible diésel comercial.

Aceite / Mezcla (carga plena)	CO	CO ₂	NO _x	Humo UHC	Referencia
PPO vs diésel	↑ 18–75 %	↓ 2–45 %	↑ 5–65 %	↑ 40–180 %	Kaimal y Vijayabalan (2016a, 2016b)
PPO + diésel (20–50 %)	Comparable o ↑	↓ 2–6 %	↓ 15–50 %	↓ 15–45 %	Damodharan et al. (2017)
PPO (con EGR 10–20 %)	↓ 10–25 %	↓ 1–16 %	↓ 1–6 %	↓ hasta 60 %	Mani et al. (2010)
PPO (10–70 %)	↑ proporcional	↑ leve	↑ moderado	↑ 38–48 %	Mani et al. (2011)
PPO + biodiésel (10–50 %)	↑ fuerte	↑ 9–189 %	↑ 45–260 %	↑ 17–292 %	Panda et al. (2016)
PPO + agua / PW (10–30 %)	↑ CO	↑ CO ₂	↓ NO _x	↑ UHC	Kumar & Sankaranarayanan (2016)
PPO + éter dietílico (5–10 %)	↓ CO	↓ CO ₂	↓ NO _x	↓ humo	Devaraj et al. (2015b)
PPO (PP, PE, PS)	↑ leve	↑ leve	↑ hasta 45 %	↑ moderado	Janyalertadun et al. (2017)
PPO (general)	↑ CO	↓ CO ₂	↑ NO _x	↑ humo	Singh et al. (2020)

Nota. Adaptado desde *Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics*, por Faisal F. et al, 2023, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

En Table 12, *BSU - Bosch smoke unit, *FSN - filter smoke number, *EGR- exhaust gas recirculation. PD5 (5 % DEE + diesel blend), PD10 (10 % DEE + diesel blend), PD15 (15 % DEE + diesel blend). PPO = waste plastic oil; EGR (exhaust gas recirculation); PO25 (25 % PPO + 75 % diesel) (vol%); PO50 (50 % PPO + 50 % diesel)

(vol%) and PO75 (75 % PPO + 25 % diesel) (vol%); PJ10 and PJ20 are 10 vol% and 20 vol% of *Jatropha methyl ester* (JME) oil mixed with PPO; PW10, PW20 and PW30 are emulsions of PPO and water with water percentages 10, 20 and 30 respectively+2 % surfactant in all three emulsions; WPE5 = 5 % de PPO mezclado con diésel; PPO 10 = 10 % de aceite de plástico residual + 90 % de diésel, PPO 30 = 30 % de aceite de plástico residual + 70 % de diésel, PPO 50 = 50 % de aceite de plástico residual + 50 % de diésel, PPO 70 = 70 % de aceite de plástico residual + 30 % de diésel; 10 % B PPO, 20 % B PPO, 30 % B PPO y 40 % B PPO representan 10, 20, 30 y 40 % de PPO mezclado con diésel respectivamente; D50-PPO40-B10, mezcla de 50 % ULSD, 40 % de aceite pirolítico de plástico y 10 % de n-butanol (en volumen); D50-PPO30-B20, mezcla de 50 % ULSD, 30 % de aceite pirolítico de plástico y 20 % de n-butanol (en volumen). D50-PPO20-B30, mezcla de 50 % ULSD, 20 % aceite pirolítico de plástico y 30 % n-butanol por volumen; B20AOME10PPO (10 % aceite de plástico de desecho + 90 % biodiesel de algas B20).

La Tabla 12 contiene información crucial sobre el comportamiento de las emisiones del PPO y sus mezclas, y cómo este varía en comparación con el uso de diésel comercial en el motor. Las emisiones de CO pueden tanto aumentar como disminuir con el uso de PPO y sus mezclas en lugar de diésel. Se ha reportado un aumento de hasta el 268,18 % en las emisiones de CO al usar emulsiones de PPO (Kumar y Sankaranarayanan, 2016), mientras que también se ha observado una disminución del 20 % con el uso de mezclas de PPO y diésel en lugar de diésel comercial (Güngör et al., 2015). Asimismo, se ha observado que las emisiones de NOx también varían al usar PPO y sus mezclas en comparación con el diésel.

El mayor aumento registrado en las emisiones de NOx, del 188,89 %, se obtuvo al usar mezclas de PPO y diésel en lugar de diésel puro (Panda et al., 2016). Por otro lado, un estudio observó que las emisiones de NOx pueden reducirse hasta en un 63,02 % mediante el uso de emulsiones de PPO (Kumar y Sankaranarayanan, 2016), según los artículos de investigación revisados en este trabajo.

Además, la mayor disminución en las emisiones de CO₂ se detectó en este estudio (47,47 %) al utilizar mezclas de PPO (Kumar et al., 2013) y diésel; en contraste, el mayor aumento documentado fue del 13,04 % al utilizar PPO en lugar de diésel (Devaraj et al., 2015a). El mayor aumento en la opacidad del humo se documentó en un 258,62 % al utilizar una mezcla de PPO y diésel (Panda et al., 2016), mientras que la mayor reducción, del 50 %, se observó al utilizar una mezcla de PPO, diésel y n-butanol en comparación con el uso de diésel (Damodharan et al., 2017).

De manera similar, el mayor aumento en UHC observado en la Tabla 4 es del 1310 % al usar una mezcla de PPO y diésel (Kumar et al., 2013) y también la reducción máxima documentada es del 83,84 % con el uso de una mezcla de PPO y JME (Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016).

3.6. Análisis tecnoeconómico

3.6.1. Viabilidad económica del proceso de pirólisis del plástico

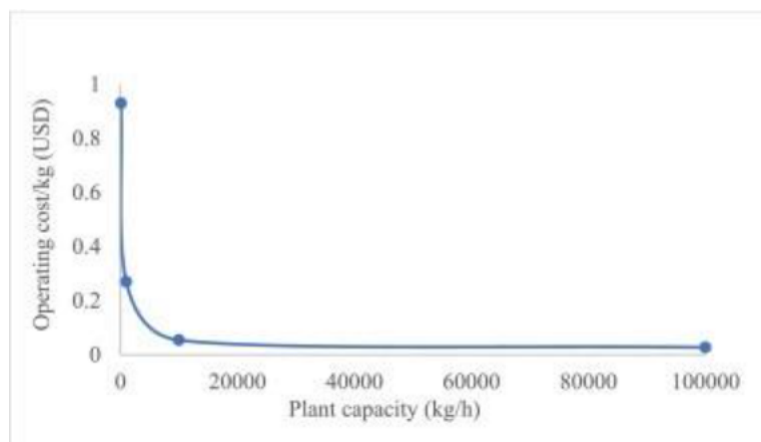
El potencial del aceite de palma (PPO) para sustituir los combustibles automotrices comerciales derivados del petróleo depende en gran medida de la viabilidad económica de su producción. La combinación de la inversión de capital (costos fijos) y los costos operativos (costos variables) conforma el costo total de una planta de pirólisis.

Los costos fijos de las plantas de pirólisis incluyen el desarrollo de las instalaciones (terreno, transporte, construcción, etc.), la fabricación del reactor de pirólisis y otros equipos básicos, los dispositivos de manejo y almacenamiento de la materia prima, los honorarios de los contratistas, etc. (Sahu et al., 2014). Dentro del costo total de una planta de PPO, el mayor costo corresponde a la instalación de la planta (Jahirul et al., 2012 ; Chhabra et al., 2021).

Uno de los artículos de investigación estudió el costo de producción de PPO en una planta con una capacidad de 100 kg/h, utilizando plásticos de desecho mixtos como materia prima (Fivga y Dimitriou, 2018). Mediante el software de simulación de procesos Aspen HYSYS, se realizó un modelado que reveló que el costo de producción de PPO era 1,18 USD/kg, o un 58 %, superior a los precios de mercado actuales.

Sin embargo, se observó que el proceso de producción de combustible pirolítico puede ser económicamente viable y su costo puede reducirse significativamente (hasta 20,8 veces) al aumentar la escala del proceso. La figura 15 muestra que el costo operativo de una planta de pirólisis de plásticos de desecho puede disminuir al aumentar la capacidad de la planta.

Figura 26. Costo operativo de la planta por kg vs. capacidad de la planta.



Nota. El gráfico muestra el costo operativo de la planta por kg vs. capacidad de planta. Tomado de *Plant operating cost per kg vs. plant capacity* [Gráfico], Fivga y Dimitriou, 2018, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

Sahu et al. estudiaron la modelización de la pirólisis catalítica de residuos plásticos mediante el software de simulación ASPEN Plus (Sahu et al., 2014). Indicaron que, en el caso de una planta de pirólisis a gran escala con una tasa de alimentación anual de 120 000 toneladas, se puede alcanzar un coste de capital total estimado de 58 591 260 USD, un coste de producción anual de 52 019 998 USD, un beneficio anual total de 72 933 156 USD y un beneficio neto anual de 20 913 158 USD, con un periodo de recuperación de la inversión de 1,42 años. Wongkhorsub y Chindaprasert (2013) también estudiaron el coste de producción de PPO y llevaron a cabo la pirólisis de residuos de polietileno y polipropileno a 300-500 °C, obteniendo rendimientos de aceite de entre el 60 y el 80 % en peso.

También probaron un motor diésel (Kubota ET70) con el PPO producido y estimaron que el costo de producción del PPO era comparable, aunque relativamente superior, al del diésel comercial, cuyo precio era de 0,59 USD/L considerando todos los demás gastos, incluidos impuestos y seguros (Wongkhorsub y Chindaprasert, 2013).

No obstante, documentaron que el rendimiento del motor obtenido con el PPO producido era inferior al del diésel, pero sugirieron que una modificación del motor diésel podría mejorarlo.

Kulas et al. también calcularon el precio mínimo de venta del PPO en 592 USD/tonelada, ligeramente superior al de la nafta de petróleo (561 USD/tonelada), mediante un modelo de flujo de caja descontado a 20 años con el software de simulación ASPEN PLUS (Kulas et al., 2023). Los datos sobre el rendimiento de los productos de pirólisis se obtuvieron de una planta experimental de pirólisis a pequeña escala que utilizaba como materia prima líquida HDPE y PP disueltos en cera de pirólisis reciclada.

3.6.2. Viabilidad económica del proceso de destilación de PPO crudo

El aceite de palma crudo requiere un procesamiento adicional para mejorar sus propiedades, como el punto de inflamación, el poder calorífico, la viscosidad, la densidad, el contenido de azufre, el índice de cetano y el contenido de agua.

Una unidad de destilación puede separar el aceite de palma crudo en las fracciones deseadas según sus rangos de punto de ebullición. Sin embargo, el proceso de destilación es costoso y requiere grandes cantidades de energía térmica para la extracción del vapor. Por ello, los investigadores buscan continuamente formas de mejorar las técnicas de operación y la eficiencia energética de la unidad de destilación.

Thewys y Kuppens mencionaron que el costo de producción del aceite de palma refinado suele ser mayor que el de los combustibles fósiles disponibles comercialmente (Thewys y Kuppens, 2008).

Los investigadores han seguido diferentes métodos para mejorar el rendimiento de las columnas de destilación, como la optimización de las condiciones de operación, la mejora del diseño y una mejor integración de la red de destilación y el intercambiador de calor (Kumar y Mhetre, 2022). Gadalla et al. (2003) analizaron el proceso

de destilación de una refinería y optimizaron la columna de destilación y la red de intercambiadores de calor.

Documentaron que, mediante un estudio de caso, se logró reducir en un 25 % el costo operativo de la planta de destilación y su consumo energético mediante la optimización de la columna de destilación y el intercambiador de calor. Bagajewicz et al. (2014) investigaron el proceso de destilación de petróleo crudo utilizando cinco esquemas de proceso para incrementar el rendimiento de la destilación. Documentaron que todos los procesos tienen el potencial de aumentar los márgenes de ganancia bruta entre 0,09 y 0,59 USD/barril (Bagajewicz et al., 2014).

3.6.3. Viabilidad económica del uso de PPO y sus mezclas en motores diésel

La revisión bibliográfica evidenció la escasez de estudios que investigaran experimentalmente la viabilidad económica del uso de PPO y PPO postratado en motores diésel.

Sin embargo, son muy pocos los estudios que han analizado el aspecto tecnoeconómico del uso de PPO en motores diésel mediante simulación y modelado numérico. Por ejemplo, Panda et al. analizaron el aspecto tecnoeconómico del uso de mezclas de PPO (obtenido mediante la pirólisis de residuos plásticos médicos) y diésel en motores diésel, incluyendo el rendimiento del motor y el análisis de emisiones, utilizando un modelo de red neuronal artificial (RNA) basado en inteligencia artificial (Panda et al., 2023).

El uso de modelos de RNA resulta eficaz para reducir el esfuerzo, el tiempo y los costos asociados a las pruebas experimentales, al predecir las características de salida del motor y realizar un análisis termoeconómico mediante el modelado. Los autores hallaron que el costo de producción del PPO era menor que el del diésel y que el costo del combustible era el más bajo al utilizar una mezcla de PPO 20 (20 % PPO + 80 % diésel). Por lo tanto, lograron un menor costo de producción de energía con un menor costo de disipación de calor, así como menores costos de emisiones contaminantes y de destrucción de exergía . Sin embargo, observaron que el uso de mezclas con mayor proporción de PPO incrementó el costo total.

El equilibrio económico del combustible (durante el volumen de control de condición equilibrada de un motor de prueba) se puede determinar mediante la ecuación (1) a continuación (Panda et al., 2023 ; Kiani et al., 2010),(1)(2)(3)(4)(5)

Además, se puede calcular mediante la fórmula (6) de la siguiente manera: (6) donde C es el costo de las inversiones en activos y son los costos operativos y de mantenimiento. (7) donde Z = costo de adquisición del motor de prueba (en USD), = problema de mantenimiento, X = Falta de información completa, que se presume es 1,06 (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos: Anuario de Frutas y Nueces de Árbol, octubre de 2016) y N = Horas de funcionamiento del motor por año, (se asume que 12×100 h/año) (Meisami et al., 2018).

El factor de recuperación de capital (CRF) se puede calcular mediante la ecuación (8), donde n = la vida útil de un motor ideal (considerada de 15 años), = Tasa de retorno exitosa y se puede determinar con la siguiente fórmula, donde i = tasa de interés anual y P = tasa de capitalización.

Suponiendo una tasa de interés anual del 20 % ($i = 0,2$) y una tasa de capitalización mensual ($p = 12$), se puede estimar que la tasa de retorno exitosa y los aspectos de retorno de capital son del 21,94 % y el 23,11 %, respectivamente.

En cualquier estudio termodinámico, el combustible de prueba representa los activos para generar energía (costo de las pérdidas por unidad equivalente al costo del combustible), donde = costo de producción de energía/unidad de energía de combustible (USD/kJ).

Así, los precios medios de los combustibles son 1,34 USD/kg para el diésel y 0,47 USD por kg para el WPO (Meisami et al., 2018) (considerando un precio internacional promedio por unidad de masa de diésel y combustible PPO para una vida útil de 15 años).

Kamil y Almarashda investigaron la viabilidad económica del uso de biodiésel (proveniente de semillas de dátil de palma del desierto) y mezclas de diésel en una planta de pequeña escala con una capacidad de 1000 t/año, utilizando el software de modelado UniSim Design de Honeywell (Honeywell Process Solutions Company, Morris Plains, NJ, EE. UU.) (Kamil y Almarashda, 2023).

Estimaron que, cuando el costo de los pellets de semilla de dátil es el 70 % del costo de los pellets de madera, el Valor Actual Neto (VAN) asciende a 6,42 millones de dólares, con un periodo de recuperación de la inversión de 5 años y un Retorno de la Inversión (ROI) del 14,2 %. Sin embargo, se observó que el proyecto es altamente sensible al precio de los pellets de semilla de dátil de palma del desierto y pierde viabilidad si la relación de precios cae por debajo del 70 %.

4. PIROLISIS CATALÍTICA DE RESIDUOS PLÁSTICOS Y EFECTOS DE SIMETRÍA MOLECULAR: UNA RESEÑA

La pirólisis catalítica implica la adición de un catalizador, con una mayor tasa de conversión del plástico en aceites y una mayor calidad de los productos, lo que se relaciona con las temperaturas más bajas y el menor tiempo de reacción del proceso [Miandad, R.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Rehan, M.; Nizami, A.S. Pirólisis catalítica de residuos plásticos]. Los catalizadores también se utilizan en pirólisis para optimizar la distribución y aumentar la selectividad del producto, y proporcionan rendimientos similares a los combustibles convencionales, como el diésel y la gasolina [Sivagami, K.; Divyapriya, G.; Selvaraj, R.; Madhiyazhagan, P.; Sriram, N.; Nambi, I. Pirólisis catalítica de plásticos de residuos basados en poliolefinas y envases multicapa: un estudio piloto. *Proceso Saf. Cafiero, L.; Castoldi, E.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Identificación y caracterización de plásticos a partir de pequeños electrodomésticos y análisis cinético de su pirólisis térmicamente activada. Polym]*.

Los catalizadores suelen clasificarse en dos grupos: homogéneos y heterogéneos. Generalmente, los catalizadores homogéneos están en una sola fase (reactivos, productos y catalizadores están en la misma fase), es decir, en solución líquida, mientras que los catalizadores heterogéneos están en forma sólida [Anantharaman, A.P.; Pillai, N.S. Catalizador heterogéneo para la pirólisis y producción de biodiésel. En *Biocombustibles Líquidos*, 1ª ed.; Shadangi, K.P., Ed.; Wiley: Nueva York, NY, EE. UU., 2021; pp. 77–118.]. Los catalizadores homogéneos más utilizados para la pirólisis plástica son el cloruro de aluminio (AlCl_3), hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH) y metóxido de sodio (CH_3ONa). Los catalizadores ácidos más utilizados son los ácidos clorhídrico, fosfórico, sulfúrico y sulfónico orgánico. Se prefieren catalizadores ácidos homogéneos a los bases, debido a la menor actividad de estos últimos [Anantharaman, A.P.; Pillai, N.S. Catalizador heterogéneo para la pirólisis y producción de biodiésel. En *Biocombustibles Líquidos*, 1ª ed.; Shadangi, K.P., Ed.; Wiley: Nueva York, NY, EE. UU., 2021; pp. 77–118.].

Los catalizadores heterogéneos se encuentran mayormente en forma sólida, y se añaden a compuestos sólidos, líquidos o gaseosos en la mezcla [Yansaneh, O.Y.; Zein, S.H. Últimos avances en catálisis pirolítica de plásticos de desechos. *Procesos* 2022, 10, 683.]. Los catalizadores heterogéneos son de uso más común, debido a su fácil separación del producto líquido de pirólisis, lo que permite reutilizar y regenerar el catalizador [Al-Salem, S.M.; Antelava, A.; Constantinou, A.; Manos, G.; Dutta, A. Una revisión sobre la pirólisis térmica y catalítica de residuos sólidos plásticos (PSW). *J. Entorno. Manag.* 2017, 197, 177–198]. Otra ventaja importante de los catalizadores heterogéneos frente a los homogéneos es que no son corrosivos.

La superficie superficial, la porosidad, la disposición de los grupos funcionales y la acidez son características importantes para el proceso de pirólisis [Anantharaman, A.P.; Pillai, N.S. Catalizador heterogéneo para la pirólisis y producción de biodiésel.

En Biocombustibles Líquidos, 1ª ed.; Shadangi, K.P., Ed.; Wiley: Nueva York, NY, EE. UU., 2021; pp. 77–118].

Los catalizadores más utilizados son los siguientes: óxido de zinc—ZnO; óxido de magnesio—MgO; Carbonato de calcio—CaCO₃; Carburo de calcio—CaC₂; dióxido de silicio—SiO₂; Óxido de aluminio—Al₂O₃; Alúmina dopada con dióxido de silicio—SiO₂-Al₂O₃; Zeolita Socony mobil-5—ZSM-5; zeolita; barro rojo; y craqueo catalítico fluido—FCC [54,55].

Los catalizadores de la FCC se utilizan ampliamente en refinerías de petróleo para la descifración de aceites pesados en gasolina y petróleo líquido [Al-Salem, S.M.; Antelava, A.; Constantinou, A.; Manos, G.; Dutta, A. Una revisión sobre la pirólisis térmica y catalítica de residuos sólidos plásticos (PSW). J. Entorno. Manag. 2017, 197, 177–198]. La FCC contiene tres partes: cristales de zeolita y una matriz de ácido no zeolítico hecha de sílice-alúmina con un aligante en la estructura [Armenise, S.; SyieLuing, W.; Ramírez-Velásquez, J.M.; Launay, F.; Wuebben, D.; Ngadi, N.; Rams, J.; Muñoz, M. Reciclaje de residuos plásticos mediante pirólisis:].

Los catalizadores de sílice-alúmina tienen sitios ácidos de Lewis, que actúan como aceptores de electrones, y sitios ácidos de Brönsted con átomos de hidrógeno ionizables. La acidez de estos catalizadores influye en la producción de aceites líquidos a partir de la pirólisis de plásticos de desecho. Cuando la acidez es muy alta, la producción de aceites líquidos se reduce [Miandad, R.; Barakat, M.A.; Aburiazaiza, A.S.; Rehan, M.; Nizami, A.S. Pirólisis catalítica de residuos plásticos]. La presencia de poros abiertos en las zeolitas es la característica más importante de este tipo de catalizador. Las zeolitas con alta acidez son más activas en el proceso de agrietamiento, aumentando así la producción de olefinas ligeras y disminuyendo las fracciones pesadas [Daligaux, V.; Richard, R.; Manero, M.H. Desactivación y regeneración de catalizadores de zeolita utilizados en la pirólisis de residuos plásticos—Revisión de procesos y análisis. Catalizadores 2021, 11, 770].

4.1. Estructura del catalizador y mecanismo de pirólisis

Los catalizadores de zeolita tienen una estructura cristalina que contiene unidades estructural primarias de tetraedros TO₄. T representa el átomo central, mayormente Si o Al, rodeado por átomos de O que conectan las unidades entre sí. La interconexión entre las unidades del edificio conduce a estructuras microporosas tridimensionales con diferentes geometrías y características estructurales [Daligaux, V.; Richard, R.; Manero, M.H. Desactivación y regeneración de catalizadores de zeolita utilizados en la pirólisis de residuos plásticos—Revisión de procesos y análisis. Catalizadores 2021, 11, 770]. Las zeolitas también favorecen las reacciones de transferencia de hidrógeno, debido a la presencia de muchos centros ácidos [Pinto, F.; Costa, P.; Gulyurtlu, I.; Cabrita, I. Pirólisis de residuos plásticos 2. Efecto del catalizador en el rendimiento del producto. J. Anal. Appl. Pirólisis 1999, 51, 57–71]. Los catalizadores de sílice-alúmina y las zeolitas provocan un aumento del rendimiento gaseoso.

Las moléculas más ligeras, que favorecen la formación de gases, se obtienen como consecuencia del aumento de las reacciones de craqueamiento y la acidez [Daligaux, V.; Richard, R.; Manero, M.H. Desactivación y regeneración de catalizadores de zeolita utilizados en la pirólisis de residuos plásticos—Revisión de procesos y análisis. *Catalizadores* 2021, 11, 770.].

En comparación con las zeolitas, se puede suponer que los catalizadores de sílice-alúmina no contienen estructuras cristalinas estables con volúmenes porosos mayores que los de las zeolitas, que son microporosas [Uthpalani, P.G.I.; Premachandra, J.K.; De Silva, D.S.M.; Weerasinghe, V.P.A. Pirólisis como método de valor añadido para la gestión de residuos plásticos: una revisión sobre la conversión de residuos LDPE y HDPE en combustible; *Research Square*].

Se han publicado numerosos estudios sobre la pirólisis de polímeros de residuos plásticos debido a la ventajosa estructura microporosa de la zeolita ZSM-5 [42,64,65,66]. Estos artículos también ofrecen estudios exhaustivos de los estudios realizados sobre la pirólisis catalítica de residuos plásticos en presencia de zeolitas (ZSM-5).

Se sabe que la energía de activación disminuye en presencia de catalizadores, lo que sugiere un aumento de la velocidad de reacción, aunque no hay información disponible sobre el valor del factor preexponencial.

Como consecuencia, el uso de catalizadores reduce la temperatura óptima necesaria para el proceso de pirólisis, permitiendo el ahorro de energía y, por tanto, reduciendo el coste más relevante para las industrias [Anuar Sharuddin, S.D.; Abnisa, F.; Wan Daud, W.M.A.; Aroua, M.K. Una reseña sobre la pirólisis de residuos plásticos. *Conversación de energía. Manag.* 2016, 115, 308–326.].

Los catalizadores pueden colocarse tanto en el reactor de pirólisis (in situ) como en un lecho catalítico separado (en línea). Catalizadores, como la forma protonada (H) de ZSM-5 o HZSM-5, la forma protonada de Y zeolita (HY), la forma protonada de beta zeolita (H β) y la jerárquica H ultra estable Y HUSY zeolita, promueven el craqueo carbocatiónico de volátiles de pirólisis e isomerización, oligomerización-craqueo y transferencia de hidrógeno. Las principales propiedades de los catalizadores que influyen en el rendimiento de las grietas son la resistencia y la porosidad. Durante el procesamiento catalítico de plásticos, la matriz polimérica se funde al calentarse y se dispersa sobre la superficie del catalizador.

Los mecanismos de la pirolisis catalítica también incluyen la cisión en cadenas, isomerización, oligomerización, transferencia de hidrogenio y aromatización. El primer paso del craqueo polimérico se atribuye a la adsorción de la molécula reactiva en el sitio ácido, donde esta se somete a una protonación con la formación de iones de carbono.

Este intermedio favorece la descomposición de moléculas. Como consecuencia, la velocidad de reacción se ve mayormente afectada por la intensidad, densidad y distribución del sitio ácido.

El sitio activo ácido de un catalizador promueve la descomposición de compuestos olefinicos y las reacciones de transferencia de hidrógeno.

Cuando los sitios catalizadores son fuertemente ácidos, se favorece la formación de olefinas (mediante escisión de cadenas finales), mientras que, cuando los sitios catalizadores son débilmente ácidos, se potencia la formación de ceras (escisiones aleatorias).

Los productos obtenidos (olefinas o ceras) sufren reacciones adicionales para producir compuestos de bajo peso molecular [Daligaux, V.; Richard, R.; Manero, M.H. Desactivación y regeneración de catalizadores de zeolita utilizados en la pirólisis de residuos plásticos—Revisión de procesos y análisis. *Catalizadores* 2021, 11, 770.]. En el estudio realizado por Cai et al. [Cai, N.; Li, X.; Xia, S.; Sun, L.; Hu, J.; Bartocci, P.; Fantozzi, F.; Williams, P.T.; Yang, H.; Chen, H. Pirólisis-catálisis de diferentes plásticos de desecho sobre Fe/Al₂O₃ catalizador], la pirólisis catalítica de varios tipos de plástico con Fe/Al₂O₃ se estudió para obtener hidrógeno de alto valor, compuestos aromáticos y nanotubos de carbono como productos de reacción.

Este trabajo demostró que los polímeros plásticos tienden a descomponerse mediante un mecanismo de escisión, y que el etileno obtenido por descomposición en PE estuvo más involucrado en la deposición catalítica de coque respecto al propileno (a partir de la descomposición de PP), lo que aumentó aún más la cantidad de carbono sólido. Además, el poliestireno de alto impacto (HIPS) y el poliestireno de uso general (GPPS) depositaron más carbono que el producido durante la pirólisis catalítica de los plásticos poliolefinos. Esto se explica por la diferencia en la estructura molecular de los distintos tipos de plástico, debido a la presencia de anillos de benceno en las estructuras HIPS y GPPS. Cuando el GPPS y el HIPS se calientan hasta alcanzar sus temperaturas de degradación, la gran parte polimérica se descompone en compuestos aromáticos más pequeños como estireno o oligómeros de estireno. Cuando se utilizan los catalizadores, se elimina el grupo etenilo en la molécula de estireno y los anillos bencenos son accesibles para producir hidrógeno de alto valor, compuestos aromáticos y nanotubos de carbono como productos de reacción.

Al mismo tiempo, se rompen los enlaces C-C y C-H en los grupos etililo. En el catalizador, los átomos de carbono se disuelven y se recombinan repentinamente fundiendo hierro, formando así carbono grafitico. Los átomos residuales de hidrógeno son responsables de la formación de gases de bajo peso molecular. Los compuestos hidrocarbonados aromáticos más pesados son decisivos para el proceso generador de carbono en comparación con las moléculas de microalcanos y olefinas. Debido al mayor grado de conversión en carbono sólido, la cantidad de productos gaseosos obtenidos de PS es menor que la producida de PE y PP [Cai, N.; Li, X.; Xia, S.; Sun, L.; Hu, J.; Bartocci, P.; Fantozzi, F.; Williams, P.T.; Yang, H.; Chen, H. Pirólisis-catálisis de diferentes plásticos de desecho sobre Fe/Al₂O₃ catalizador].

Paula et al. [6] han realizado pirólisis térmica y catalítica de residuos plásticos (PE, PP, PS) con zeolitas ZSM-5 y mordenita modificada (MOR).

La mordenita fue tratada con NaOH para mejorar el volumen de los poros. Mediante el tratamiento con álcali, puede producirse una morfología mesoporosa en el catalizador, preservando así su acidez.

La mordenita tiene un tamaño de poro irregular, lo que podría contribuir a la aparición de reacciones secundarias en la superficie catalizadora. Las reacciones en la superficie del catalizador pueden contribuir a procesos secundarios bimoleculares y a la producción de compuestos aromáticos, lo que además conduce a tasas de conversión más bajas y aumenta la fracción de hidrocarburos de fracción ligera.

Las bajas tasas de conversión también pueden relacionarse con sistemas de canales monodimensionales y baja mesoporosidad, lo que limitaba el acceso del catalizador a cadenas poliméricas en los sitios activos.

Sin embargo, el catalizador ZSM-5 tratado mostró un mejor rendimiento en el procesamiento catalítico de plásticos en comparación con la mordenita. Otro estudio en el que se discutió el efecto de los poros pequeños del catalizador ZSM-5 se reporta en [Zhou, N.; Dai, L.; Lyu, Y.; Wang, Y.; Li, H.; Cobb, K.; Chen, P.; Lei, H.; Ruan, R. Un catalizador estructurado de espuma ZSM-5/SiC para el reciclaje químico de plásticos de desecho mediante pirólisis catalítica. Eng. Químico J. 2022, 440, 135836].

Gasificación

La gasificación convierte los materiales carbonosos en gases en su mayoría, y puede implementarse después de la pirólisis del carbón, el alquitrán y los productos gaseosos. (López, A.; de Marco, I.; Caballero, B.M.; Laresgoiti, M.F.; Adrados, A.; Aranzabal, A. Pirólisis catalítica de residuos plásticos con dos tipos diferentes de catalizadores: ZSM-5 zeolita y Red Mud. Aplaus. Catal. B Entorno. 2011, 104, 211–219) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337311001433>. El proceso de reciclaje de gasificación se muestra en **la Fig. 1 de la parte 3**. La gasificación se lleva a cabo a temperaturas que van desde 800 a 1500 °C, utilizando un agente de gasificación (vapor, aire u oxígeno (O₂)) en cantidades subestequiométricas, **52,77,85** lo que conduce a una combustión incompleta. **86** El proceso produce principalmente gas de síntesis, acompañado de CO₂, CH₄ y otros gases de hidrocarburos.

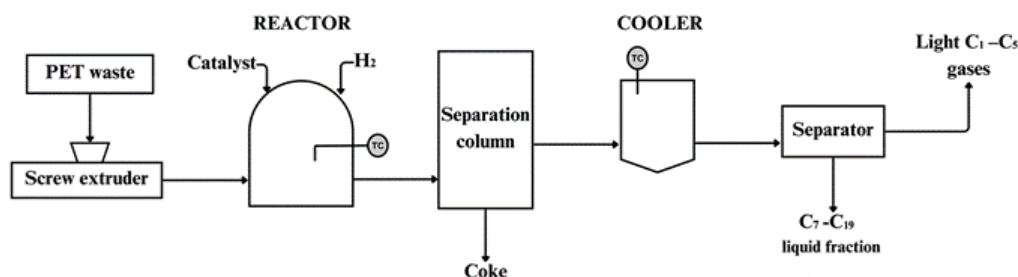
La gasificación con vapor produce gas de síntesis con un alto contenido de H₂, lo que lo hace muy adecuado para diversos propósitos de síntesis química. Sin embargo, este enfoque resulta en mayores niveles de alquitrán. Por el contrario, la gasificación con aire produce gas de síntesis que contiene una mayor concentración de CO, y el H₂ se usa a menudo en contextos relacionados con la energía como una alternativa viable al gas natural. López, A.; de Marco, I.; Caballero, B.M.; Laresgoiti, M.F.; Adrados, A.; Aranzabal, A. Pirólisis catalítica de residuos plásticos con dos tipos diferentes de catalizadores: ZSM-5 zeolita y Red Mud. Aplaus. Catal. B Entorno. 2011, 104, 211–219. El N₂ presente en el aire diluye los productos gaseosos, disminuyendo su valor calorífico. Nguyen, L.T.T.; Poinern, G.E.J.; Le, H.T.; Nguyen, T.A.; Tran, C.M.; Jiang, Z. Un LaFeO₃ catalizador de minerales naturales de arcilla apoyado para la pirólisis

eficiente de material plástico polipropileno. Asia-Pac. J. Eng. Químico 2021, 16, e2695. [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/apj.2695>].

El proceso de gasificación con O_2 es una opción más compleja y costosa; sin embargo, incluye los beneficios de los agentes de vapor y aire. (López, A.; de Marco, I.; Caballero, B.M.; Laresgoiti, M.F.; Adrados, A.; Aranzabal, A. Pirólisis catalítica de residuos plásticos con dos tipos diferentes de catalizadores: ZSM-5 zeolita y Red Mud. Aplaus. Catal. B Entorno. 2011, 104, 211–219). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337311001433>.

La gestión del contenido de alquitrán es de suma importancia en la gasificación de PET debido a su propensión a condensarse a bajas temperaturas e impedir el funcionamiento de los equipos de gasificación o los componentes del motor cuando el gas de síntesis resultante se utiliza para aplicaciones energéticas. **77,87** Para abordar este desafío, se han sugerido muchos enfoques, incluyendo una cuidadosa selección del catalizador y los aditivos del lecho, y la implementación de procesos de craqueo de alquitrán posteriores. Miandad, R.; Rehan, M.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Khan, H.; Ismail, I.M.I.; Dhavamani, J.; Gardy, J.; Hassanpour, A.; Nizami, A.-S. Pirólisis catalítica de residuos plásticos: avanzando hacia biorrefinerías basadas en pirólisis. Al frente. Reserva de energía. 2019, 7, 27. <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2019.00027/>.

Figura 27. Esquema del proceso de reciclaje de gasificación.



Nota. La fotografía muestra un esquema del proceso de reciclaje de gasificación. Tomado de *Schematic of the hydrocracking/hydrogenation recycling process (adapted with permission [Fotografía], por Elsevier, 2005, Copyright 2005* (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

4.2. Aplicación de zeolitas para la pirólisis catalítica del plástico.

PE, PP, PS y PET fueron pirolizados en presencia de zeolita HZSM-5 en un micropirolizador tandem. La pirólisis se realizó in situ y ex situ. La pirólisis catalítica in situ de los plásticos proporcionó una mayor cantidad de residuos sólidos y condujo a la producción de hidrocarburos aromáticos, con la excepción del PS. Durante la pirólisis catalítica ex situ de la PS, se produjo una gran cantidad de aromáticos en comparación con la pirólisis catalítica in situ, con una gran producción de estireno. En el caso de la PET, la

pirólisis catalítica in situ generó una gran cantidad de CO₂ y una pequeña cantidad de CO, en comparación con la pirólisis catalítica ex situ.

La pirólisis de PE y PP produjo cantidades comparables de alquenos y alcanos en pirólisis catalítica ex situ e in-situ, con la cantidad de alqueno producido superior al rendimiento de alcanos durante la pirólisis catalítica ex situ. Estos resultados muestran que la pirólisis catalítica in situ y ex situ de plásticos presenta mecanismos de reacción diferentes [Xue, Y.; Johnston, P.; Bai, X. Efecto del modo de contacto catalizador y la atmósfera gaseosa durante la pirólisis catalítica de plásticos de desecho. *Conversación de energía. Manag.* 2017, 142, 441–451]. Otro estudio que también confirmó que la pirólisis catalítica de los polímeros depende de las características químicas y físicas de los catalizadores, así como de la naturaleza química y estructural de los polímeros, fue reportado por Marcilla et al. [Marcilla, A.; Gómez-Siurana, A.; Berenguer, D. Estudio de la influencia de las características de diferentes sólidos ácidos en la pirólisis catalítica de distintos polímeros. *Aplaus. Catal. A Gen.* 2006, 301, 222–231.]

Colantonio et al. [68] investigaron la pirólisis de residuos plásticos de una instalación de recuperación de materiales. El objetivo de este estudio fue investigar el efecto del catalizador HUSY y del catalizador de hidrógeno zeolita socony mobil-5 (HZSM5) sobre la calidad de los productos de la pirólisis. El residuo plástico utilizado como alimento estaba compuesto por un 45% de PE, 30% de PP, 20% de PS y 5% de PET. El análisis termogravimétrico mostró que el HUSY reduce la temperatura de degradación de todos los polímeros plásticos, con el mayor efecto sobre las poliolefinas. HZSM5 mostró un efecto significativo en la degradación del PE.

La reacción de pirólisis se llevó a cabo en un reactor semilote de laboratorio a 370, 450 y 650 °C, basándose en análisis TG. El uso de zeolitas resultó en una reducción de la fracción de aceite pesado e inhibición de la formación de cera. HUSY mostró los mejores resultados en cuanto al rendimiento monoaromático, mientras que HZSM5 influyó en la producción de gases.

La pirolisis de residuos plásticos multicapa y resina mixta en presencia del catalizador zeolita ZSM-5 modificado con hierro fue examinada en el estudio realizado por Kremer et al. [Kremer, I.; Tomić, T.; Katančić, Z.; Erceg, M.; Papuga, S.; Vuković, J.P.; Schneider, D.R. Pirólisis catalítica y estudio cinético de plásticos de residuos del mundo real: tipos de plásticos de resina multicapa y mezclada. *Technol limpio. Entorno. Política* 2022, 24, 677–693]. El análisis FTIR mostró que el PET estaba presente en la parte exterior del envase, mezclado con PE y PP. Algunos envases también contenían pequeñas cantidades de PA.

El estudio mostró cómo la energía de activación de la pirólisis disminuye en presencia de un catalizador y que este reducía el contenido de compuestos poliaromáticos. El análisis cinético de la pirólisis de plásticos no reciclables y su influencia en el rendimiento del producto fue estudiado por Kremer et al. [Kremer, I.; Tomić, T.; Katančić, Z.; Erceg, M.; Papuga, S.; Vuković, J.P.; Schneider, D.R. Pirólisis catalítica y estudio cinético de plásticos de residuos del mundo real: tipos de plásticos de resina multicapa y

mezclada. Technol limpio. Entorno. Política 2022, 24, 677–693]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02196-8>.

En este estudio se utilizó residuos plásticos que no eran reciclables mecánicamente. Los residuos plásticos se separaban del PVC, de modo que los componentes principales de la materia prima utilizada eran PE, PET, PA, PP y una cantidad muy pequeña de PS. Se emplearon dos catalizadores diferentes en el proceso de pirólisis. El primer catalizador fue el FCC, y el segundo fue el óxido de hierro (III) (Fe)₂O₃) cargado en el soporte zeolito ZSM-5 (Fe-ZSM). La pirólisis se realizó en un reactor de cama fija, y los análisis TG y DTG se realizaron a 5, 10 y 15 °C. El estudio concluyó que el orden de degradación del polímero era PS < PET < PP < LDPE < HDPE.

La temperatura de descomposición del PS puro estaba en el rango entre 350 y 450 °C. La degradación del PET ocurre en el rango de temperatura entre 390 y 470 °C, mientras que el PP, LDPE y HDPE requieren las temperaturas más altas (450–510 °C) para su degradación. En presencia de catalizadores, la pirólisis de residuos plásticos es más rápida y la formación de cera se reduce evidentemente [Kremer, I.; Tomić, T.; Katančić, Z.; Erceg, M.; Papuga, S.; Vuković, J.P.; Schneider, D.R. Pirólisis catalítica y estudio cinético de plásticos de residuos del mundo real: tipos de plásticos de resina multicapa y mezclada. Technol limpio. Entorno. Política 2022, 24, 677–693]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02196-8>.

Otro estudio cinético sobre la pirólisis de polímeros plásticos de desecho (PP, PE, PET y PS) y tres mezclas sintéticas, que representan la mezcla de residuos plásticos postconsumo procedentes de instalaciones de recuperación, fue reportado por Tuffi et al. [Tuffi, R.; D'Abramo, S.; Cafiero, L.M.; Trinca, E.; Vecchio Cipriotti, S. Comportamiento térmico y cinética de degradación pirolítica de mezclas poliméricas a partir de plásticos de envases de desecho. Expreso Polym. Lett. 2018, 12, 82–99]. [Express Polymer Letters](#)

La volatilización que ocurre en un paso de pérdida de masa es completa para todos los polímeros probados, excepto el PET, debido a la formación de compuestos aromáticos complejos [Tuffi, R.; D'Abramo, S.; Cafiero, L.M.; Trinca, E.; Vecchio Cipriotti, S. Comportamiento térmico y cinética de degradación pirolítica de mezclas poliméricas a partir de plásticos de envases de desecho. Expreso Polym. Lett. 2018, 12, 82–99]. [Express Polymer Letters](#)

Una mejora notable en la producción de petróleo ligero en detrimento del alquitrán se obtuvo en un estudio reciente [Colantonio, S.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; Ippolito, Nuevo México; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Pirólisis térmica y catalítica de una mezcla sintética representativa de residuos plásticos de envases. Frente. Ciencias Químicas, Ingeniería. 2020, 14, 288–303. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11705-019-1875-3>. que llevó a cabo pirólisis catalítica de termoplásticos extraídos de equipos eléctricos y electrónicos de desecho (WEEE) utilizando diversos catalizadores preparados a partir de cenizas volantes. La degradación pirolítica de polímeros comunes encontrados en materiales de envasado fue estudiada recientemente en [Vouvoudi, E.C.; Achilias, D.S. Degradación pirolítica de polímeros comunes presentes en materiales de envasado.

J. Therm. Anal. Calorim. 2019, 138, 2683–2689. [ResearchGate](researchgate.net ResearchGate Profile].

La temperatura de agrietamiento afecta al tipo y número de segmentos producidos, siendo temperaturas más altas que favorecen la conversión de las cadenas poliméricas en monómeros y la liberación de moléculas más pequeñas, y temperaturas más bajas son más propensas a producir oligómeros.

Las zeolitas faujasitas (FAU) suelen inducir la formación de carbón debido a su gran volumen de cavidad donde pueden producirse reacciones secundarias [Santella, C.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; La Marca, F.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Pirólisis térmica y catalítica de una mezcla de plásticos procedentes de pequeños residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE). Waste Manag. 2016, 54, 143–152. [Google Scholar] [CrossRef].

El MCM-41 nanoporoso (materia de composición móvil nº 41), que posee propiedades adecuadas para aplicaciones catalíticas de polímeros, como el área específica y el tamaño del poro, puede usarse para la degradación de la PET [Araújo, S.A.; Araujo, A.S.; Fernandes, N.S.; Fernandes, V.J.; Ionashiro, M. Efecto del catalizador MCM-41 sobre la cinética de la descomposición térmica del poli(tereftalato de etileno). J. Therm. Anal. Calorim. 2010, 99, 465–469. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02196-8>.]. Se investigó el efecto de la forma de los poros en el rendimiento catalítico de las zeolitas durante la degradación del HDPE en presencia de varias zeolitas con diferentes tamaños de poros. Se obtuvieron buenos resultados (altas tasas de conversión de HDPE) utilizando zeolitas BEA y MFI, debido a sus poros curvados, que ralentizaron la desactivación catalítica debido al depósito de carbono, frustrando la formación de moléculas más largas. El bloqueo repentino de los poros lineales por una pequeña cantidad de depósito de carbono disminuyó la actividad de la zeolita MOR.

La zeolita de la FAU tenía grandes poros conectados a través de jaulas super, lo que permitía una mejor transferencia de masa y un alto rendimiento de líquidos. Por otro lado, la zeolita MWW tenía numerosos poros grandes que influían en la lenta difusión de productos agrietados, mejorando los rendimientos de pequeños hidrocarburos. Teniendo en cuenta todos estos hallazgos, se puede concluir que la forma de los poros de las zeolitas estudiadas fue un parámetro crucial para la determinación de la actividad catalítica y la selectividad del producto en la degradación de polímeros [Park, J.W.; Kim, J.H.; Seo, G. El efecto de la forma de los poros en el rendimiento catalítico de las zeolitas en la degradación en fase líquida del HDPE. Polym. Degradar. Apunala. 2002, 76, 495–501. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391002000599>.].

Se realizó pirolisis catalítica de HDPE en HZSM-5 y montmorillonita con columnas de hierro y alúmina (FAMO) en un reactor cónico de lecho con fuelle. Los sitios ácidos de los catalizadores afectan la actividad y los productos de la fisuración. Cuando el sitio ácido es más fuerte, la mezcla de hidrocarburos producida es más ligera. Dada la naturaleza voluminosa de los polímeros, otro factor importante para la actividad de los catalizadores es la disponibilidad de los sitios ácidos. En la pirolisis realizada con el catalizador HZSM-5, la alta actividad y alta selectividad de los gases podrían explicarse

por la fuerte acidez de la zeolita, relacionada con el fácil y completo acceso a sitios ácidos situados en su superficie externa.

Por otro lado, FAMO mostró baja selectividad hacia los gases, debido a la menor acidez del sitio catalizador. Sin embargo, cuando la pirólisis se realiza a una temperatura de 550 °C, el catalizador mostró un mejor rendimiento en la producción de productos de gama diésel [Borsella, E.; Aguado, R.; De Stefanis, A.; Olazar, M. Comparación del rendimiento catalítico de una montmorillonita con columnas de hierro y alúmina y zeolita HZSM-5 en un reactor de lecho con alv. J. Anal. Appl. Pirólisis 2018, 130, 320–331. [\[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237017305673\]](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237017305673).].

Garforth et al. [Garforth, A.A. Producción de hidrocarburos por degradación catalítica de polietileno de alta densidad en un reactor de lecho fluidizado de laboratorio. Aplaus. Catal. A Gen. 1998, 169, 331–342. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337311001433>.] han investigado la pirólisis catalítica del HDPE a temperaturas entre 290 y 430 °C en un reactor de lecho fluidizado utilizando catalizadores HZSM-5, H-mordenita zeolita HMOR, HUSY y SAHA.

Este estudio mostró que la grieta inicial del HDPE debe restringirse a la superficie exterior y las entradas de los poros de la zeolita, y los productos inicialmente agrietados posteriores se descomponen dentro del catalizador. Los catalizadores de zeolita, concretamente HZSM-5, HMOR y HUSY, fueron más efectivos en la conversión de polímeros en hidrocarburos volátiles que SAHA. Otro estudio centrado en la influencia del catalizador de zeolita (ZSM-5) y el barro rojo fue realizado por Lopez et al. [López, A.; de Marco, I.; Caballero, B.M.; Laresgoiti, M.F.; Adrados, A.; Aranzabal, A. Pirólisis catalítica de residuos plásticos con dos tipos diferentes de catalizadores: ZSM-5 zeolita y Red Mud. Aplaus. Catal. B Entorno. 2011, 104, 211–219. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337311001433>].

Se probaron ZSM-5 y barro rojo en una mezcla plástica que simulaba los residuos plásticos municipales. La pirólisis se realizó en un reactor semilote a 440 y 500 °C, respectivamente. El ZSM-5 produjo una mayor proporción de gases y líquidos con aromáticos en comparación con el proceso térmico. El barro rojo también mostró resultados positivos en la degradación de residuos plásticos, aunque se requirieron temperaturas más altas que en el proceso con ZSM-5 [López, A.; de Marco, I.; Caballero, B.M.; Laresgoiti, M.F.; Adrados, A.; Aranzabal, A. Pirólisis catalítica de residuos plásticos con dos tipos diferentes de catalizadores: ZSM-5 zeolita y Red Mud. Aplaus. Catal. B Entorno. 2011, 104, 211–219. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337311001433>].

4.3. Aplicación de catalizadores naturales para la pirólisis plástica.

Para hacer que la pirólisis catalítica sea más asequible, es necesario reducir los costes de los catalizadores, ya que escalar el proceso a escala continua requiere una gran cantidad de catalizadores que influyen aún más en el coste total del proceso [Anantharaman, A.P.; Pillai, N.S. Catalizador heterogéneo para la pirólisis y producción de biodiésel. En Biocombustibles Líquidos, 1ª ed.; Shadangi, K.P., Ed.; Wiley: Nueva York, NY, EE. UU., 2021; pp. 77–118. Disponible en línea: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119793038.ch3>. (consultado el 30 de septiembre de 2022)]. Las zeolitas ricas en sílice de origen natural (clinoptilolita y mordenita) pueden utilizarse para la pirólisis plástica [Siddiqui, M.Z.; Park, Y.K.; Kang, Y.; Watanabe, A.; Kim, S.; Kim, Y.M. Uso eficaz del laminado aluminio-plástico como materia prima para la pirólisis catalítica frente a catalizadores micro y mesoporosos. J. Limpia. Prod. 2019, 229, 1093–1101. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619315057>.]].

Varios estudios examinaron detenidamente la aplicación de zeolitas naturales [78,79,80,81]. Las zeolitas naturales suelen tener impurezas como Na, Mg, Ca, K, Ti y Fe que pueden promover reacciones adicionales, por lo que no podrían usarse para el proceso a mayor escala [[Siddiqui, M.Z.; Park, Y.K.; Kang, Y.; Watanabe, A.; Kim, S.; Kim, Y.M. Uso eficaz del laminado aluminio-plástico como materia prima para la pirólisis catalítica frente a catalizadores micro y mesoporosos. J. Limpia. Prod. 2019, 229, 1093–1101. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619315057>.]].

Las arcillas pueden usarse como catalizadores para la degradación del plástico. Sin embargo, requieren temperaturas más altas para la pirólisis que las zeolitas. Las arcillas actúan como catalizadores sólidos de ácidos y se han utilizado en la industria petrolera antes de que se descubrieran las zeolitas. Debido a su precio y disponibilidad asequibles, las arcillas fueron estudiadas y aplicadas extensamente para el proceso de pirólisis plástica. La acidez y actividad de las arcillas pueden mejorarse mediante el pilar (PILC) y, posteriormente, aplicando un tratamiento ácido.

La arcilla estratificada forma una red porosa bidimensional, con un tamaño microporoso mayor que las zeolitas. Los PILC tienen una cuadrícula de vacíos y no son tan flexibles como las arcillas madre [Moorthy Rajendran, K.; Chintala, V.; Sharma, A.; Pal, S.; Pandey, J.K.; Ghodke, P. Revisión de materiales catalizadores en la obtención de combustibles hidrocarburos líquidos a partir de residuos plásticos mixtos municipales (MMPW). Importa. Hoy Commun. 2020, 24, 100982. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492819311080>.]].

Los plásticos mixtos (HDPE, PS, PP y PET) han sido pirolizados en presencia de arcillas pilares modificadas (PILC) y Al-PILC [Li, K.; Lei, J.; Yuan, G.; Weerachanchai, P.; Wang, J.Y.; Zhao, J.; Arcillas con pilares Yang, Y. Fe-, Ti-, Zr- y Al para pirólisis catalítica eficiente de plásticos mixtos. Eng. Químico J. 2017, 317, 800–809. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894717302759>.]].

Budsareechai et al. [Budsareechai, S.; Hunt, A.J.; Ngernyen, Y. Pirólisis catalítica de residuos plásticos para la producción de combustibles líquidos para motores. RSC Adv. 2019, 9, 5844–5857. <https://pubs.rsc.org/ra/article/9/10/5844/621139/Catalytic-pyrolysis-of-plastic-waste-for-the>] han investigado la aplicación de arcilla bentonita granulada como catalizador para la pirólisis de PS, PP, LDPE y HDPE. Como se ha mencionado anteriormente, el PS contiene principalmente hidrocarburos aromáticos (gama de gasolina), mientras que los hidrocarburos alifáticos más largos (para motores diésel) están presentes en PP, LDPE y HDPE. La forma granulada de catalizadores elimina la caída de presión y reduce el tiempo de procesamiento por pirólisis. Además, debido a la alta acidez del catalizador de bentonita, no se forma cera durante el proceso.

Auxilio et al. realizaron experimentos con cinco catalizadores zeolíticos y a base de arcilla (catalizadores y arcilla a base de zeolita granulados y polvo) para la pirólisis de HDPE virgen, residuos de HDPE y residuos plásticos mixtos. Se detectó y monitorizó un proceso termocatalítico de dos etapas en un reactor a escala de banco, con un sistema de alimentación continua. Este trabajo expuso información importante para el posible proceso de ampliación: el diésel puede producirse mediante craqueo termocatalítico en dos etapas, optimizando la composición del plástico residual.

La acidez de los catalizadores es crucial para alcanzar una buena selectividad de la fracción de hidrocarburos, ya que una acidez mayor conduce a la formación de gasolina, mientras que una acidez más baja a suave conduce a la formación de diésel.

Además, el volumen de mesóboros es un factor importante para evitar el coque catalizador, especialmente cuando el volumen de mesóboro es pequeño y la formación de coque es más prominente; una forma granulada del catalizador es favorable frente a una forma en polvo, porque evita la gran caída de presión en la columna de destilación reactiva [Auxilio, A.R.; Choo, W.L.; Kohli, I.; Chakravartula Srivatsa, S.; Bhattacharya, S. Un estudio experimental sobre la pirólisis termocatalítica de residuos plásticos utilizando un pirolizador continuo. Waste Manag. 2017, 67, 143–154. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17303136>.]].

Cinco tipos diferentes de plástico (HDPE, LDPE, PP, PS y PET) se mezclaron y pirolisaron en un reactor de cama fija (temperatura de hasta 400 °C, 90 min). Se utilizaron catalizadores naturales (arcillas y dolomita) y un catalizador sintético (óxido de zinc granulado) para la pirólisis plástica.

Basándose en los cálculos de rendimientos líquidos y gaseosos, el estudio ha concluido que el uso de catalizadores naturales no proporciona una cantidad significativamente diferente de rendimientos de combustible en comparación con catalizadores sintéticos [Kyaw, K.T.; Hmwe, C.S.S. Efecto de varios catalizadores en el proceso de pirólisis de combustible de residuos plásticos mixtos. Int. J. Ing. Abogado Technol. 2015, 8, 794–802. [<https://www.proquest.com/openview/5244b40561785593e77c906355ca14f9/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=1486350>.]].

La pirólisis térmica y catalítica de PP, LDPE y HDPE, así como mezclas de estos tres materiales, se llevaron a cabo en un reactor por lotes, en presencia de bentonita calcia. La presencia de un catalizador aceleró la reacción y mejoró la calidad de la fracción condensable. Además, el tiempo de reacción disminuyó con el aumento de la concentración del catalizador.

Esto significa que la velocidad de reacción aumentaba al aumentar la concentración del catalizador, debido a la alta superficie y a la acidez del catalizador. La proporción ideal catalizador-plástico es de 1:3 a 500 °C [Nguyen, L.T.T.; Poinern, G.E.J.; Le, H.T.; Nguyen, T.A.; Tran, C.M.; Jiang, Z. Un LaFeO₃ catalizador de minerales naturales de arcilla apoyado para la pirólisis eficiente de material plástico polipropileno. Asia-Pac. J. Eng. Químico 2021, 16, e2695. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/apj.2695>.]. Utilizando esta proporción óptima, se obtuvieron los rendimientos más altos de líquidos: 88,5% en peso para PP, 82% en peso para LDPE, 82,5% en peso para HDPE y 81% en peso para plásticos mixtos [[Nguyen, L.T.T.; Poinern, G.E.J.; Le, H.T.; Nguyen, T.A.; Tran, C.M.; Jiang, Z. Un LaFeO₃ catalizador de minerales naturales de arcilla apoyado para la pirólisis eficiente de material plástico polipropileno. Asia-Pac. J. Eng. Químico 2021, 16, e2695. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/apj.2695>.].

Nguyen et al. [Nguyen, L.T.T.; Poinern, G.E.J.; Le, H.T.; Nguyen, T.A.; Tran, C.M.; Jiang, Z. Un LaFeO₃ catalizador de minerales naturales de arcilla apoyado para la pirólisis eficiente de material plástico polipropileno. Asia-Pac. J. Eng. Químico 2021, 16, e2695. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/apj.2695>.] realizó un estudio interesante en el que se realizó la pirólisis de residuos plásticos de PP en presencia de NCM de minerales arcillosos naturales, con LaFeO₃ se estudió nanopartículas. La degradación de la PP se investigó mediante termogravimetría (TG) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Los resultados mostraron que la pirólisis de la PP se produce entre 460 y 480 °C, y se observó la formación de coque en la superficie del catalizador. El estudio también informó que, en presencia del catalizador, el componente de agrietamiento consistía en el 49,3% y 34,4% de alquenos y alcanos, respectivamente. Recientemente, se ha publicado en la literatura una visión general completa de la pirólisis de poliestireno [Maafa, I. Pirólisis de residuos de poliestireno: una reseña. Polímeros 2021, 13, 225. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/2/225>.]. También se discutieron los efectos de la temperatura, el tipo de reactor y los catalizadores sobre el rendimiento del petróleo. Cuando se utilizan catalizadores de bentonita para la pirólisis de la PS, se forman principalmente compuestos de estireno. Por otro lado, los catalizadores de zinc promovían una mejor selectividad de los productos finales, mientras que el catalizador FCC gastado era altamente eficiente en la producción de rendimientos líquidos. El óxido de calcio representa un catalizador económico y muy eficaz en la despolimerización del PS en compuestos de estireno.

Miandad et al. [Miandad, R.; Rehan, M.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Khan, H.; Ismail, I.M.I.; Dhavamani, J.; Gardy, J.; Hassanpour, A.; Nizami, A.-S. Pirólisis catalítica de residuos plásticos: avanzando hacia biorrefinerías basadas en pirólisis. Al frente. Reserva de energía. 2019, 7, 27. <https://www.frontiersin.org/journals/energy->

[research/articles/10.3389/fenrg.2019.00027/.](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421007548)] utilizó una zeolita natural modificada como catalizador para la pirólisis de plásticos que contienen PP, PS, PET y PE. Para mejorar las propiedades catalíticas, se trataron zeolitas naturales de Arabia Saudí mediante un novedoso proceso de activación térmica seguido de un tratamiento ácido con HNO₃.

La degradación del PET y el PE requiere temperaturas más altas en comparación con otros tipos de plástico. El PE es una estructura de rama de cadena larga y su degradación ocurre mediante escisión aleatoria de cadenas, que requiere una temperatura alta. La descomposición de la PET sigue la escisión aleatoria del enlace éster, donde se forman oligómeros como compuestos resultantes. La mayor cantidad de aceite líquido se obtiene mediante la pirólisis catalítica de PS en comparación con las obtenidas mediante la degradación catalítica de PE y PP.

El aceite líquido producido a partir de la pirólisis catalítica con dos catalizadores seleccionados mostró un alto contenido aromático con compuestos alifáticos y otros compuestos hidrocarburoados. Los aceites líquidos obtenidos tenían valores caloríficos (HHV) más altos en la gama del diésel convencional.

Dai et al. [Dai, L.; Zhou, N.; Lv, Y.; Cobb, K.; Cheng, Y.; Wang, Y.; Liu, Y.; Chen, P.; Zou, R.; Lei, H.; y demás. Pirólisis-catálisis para la conversión de poliolefinas de desecho en nafta de baja aromático. *Conversación de energía. Manag.* 2021, 245, 114578. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421007548>.] han estudiado la conversión de residuos de poliolefina en nafta de bajo contenido aromático en un reactor de pirólisis por microondas. Se analizaron varios catalizadores para elegir el mejor para la conversión del HDPE en olefinas de cadena más corta con la menor selectividad aromática. SBA-15 de sílice mesoporosa (SiO₂) se probaron catalizadores metálicos soportados (Al, Co, Ni, Zn, etc.) para el proceso de pirólisis. Entre los catalizadores probados, el Zn/SBA resultó ser el candidato más prometedor para la pirólisis de poliolefinas. La integración de ZnO alteró la estructura mesoporosa del catalizador SBA-15 (Santa Barbara Amorfo) y aumentó su acidez. Esto llevó a una mayor actividad catalítica para la conversión de poliolefinas en cadenas hidrocarboníferas más cortas con baja selectividad aromática. En el mismo estudio, también se analizaron las zeolitas y se compararon sus rendimientos con los de la SBA-15 para la pirólisis de poliolefinas. En particular, se eligieron USY y ZSM-5 para esta reacción. En comparación con los catalizadores SBA-15, las zeolitas parecen tener un mejor rendimiento de craqueo, pero los principales componentes del aceite líquido eran hidrocarburos aromáticos, que no son adecuados para convertir nafta en monómeros plásticos [Dai, L.; Zhou, N.; Lv, Y.; Cobb, K.; Cheng, Y.; Wang, Y.; Liu, Y.; Chen, P.; Zou, R.; Lei, H.; y demás. Pirólisis-catálisis para la conversión de poliolefinas de desecho en nafta de baja aromático. *Conversación de energía. Manag.* 2021, 245, 114578.]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421007548>.

El hidrocracking de LDPE se monitorizó sobre nanopulvos comerciales de circonia con una cantidad fija de sulfato y varias cantidades de Pt [Mark, L.O.; Cendejas, M.C.; Hermans, yo. El uso de catálisis heterogénea en la valoración química de residuos plásticos. *Química Sus. Química.* 2020, 13, 5808–5836]. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cssc.202001905>

La adición de Pt sobre la circonia sulfatada resultó en un aumento de la acidez del catalizador y una reducción de la cristalinidad del ZrO₂. Como consecuencia, cuando se usaban concentraciones más altas de Pt, la producción de gasolina aumentaba.

4.4. Aplicación de otros tipos de catalizadores para la pirólisis catalítica del plástico.

Cocchi et al. [Cocchi, M.; Angelis, D.D.; Mazzeo, L.; Nardozi, P.; Piemonte, V.; Tuffi, R.; Cipriotti, S.V. Pirólisis catalítica de un residuo plástico residual utilizando zeolitas producidas por ceniza volante de carbón. *Catalizadores* 2020, 10, 1113.] realizaron un estudio interesante, donde el residuo de película plástica (PFR) del reciclaje de residuos plásticos (residuo de mezcla de poliolefinas) fue pirolizado en presencia de ceniza volante de carbón (CFA) y zeolitas derivadas del CFA, con el objetivo de investigar el efecto del catalizador sobre los rendimientos y la calidad de los aceites obtenidos. Las zeolitas derivadas del CFA se produjeron a partir del CFA fundiéndose en presencia de NaOH, seguidas de un método hidrotermal NaX/CFA, y por una acidificación adicional HX/CFA. Los mejores resultados se lograron con HX/CFA, ya que redujo la contribución endotérmica y, al mismo tiempo, mejoró el rendimiento de gas y petróleo, así como la selectividad hacia los productos de gama de gasolina.

Se encontraron muchos ejemplos en la literatura donde se consideró la pirólisis térmica y catalítica de residuos plásticos y se compararon sus prestaciones. En esta sección se presenta un breve repaso de algunos de los resultados más relevantes. La pirólisis térmica de PP y HDPE fue investigada por Ahmad et al. [Utami, M.; Wijaya, K.; Trisunaryanti, W. La circonia sulfatada promovió la PT como catalizador para el hidrocracking de residuos plásticos de LDPE en combustibles líquidos. *Mater. Química, Física.* 2018, 213, 548–555.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058418302189>. realizando la reacción de pirólisis en un microrreactor de acero.

La conversión para PP fue del 98,66% (líquido: 69,82%, gas: 28,84% y residuo: 1,34%) a 300 °C, mientras que la conversión para HDPE a 350 °C también fue alta, 98,12% (líquido: 80,88%, gas: 17,24% y residuo: 1,88%). Ambos líquidos obtenidos por pirólisis de PP y HDPE mostraron criterios similares a combustibles.

4.5. Comparación entre pirólisis térmica y catalítica.

La degradación térmica y la pirólisis catalítica de plásticos de descargo reales y componentes plásticos individuales (PE, PP, PS y PET) fueron estudiadas por Muhammad et al. [91]. La pirólisis se realizó en un reactor de lecho fijo, y se utilizó la zeolita HZSM-5 como catalizador. La muestra de materia prima del plástico real contenía principalmente PE, PP y PET. La pirólisis térmica de residuos plásticos produjo una alta cantidad de aceite/cera (81–97 en wt.). Con la adición de un catalizador, la cantidad de aceite/cera disminuyó a entre 44 y 51 % en peso. El análisis TG de polímeros plásticos individuales mostró que la temperatura de degradación de PS es de alrededor de 420 °C, que es inferior a la de PET y PP (alrededor de 480 °C).

La pirólisis térmica y catalítica de residuos de HDPE se estudió bajo una atmósfera inerte a 450 °C en un reactor de lecho compacto [Utami, M.; Wijaya, K.; Trisunaryanti, W. La circonia sulfatada promovió la PT como catalizador para el hidrocracking de residuos plásticos de LDPE en combustibles líquidos. *Mater. Química, Física*. 2018, 213, 548–555.]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058418302189>.

Se probaron varios materiales de la cama (arena, cemento y arcilla blanca) para investigar la grietación térmica del HDPE. Se utilizaron hidróxido de sodio, HUSY y H β zeolita para potenciar la pirólisis del HDPE. El mayor rendimiento de líquidos durante la degradación térmica del HDPE (82%) se obtuvo utilizando un reactor de lecho de polvo. En la pirólisis catalítica, cada catalizador fue examinado con cada tipo de lecho del reactor. El rendimiento de los productos cambiaba cuando se usaban HUSY o H β como catalizadores, con el cambio del material del lecho del reactor. Otro estudio en el que los plásticos fueron procesados mediante pirólisis térmica y catalítica fue reportado por Saeung et al. [Obeid, F.; Zeaiter, J.; Al-Muhtaseb, A.H.; Bouhadir, K. Pirólisis termocatalítica de botellas de polietileno de residuos en un reactor de lecho compacto con diferentes materiales y catalizadores. *Conversación de energía. Manag.* 2014, 85, 1–6.]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041400346X>. En este estudio se obtuvieron HDPE, LDPE, PP y PLA. Se estudió el efecto de la temperatura de la pirólisis y el catalizador sobre la composición y el rendimiento del líquido. La pirólisis térmica de HDPE y LDPE produjo grandes cantidades de ceras.

Por otro lado, la degradación térmica del PP y el PLA llevó a la formación de líquidos y ceras. Las curvas TG de HDPE, LDPE y PP mostraron solo un paso de pérdida de masa entre 400 y 500 °C, debido a los enlaces químicos similares entre las estructuras moleculares. Además, solo se espera un paso en la curva TG de PLA, pero a temperaturas más bajas (300–400 °C). Las temperaturas máximas de degradación se encontraron en 490, 473, 454 y 371 °C para HDPE, LDPE, PP y PLA, respectivamente. La diferencia en las temperaturas de degradación puede atribuirse a la estructura química de cada tipo de plástico.

El HDPE tiene una estructura lineal, mientras que el LDPE es más ramificado. Como consecuencia, la transferencia de calor puede favorecerse dentro de esta última matriz.

En otro estudio [Quesada, L.; Calero de Hoces, M.; Martín-Lara, M.A.; Luzón, G.; Blázquez, G. Rendimiento de diferentes catalizadores para el agrietamiento in situ de ceras oleosas obtenidos por la pirólisis de residuos de película de polietileno. *Sostenibilidad* 2020, 12, 5482.] <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/13/5482>, los autores utilizaron residuos de película de polietileno y diferentes catalizadores, con el objetivo de investigar la influencia de su presencia en la formación de aceite líquido de alta calidad.

Los mejores resultados, en cuanto a la reducción de la consistencia de cera, se obtuvieron utilizando HUSY, Zeoccelcliopilolita, HBEA y Na-Y-Geace.

La pirólisis térmica y catalítica de LDPE, HDPE y PP, así como mezclas de LDPE y PP, se realizaron bajo una atmósfera de nitrógeno en un reactor por lotes a escala de laboratorio a 460 °C. Para la prueba de pirólisis catalítica, se utilizó un catalizador tipo zeolita.

La aplicación de un catalizador redujo la temperatura de degradación de los polímeros, lo que implicó una reducción del consumo energético del proceso. El craqueado térmico de PP produjo aproximadamente el 86 y 94% en peso de líquidos para PP y LDPE, respectivamente [Anene, A.; Fredriksen, S.; Sætre; Tokheim, L.A. Estudio experimental de pirólisis térmica y catalítica de componentes de residuos plásticos. *Sostenibilidad* 2018, 10, 3979. [<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/11/3979>]. También se investigó el efecto de la fracción catalizadora (Y zeolita ácida ultraestable en polvo—HUSY) sobre la pirólisis del HDPE [94]. El estudio mostró cómo cambia la conversión a productos volátiles con la fracción catalizadora en el sistema con dos temperaturas diferentes de reactor (693 y 643 K), bajo una atmósfera de nitrógeno durante 25 minutos. Se encontró que a 643 K la fracción catalizadora del 11 o 20% no era suficiente para la reacción completa del polímero. Cuando la temperatura aumentaba a 693 K, la conversión disminuía cuando se incrementaba la fracción catalizadora. A esta temperatura, el 11% de catalizador era suficiente para completar toda la conversión del polímero. Añadir más catalizador tendría el efecto negativo de convertir más polímero en coque.

Las reacciones secundarias se producían cuando la concentración de los sitios ácidos de fracciones catalizadoras más altas era alta. Además, se detectó la sobredescomposición de los productos primarios en moléculas más pequeñas, debido a las reacciones secundarias, de modo que se obtuvieron más productos gaseosos. En consecuencia, la distribución del producto se desplazó hacia hidrocarburos más ligeros. Raveh-Amitet et al. [Gulab, H.; Jan, M.R.; Shah, J.; Manos, G. Pirólisis catalítica plástica a combustibles como método terciario de reciclaje de polímeros: efecto de las condiciones del proceso. *J. Medio Ambiente Ciencias de la Salud Parte A* 2010, 45, 908–915. https://www.researchgate.net/publication/43343898_Plastic_catalytic_pyrolysis_to_fuels_as_tertiary_polymer_recycling_method_Effect_of_process_conditions.] han examinado la pirólisis térmica y catalítica del HDPE con ZSM-5 y Zeolita Y.

La descomposición del HDPE también se monitorizó con y sin catalizadores usando TG. Entre las zeolitas probadas, ZSM-5 [25] provocó la disminución más significativa de la temperatura de descomposición. Este resultado merece la pena señalar, ya que una disminución de la temperatura conduce a un menor consumo energético. Susatriawan et al. [Panda, también conocido como Singh, R.K.; Mishra, D.K. Termólisis de plásticos de desecho a combustible líquido Un método adecuado para la gestión de residuos plásticos y la fabricación de productos de valor añadido: Una perspectiva mundial. Renueva. Sostener. Energy Rev. 2010, 14, 233–248. [https://www.researchgate.net/publication/227421226_Thermolysis_of_waste_plastics_to_liquid_fuel_A_suitable_method_for_plastic_waste_management_and_manufacture_of_value_added_products--A_world_prospective.] han investigado los efectos del tamaño de la zeolita durante la ocurrencia de la pirólisis de LDPE. Se concluyó que el menor tamaño de la zeolita influía tanto en las velocidades de transferencia de calor como en la pirólisis, la temperatura de la pirólisis, la velocidad de reacción y el rendimiento del petróleo.

Los plásticos de residuos eléctricos y electrónicos, especialmente los WEEE, también pueden ser pirolizados para obtener rendimientos de petróleo. En el estudio de Santella et al. [Santella, C.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; La Marca, F.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Pirólisis térmica y catalítica de una mezcla de plásticos procedentes de pequeños residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE). Waste Manag. 2016, 54, 143–152] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16302343>.este tipo de residuos fue pirolizado en un reactor semilote a escala de laboratorio.

El plástico fue pirolizado térmica y catalíticamente. HUSY y HZSM-5 se utilizaron como catalizadores en la carrera catalítica, a una temperatura de 400 °C. La prueba térmica se realizó a 400, 600 y 800 °C. Los mayores rendimientos de aceite se obtuvieron en presencia de HZSM-5, y a 600 y 800 °C sin catalizadores. Se recogieron más partículas sólidas cuando se utilizó HUSY.

La presencia de catalizadores contribuyó a alcanzar mayores rendimientos de petróleo más ligero y viscoso, y los productos contenían una mayor concentración de monoaromáticos en condiciones catalíticas, en comparación con el aceite producido en la producción de pirólisis térmica. El plástico de polipropileno de desesperación fue tratado con procesos pirolíticos (térmicos y catalíticos) utilizando un reactor por lotes y FCC como catalizador.

La pirolisis térmica proporcionó la máxima cantidad de aceite líquido, mientras que la pirólisis catalítica redujo su rendimiento y aumentó el del gas [Aisien, E.T.; Otuya, I.C.; Aisien, F.A. Pirólisis térmica y catalítica de plástico polipropileno de desecho usando catalizador FCC gastado. Entorno. Technol. Innov. 2021, 22, 101455.]. Finalmente, Onwudili et al. [98] utilizaron zeolitas FCC, Y y ZSM-5 para la pirolis catalítica de una mezcla plástica que contenía HDPE, LDPE, PP, PS y PET que simulaba residuos sólidos municipales. La aplicación de catalizadores resultó en un aumento del rendimiento gasoso y una disminución del del petróleo.

4.6. Efectos de simetría molecular en procesos de pirólisis.

No existen estudios en la literatura que se centren específicamente en la relevancia de la simetría molecular en la pirólisis de plásticos. Sin embargo, se pueden extraer algunas conclusiones basándose en la investigación realizada sobre los efectos de la simetría molecular y los problemas estéricos y geométricos causados por diferentes moléculas sometidas a procesos de pirólisis, especialmente en presencia de catalizadores. En esta sección se presentan ejemplos relevantes y se discuten críticamente los resultados.

Varios estudios han explorado los diferentes aspectos de la simetría molecular de ciertas moléculas cuando la pirólisis se realiza bajo distintas condiciones experimentales. En el estudio de Serinyel et al. [99], se realizó la pirólisis de los cuatro éteres simétricos, éter dietílico (DEE), di-n-propiléter (DPE), di-isopropiléter (DIPE) y éter di-n-butílico (DBE), en un reactor agitado por chorro, y los principales productos fueron CO, CH₄, H₂, y C₂H₄.

Además, todos los éteres producían el alcohol n/2 y la olefina como resultado de una reacción molecular (en pequeña medida). Este estudio tenía como objetivo aportar nueva información cinética sobre el análisis de productos de los cuatro éteres simétricos.

Otro estudio trató sobre descomposiciones pirolíticas de compuestos organotelurios (II) simétricos e asimétricos: Pr₂Te, di-tert-butilo telururo Bu₂Te, (allyl)₂Te, (2-metilalmente)₂Te, y (3-metil-3-butenilo)₂Te. Se aplicó una combinación de cromatografía de gases y cromatografía de gases/espectroscopía de masas, y se descubrió que la descomposición pirolítica ocurre mediante homólisis de enlaces [Kirss, R.U.; Brown, D.W.; Higa, K.T.; Gedridge, R.W. Vías de pirólisis de compuestos organotelurium(II) simétricos e asimétricos. *Organometálicos* 1991, 10, 3589–3596.]. <https://pubs.acs.org/orgnd7/article-abstract/10/10/3589/1280486/Pyrolysis-pathways-of-symmetrical-and?redirectedFrom=fulltext>.

En los últimos años, muchos autores centraron su atención en el análisis de la cinética de degradación de polímeros y residuos plásticos [Eimontas, J.; Striūgas, N.; Abdelnaby, M.A.; Yousef, S. Comportamiento cinético catalítico de la pirólisis y análisis TG-FTIR-GC-MS de plásticos metalizados de envases alimentarios con diferentes concentraciones de catalizador ZSM-5 zeolita. *Polímeros* 2021, 13, 702. [<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/5/702>]. En el estudio de Tian et al. [Tian, L.; Shen, B.; Xu, H.; Li, F.; Wang, Y.; Singh, S. Comportamiento térmico de la pirólisis de té de desecho mediante análisis TG-FTIR. *Energía* 2016, 103, 533–542.]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16302343>], se investigó el comportamiento cinético y la liberación de gases evolucionados durante la pirólisis del té de desecho mediante la técnica TG-FTIR. En lo que respecta al análisis cinético, se seleccionaron tres modelos libres de modelo y tres modelos de ajuste de modelos para describir el mecanismo del proceso de pirólisis. Los resultados mostraron que el modelo de difusión tridimensional (simetría esférica) (D3) encaja bien para modelar el mecanismo de pirólisis del té de desecho.

También se determinaron mecanismos de difusión para la cinética de reacción de la degradación de materiales nanocompuestos basados en copolímeros de estireno y metacrilato de n-butilo con óxido de grafeno o óxido de grafeno funcionalizado [Tsagkalias, I.S.; Vlachou, A.; Verros, G.D.; Achilias, D.S. Efecto del óxido de grafeno o óxido de grafeno funcionalizado en la cinética de copolimerización del estireno/n-butil metacrilato. *Polímeros* 2019, 11, 999.]. <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/6/999>.

Haas y Ring [Haas, C.H.; Ring, M.A. Reacción del radical sililo y silileno con acetileno y aplicación de simetría orbital a la pirólisis de silano y disilano. *Inorg. Química*. 1975, 14, 2253–2256.]. <https://pubs.acs.org/orgnd7/article-abstract/10/10/3589/1280486/Pyrolysis-pathways-of-symmetrical-and?redirectedFrom=fulltext>. , examinaron la degradación térmica de SiH_4 y Si_2H_6 en presencia de C_2H_2 . Esta descomposición fue analizada considerando principios de simetría orbital. La actividad de un catalizador está determinada principalmente por su estructura. Sin embargo, debido a que los catalizadores presentan cierto grado de porosidad y que dichos poros poseen una geometría irregular, resulta difícil analizar en este caso los efectos de la simetría en los catalizadores.

En la pirólisis de macromoléculas como el plástico de descargo u otro material, donde el objetivo es producir diésel o petróleo, el tamaño de los poros de las zeolitas es crucial, ya que permite (o no) la difusión de compuestos pesados.

Como ya se ha señalado (Sección 3.2), las zeolitas son microporosas, pero existe la posibilidad de formar mesóporos para superar esta limitación. Una posibilidad es utilizar tensioactivos orgánicos durante la síntesis de zeolitas.

Otra opción es la dealuminación, que se asocia con el daño de la matriz cristalina y la disminución de los sitios activos de ácido [Zhou, N.; Dai, L.; Lyu, Y.; Wang, Y.; Li, H.; Cobb, K.; Chen, P.; Lei, H.; Ruan, R. Un catalizador estructurado de espuma ZSM-5/SiC para el reciclaje químico de plásticos de desecho mediante pirólisis catalítica. *Eng. Químico J.* 2022, 440, 135836. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894722013365>.

Un catalizador estructurado de espuma ZSM-5/SiC para el reciclaje químico de plásticos de desecho mediante pirólisis catalítica. *Eng. Químico J.* 2022, 440, 135836]. El tamaño de los poros es un factor importante para determinar los productos y reactivos que pueden alcanzar los sitios activos del catalizador [Haas, C.H.; Ring, M.A. Reacción del radical sililo y silileno con acetileno y aplicación de simetría orbital a la pirólisis de silano y disilano. *Inorg. Química*. 1975, 14, 2253–2256.]. <https://pubs.acs.org/orgnd7/article-abstract/10/10/3589/1280486/Pyrolysis-pathways-of-symmetrical-and?redirectedFrom=fulltext>.

Un esquema básico de degradación del polímero en presencia de un catalizador ácido se presenta en la Figura 3. El agrietamiento térmico tiene lugar en la superficie exterior del catalizador sólido, mientras que los poros internos actúan como canales para el paso selectivo y la posterior descomposición de hidrocarburos más grandes.

Como consecuencia, los gases se producen principalmente en los poros pequeños, mientras que las ceras se producen en el lado exterior del catalizador. En la superficie del catalizador se producen hidrocarburos de bajo peso molecular que son volátiles a la temperatura de reacción y pueden difundirse a través de la película polimérica fundida como productos finales, o pueden reaccionar más allá dentro de los poros.

La reacción catalítica se mejora mediante catalizadores microporosos, que producen gases y reducen el rendimiento del producto líquido, con mejor calidad que en el caso de la pirólisis catalítica con macroporos [Dwivedi, P.; Mishra, P.K.; Mondal, M.K.; Srivastava, N. Pirólisis de residuos poliméricos no biodegradables para recuperación de energía. *Heliyon* 2019, 5, e02198.]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894717302759>.

La estructura porosa es importante cuando se utilizan catalizadores in situ [López, G.; Artetxe, M.; Amutio, M.; Bilbao, J.; Olazar, M. Rutas termoquímicas para la valoración de plásticos poliolefinicos de desecho para producir combustibles y productos químicos. Una reseña. *Renueva. Sostener. Energy Rev.* 2007, 73, 346–368] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117301521>, . Si se utiliza el catalizador directamente, la recuperación del material, que es uno de los principales objetivos [Tomić, T.; Kremer, I.; Vecchio Cipriotti, S.; Schneider, D.R. Eficiencia de la cadena de recuperación de residuos municipales de envases y idoneidad de fracciones residuales separadas para su uso en la producción de combustibles alternativos. *J. Entorno. Manag.* 2022, 322, 116056.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894722013365>. , es difícil, porque los poros del catalizador están bloqueados, ya que la materia prima plástica se vuelve pegajosa. Sin embargo, cuando se utilizan catalizadores directamente, la calidad de los aceites líquidos obtenidos mejora mejorada, pero se favorece la formación de coque o impurezas.

La estructura porosa tridimensional del catalizador ZSM-5 resulta en una menor deposición de coque debido a la circulación de coque aromática, precursora de la parte externa de los microporos de zeolita. El aumento de la superficie mejora la interacción entre el catalizador y el gas de pirólisis, lo que provoca la fisuración en productos gaseosos. La Y zeolita tiene una gran superficie y contribuye a la formación de productos gaseosos, mientras que un catalizador natural con una superficie baja favorece la formación de productos líquidos. [Anantharaman, A.P.; Pillai, N.S. Catalizador heterogéneo para la pirólisis y producción de biodiésel. En *Biocombustibles Líquidos*, 1ª ed.; Shadangi, K.P., Ed.; Wiley: Nueva York, NY, EE. UU., 2021; pp. 77–118.].

El polietileno puede difundirse en los poros del HZSM-5, a diferencia de lo observado en otros polímeros como el polipropileno. Además, las ramas y extremos de la cadena del polietileno pueden difundirse en los poros del HZSM-5 y entrar en contacto con los sitios ácidos, provocando así un aumento de la reactividad catalítica. HZSM-5 tiene sitios ácidos fuertes y débiles, mientras que HUSY solo tiene sitios ácidos débiles.

Los sitios ácidos fuertes pueden favorecer la degradación y la descomposición de hidrocarburos pesados [Uthpalani, P.G.I.; Premachandra, J.K.; De Silva, D.S.M.; Weerasinghe, V.P.A. Pirólisis como método de valor añadido para la gestión de residuos plásticos: una revisión sobre la conversión de residuos LDPE y HDPE en combustible; Research Square: Durham, NC, EE. UU., 2022]. <https://cjs.sljol.info/articles/10.4038/cjs.v52i3.8026>,

Los poros pequeños influyen en la difusión de vapores y moléculas pequeñas hacia las cavidades, con la posterior conversión de estas moléculas en compuestos aromáticos. El mayor tamaño de las cavidades catalizadoras es una ventaja para la conversión de macromoléculas en especies más pequeñas y para la reducción de la resistencia a la transferencia de masa de los compuestos intermedios. Sin embargo, las estructuras de cadena larga o ramificadas no pueden entrar en cavidades y se agrietan en la superficie catalizadora. Desafortunadamente, este proceso de agrietamiento conduce a la formación de coque y a la desactivación de catalizadores.

Calderia et al. [López, G.; Artetxe, M.; Amutio, M.; Bilbao, J.; Olazar, M. Rutas termoquímicas para la valoración de plásticos poliolefinicos de desecho para producir combustibles y productos químicos. Una reseña. *Renueva. Sostener. Energy Rev.* 2007, 73, 346–368.], realizaron un estudio sobre las conexiones entre polímeros (polietileno) y la superficie de contacto de las zeolitas como catalizadores con diferentes características (zeolitas beta jerárquicas y estándar, zeolita Y, ZSM-5, ZSM-12 y MCM-22). La beta zeolita jerárquica resultó tener un área externa superior debido al uso de un agente silanizado voluminoso en la síntesis. En las reacciones de agrietamiento, las macromoléculas poliméricas interactuaron principalmente en la superficie externa de los catalizadores debido a limitaciones difusivas. Zeolitas con valores de área externa mayores —Beta jerárquico, Beta estándar, ZSM-5 y MCM-22— requerían temperaturas más bajas para su degradación, con una alta eficiencia de conversión. El material de zeolita microporosa muestra alta estabilidad térmica y sitios ácidos más fuertes.

Sin embargo, la selección de la zeolita debe centrarse en la selectividad del objetivo, lo que implica además que la zeolita HZSM-5 potencia la producción de olefinas, mientras que las zeolitas jerárquicas Beta y HY promueven la producción de destilados intermedios [Caldeira, vicepresidente; Santos, A.G.D.; Oliveira, D.S.; Lima, R.B.; Souza, L.D.; Pergher, S.B.C. Craqueo catalítico de polietileno mediante análisis termogravimétrico: Efectos de las propiedades zeolíticas y el proceso de homogeneización. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017, 130, 1939–1951].

Además, recientemente se investigó la cinética de la reacción de pirólisis plástica, en presencia del catalizador zeolito ZSM-5, modificado con óxido de hierro (III), [Kremer, I.; Tomić, T.; Katančić, Z.; Hrnjak-Murgić, Z.; Erceg, M.; Cipriotti, S.V.; Schneider, D.R. Efecto del catalizador de zeolita en la cinética de pirólisis de envases de alimentos de plástico multicapa. *Simetría* 2022, 14, 1362]. La mejora de la reactividad en la superficie del catalizador se debe al dopaje de la zeolita con hierro. La degradación plástica en presencia de catalizadores heterogéneos experimenta limitaciones de transferencia de masa debido al origen voluminoso y viscoso de los polímeros plásticos.

Para superar esta restricción, se puede utilizar sílice mesoporosa muy estructurada como catalizador. Los mesóporos ordenados permiten una mejor difusión de los polímeros y también pueden mejorar el agrietamiento plástico acelerando la tasa de degradación y aumentando el rendimiento de los productos líquidos [Daligaux, V.; Richard, R.; Manero, M.H. Desactivación y regeneración de catalizadores de zeolita utilizados en la pirólisis de residuos plásticos—Revisión de procesos y análisis. *Catalizadores* 2021, 11, 770.].

Varios estudios han examinado la pirólisis catalítica de plásticos con catalizadores mesoporosos [Siddiqui, M.Z.; Park, Y.K.; Kang, Y.; Watanabe, A.; Kim, S.; Kim, Y.M. Uso eficaz del laminado aluminio-plástico como materia prima para la pirólisis catalítica frente a catalizadores micro y mesoporosos. *J. Limpia. Prod.* 2019, 229, 1093–1101].

Se encontró que las zeolitas Y afectan positivamente la selectividad y estabilidad térmica de la degradación catalítica del plástico. Aumentaron la formación de hidrocarburos ligeros y desplazaron la selectividad hacia combustibles de gasolina y diésel con menor concentración de olefinas. Además, este tipo específico de catalizador permite un alto número de reutilizaciones y muestra un rendimiento efectivo en la conversión de plásticos a temperaturas más bajas (<500 °C) en comparación con otros catalizadores. Así, las zeolitas Y menos ácidas con menor contenido de alúmina (mayor relación Si/Al) reducen la actividad de craqueo, mientras que las zeolitas Y con menor relación Si/Al producen altos rendimientos de hidrocarburos aromáticos como benceno y tolueno. Esto se debe a la combinación de diferentes factores, como la alta superficie de superficie, poros grandes y sitios ácidos fuertes, como los más importantes [Tuffi, R.; D'Abramo, S.; Cafiero, L.M.; Trinca, E.; Vecchio Cipriotti, S. Comportamiento térmico y cinética de degradación pirolítica de mezclas poliméricas a partir de plásticos de envases de desecho. *Expreso Polym. Lett.* 2018, 12, 82–99.].

El uso de catalizadores conduce a la producción de valiosos combustibles líquidos con una distribución limitada de hidrocarburos en la gama de la gasolina (C5~C12) [58]. Además, la disminución de la temperatura de reacción reduce la energía suministrada como calor para las reacciones extremadamente endotérmicas implicadas en el proceso.

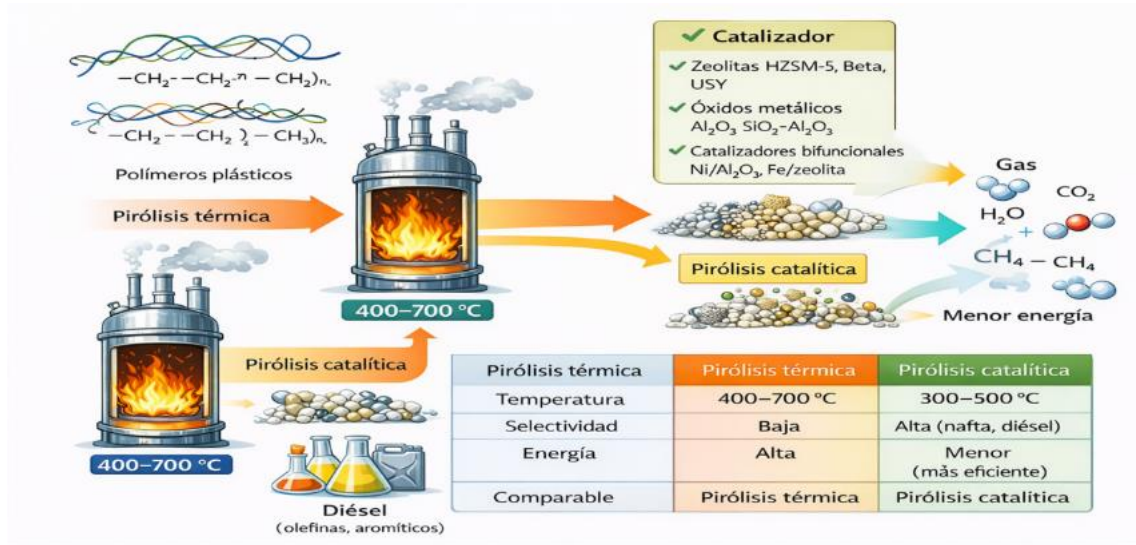
Se obtiene una mejor conversión del plástico utilizando un catalizador ácido con mesoporos y microporos. El agrietamiento polimérico ocurre en mesóporos y el grietamiento adicional se favorece por la presencia de microporos [Tuffi, R.; D'Abramo, S.; Cafiero, L.M.; Trinca, E.; Vecchio Cipriotti, S.

Comportamiento térmico y cinética de degradación pirolítica de mezclas poliméricas a partir de plásticos de envases de desecho. *Expreso Polym. Lett.* 2018, 12, 82–99.]. Las relaciones estructura-propiedad pueden utilizarse para evaluar las posibles aplicaciones de azoalcanos simétricos e asimétricos de la fórmula general $R'-N=N-R$ y derivados relacionados de azoxi, hidrazona y azina, como retardantes de llama novedosos para polipropileno, ya sea solos o en combinación con retardantes de llama disponibles comercialmente [Aubert, M.; Nicolas, R.C.; Pawelec, W.; Wilén, C.-E.; Michael Roth, M.; Pfaendner, R. Azoalcanes—Retardantes de llama novedosos y su relación estructura-propiedad. *Polím. Abogado Technol.* 2011, 22, 1529–1538.].

Aunque los compuestos que contienen bromo—en combinación con óxido de antimonio—son retardantes de llama muy eficientes [Charitopoulou, M.A.; Stefanidis, S.D.; Lappas, A.A.; Achilias, D.S. Pirólisis catalítica de polímeros con retardantes de llama bromados originados en equipos eléctricos y electrónicos de residuos (WEEE) utilizando diversos catalizadores.

Sostenida. Química y Farmacia. 2022, 26, 100612.], se presta atención a monitorizar el contenido de Br [Charitopoulou, M.A.; Stefanidis, S.D.; Lappas, A.A.; Achilias, D.S. Pirólisis catalítica de polímeros con retardantes de llama bromados originados en equipos eléctricos y electrónicos de residuos (WEEE) utilizando diversos catalizadores. Sostenida. Química y Farmacia. 2022, 26, 100612.] y a intentar reducir su cantidad, con el fin de desarrollar sistemas más respetuosos con el medio ambiente [. Aubert, M.; Nicolas, R.C.; Pawelec, W.; Wilén, C.-E.; Michael Roth, M.; Pfaendner, R. Azoalcanes—Retardantes de llama novedosos y su relación estructura–propiedad. Polím. Abogado Technol. 2011, 22, 1529–1538.].

Figura 28. Tipos de pirolisis: Pirólisis térmica y catalítica.



Nota. Imagen generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

Figura 29. Productos de la pirólisis.



Nota. La fotografía muestra los productos de la pirólisis. Tomado de *México mantiene plásticos desechables pese a presión internacional* [Fotografía], por Steven Nava, 2026, (<https://www.meganoticias.mx/cdmx/noticia/m%C3%A9xico-mantiene-pl%C3%A1sticos-desechables-pese-a-presi%C3%B3n-internacional/719949>)

4.7. Discusiones y conclusiones

La producción de aceite de plástico reciclado (PPO) a partir de residuos plásticos mixtos mediante pirólisis es una tecnología atractiva en la actualidad. Esta tecnología puede resolver dos de los principales problemas críticos del mundo actual: la disminución de los combustibles fósiles y la gestión del creciente problema de los residuos plásticos.

Esta revisión bibliográfica analiza los trabajos de investigación que utilizan aceite de plástico reciclado en motores diésel para analizar el rendimiento del motor, las emisiones y las características de combustión.

La mayoría de los estudios mencionados tratan sobre el uso de PPO directamente o solo después de la destilación para evaluar el rendimiento, las emisiones y las características de combustión de los motores diésel. Todos indican que los motores diésel pueden funcionar con PPO crudo sin necesidad de modificaciones. Sin embargo, la mayoría de los procesos de pirólisis para la producción de PPO se han llevado a cabo en reactores de laboratorio a pequeña escala y se han utilizado para probar motores diésel durante un período muy corto. Por lo tanto, es necesario realizar más investigaciones para determinar el efecto del PPO en el rendimiento, las emisiones y las características de combustión de los motores diésel durante su uso a largo plazo.

La mayoría de los estudios publicados mencionan un aumento en el consumo específico de combustible (BSFC) al usar aceite de palma aceitera (PPO) en comparación con el diésel; sin embargo, algunos estudios observaron una reducción en el BSFC en comparación con el diésel (la mayor reducción documentada fue del 17,88 % al usar PPO (Janyalertadun et al., 2017)). Al usar mezclas de PPO y diésel, se observó que el BSFC aumentaba (el mayor aumento documentado fue del 17,14 % al usar mezclas de PPO y éster metílico de *Jatropha* (JME) en comparación con el diésel (Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016)) y disminuía, dependiendo de las proporciones de la mezcla.

No obstante, el aumento en el BSFC se ha observado principalmente al usar compuestos oxigenados con PPO. Por ejemplo, se observó un aumento del 9,06 % en el BSFC al usar un 10 % de éster metílico de diésel (DEE) mezclado con PPO (Devaraj et al., 2015b). Se observó que la eficiencia térmica de frenado disminuía principalmente con el uso de PPO, sus mezclas con diésel y con la adición de compuestos oxigenados (la mayor reducción, del 17,26 %, se observó al usar mezclas de PPO y diésel en comparación con el diésel comercial (Kumar et al., 2013)). Sin embargo, algunos estudios observaron un aumento de la eficiencia térmica de frenado en comparación con el diésel (15,7 % al usar una mezcla de PPO y biodiésel (Ramesha et al., 2015)).

De manera similar, se encontró que el consumo específico de combustible (BSEC), la presión máxima en el cilindro, el retardo de encendido y la tasa de liberación de calor aumentaban principalmente con el uso de PPO y sus mezclas con diésel, con pequeñas discrepancias. No obstante, no se encontraron suficientes datos de investigación para concluir sobre su comportamiento y tendencia. En general, se ha documentado un aumento en la temperatura de los gases de escape con el uso de PPO, sus mezclas y con la adición de compuestos oxigenados.

La mayoría de los investigadores documentaron que las emisiones de NO_x eran mayores al usar PPO en comparación con el diésel comercial, registrándose un aumento máximo del 188,89 % al usar mezclas de PPO y diésel en lugar de diésel puro (Panda et al., 2016). Sin embargo, Damodharan et al. observaron una disminución de las emisiones de NO_x con el uso de PPO en comparación con el diésel de ultra bajo azufre (ULSD) (Damodharan et al., 2017). Se constató que la disminución máxima en las emisiones de NO_x fue del 63,02 % al usar emulsiones de PPO (Kumar y Sankaranarayanan, 2016).

La mayoría de los estudios, con excepción del de Janyalertadun et al. (basado en los artículos analizados en este trabajo), reportaron un aumento en las emisiones de CO. En dicho estudio, se observó una menor emisión de CO al utilizar PPO en todas las condiciones de carga, en comparación con el diésel (un 8,50 % menor a plena carga) (Janyalertadun et al., 2017). En cuanto a las emisiones de CO₂, algunos investigadores observaron disminuciones (la mayor, del 47,47 %, con mezclas de PPO (Kumar et al., 2013)), mientras que otros documentaron aumentos al utilizar PPO en comparación con el diésel (el aumento máximo fue del 13,04 % (Devaraj et al., 2015a)).

No se identificó una tendencia específica en las emisiones de CO₂ para determinar su comportamiento. La mayoría de los artículos reportaron mayores emisiones de hidrocarburos no quemados (UHC) y humo con el uso de PPO, aunque existen algunas discrepancias que muestran menores emisiones en comparación con el diésel.

Se realizaron investigaciones utilizando mezclas de PPO y diésel en diferentes porcentajes, desde el 10 % hasta el 90 % en peso, para determinar el efecto de dichas mezclas en el rendimiento del motor, las emisiones y las características de combustión. En toda la bibliografía consultada en este artículo de revisión, se observó un aumento en las emisiones de CO al utilizar mezclas de PPO y diésel en comparación con el uso exclusivo de diésel. Se menciona que las emisiones de CO₂, UHC, humo y NO_x aumentan o disminuyen al utilizar mezclas de PPO y diésel.

Los investigadores han continuado buscando formas innovadoras de disminuir las emisiones y mejorar el rendimiento de los motores diésel al usar PPO. Estas búsquedas los han llevado a utilizar compuestos oxigenados con PPO, como el éter dietílico (DEE), el éster metílico de *Jatropha*, el biodiésel de algas B20 y emulsiones, entre otros. La adición de DEE al 5 % en peso aumentó las emisiones de CO, UHC y CO₂, aunque algunos investigadores observaron una disminución en las emisiones de humo y NO_x. Al aumentar la concentración de DEE al 10 % en peso, se observaron resultados similares, con la única diferencia de que, en comparación con el uso del 5 % en peso, también aumentó la emisión de humo. Sin embargo, Kaimal y Vijayabalan documentaron aumentos en las emisiones de CO, CO₂, humo, NO_x y UHC con el uso de 5 y 10 % en peso de DEE con PPO (Kaimal y Vijayabalan, 2016a).

El uso de éster metílico de *Jatropha* al 10 % en peso con PPO logró reducir las emisiones de CO, humo e hidrocarburos no quemados (HCV), aunque las emisiones de NO_x aumentaron en comparación con el uso de diésel. El uso de biodiésel de algas B20 al 90 % en peso con un 10 % en peso de PPO también logró reducir las emisiones de CO e HCV, pero incrementó las emisiones de NO_x y humo. Las emulsiones de PPO lograron reducir las emisiones de NO_x, pero las emisiones de CO e HCV siguieron siendo superiores a las del diésel comercial.

Por lo tanto, se puede afirmar que el PPO tiene un potencial muy alto para sustituir al diésel comercial a través de una mayor investigación y la mejora de sus propiedades mediante diferentes procedimientos de postratamiento como la destilación, el hidrotratamiento, etc.

Tabla 13. Cuadro comparativo de los productos resultantes de la pirolisis en comparación a hidrólisis y petróleo diesel.

Aspecto	Nafta de Pirolisis	Nafta por Hidrólisis	Nafta del Petróleo (refinación del crudo / diésel)
Proceso	Ruptura térmica de hidrocarburos	Reacción química con agua	Destilación fraccionada del petróleo crudo
Temperatura	Muy alta (450-900 °C)	Baja a moderada	Media (30-200 °C)
Materia prima	Fracciones pesadas del petróleo o gas	Compuestos orgánicos específicos	Petróleo crudo
Producción de nafta	Sí	No significativa	Sí (principal fuente)
Rendimiento de nafta	15-30 %	Muy bajo o nulo	20-40 %
Relación con diésel	Se forma algo de diésel	No produce diésel	Nafta y diésel se separan del mismo crudo
Rendimiento de diésel	10-20 %	Nulo	25-35 %
Importancia industrial	Alta (petroquímica)	Muy baja	Muy alta (refinerías)
Uso principal	Materia prima petroquímica (plásticos, cauchos)	Procesos químicos	Combustibles (nafta y diésel)

Nota. Imagen generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

Tabla 14. Resultados según la opex de los diferentes plásticos y sus propiedades térmicas y de ramificación.

Polímero	Estructura de la cadena	Grado de ramificación	Cristalinidad (%)	Densidad (g/cm³)	Temp. de fusión / descomposición (°C)
PEBD (PE)	Lineal con muchas ramificaciones	Alta	40 – 45	0,91 – 0,92	≈ 110
PEAD (PE)	Lineal, pocas ramificaciones	Baja	75 – 80	0,96 – 0,97	≈ 136
PP	Lineal con grupos metilo (–CH ₃)	Muy baja	60 – 70	≈ 0,90	≈ 160
PVC	Lineal con cloro (–Cl)	Nula	10 – 20	1,35 – 1,45	No funde (se degrada ~200)

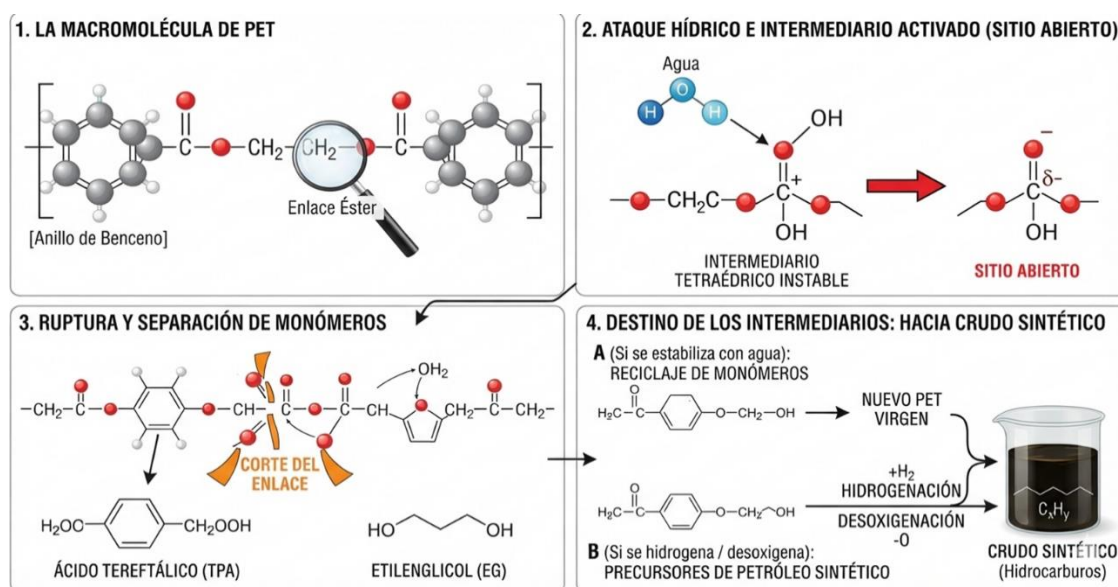
Nota. Adaptado desde *Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics*, por Faisal F. et al, 2023, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>)

Tabla 15. Clasificación del plástico P.M. g/mol

• PET (Tereftalato de Polietileno): Típicamente entre 8,000 y 31,000 g/mol. Para botellas y películas. • PVC (Policloruro de Vinilo): Generalmente entre 50,000 y 110,000 g/mol. Para tuberías y perfiles. • PE (Polietileno) y PP (Polipropileno): Varían ampliamente, pero sus grados comerciales caen en este rango. A mayor PM, más resistentes (HDPE vs. LDPE).	• Densidad entre 0.900 - 0.910 g/cm³ • Alta temperatura vítrea (Homopolímero) (-10 a 0°C) • Temperatura de fusión (Homopolímero) 165°C • Menor encogimiento que el PE • Puede ser usado en microondas • Puede ser usado en aplicaciones para llenado en caliente • Resistencia al ataque por ácidos, álcalis y solventes, • Hinchable en gasolina, Xileno y compuestos Clorados • Baja permeabilidad al agua. • Difícil de estampar, pintar y pegar
---	---

Nota. Desde *A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate*, por Adeboltan, H., 2023, <https://es.scribd.com/document/822711316/Hosseini-et-al-2023>

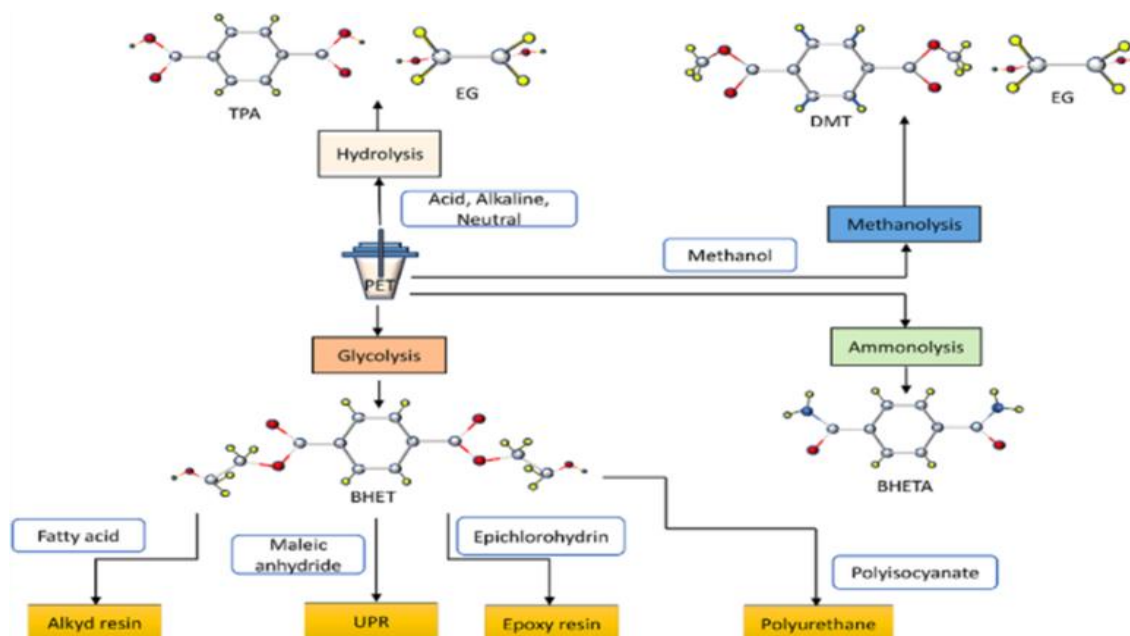
Figura 30. Representa cómo es la reacción química en forma interna del reactor.



Nota. Imagen generada con ChatGPT. (OpenAI, 2026).

5. HIDROLISIS. ¿QUÉ ES? DEFINICIÓN. INTRODUCCIÓN A LA HIDROLISIS.

Figura 31. Proceso de reciclaje químico de residuos de PET.



Nota. El esquema muestra el proceso de reciclaje químico de residuos de PET. Tomado de *Chemical recycling process of waste PET* [Fotografía], Fan Cao et al., 2022, (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S2046206922027164>)

5.1. Tipos de hidrólisis

Los péptidos y las proteínas contienen muchos aminoácidos que se unen mediante enlaces peptídicos. Estas biomoléculas, a su vez, componen muchas muestras diferentes, como productos bioterapéuticos, alimentos y piensos. Para analizar los aminoácidos que contienen estas biomoléculas, es fundamental que los enlaces se hidrolicen para formar aminoácidos liberados. Sin embargo, durante este proceso, las diferentes propiedades químicas de los enlaces de aminoácidos conjugados pueden afectar tanto a la eficacia de la ruptura de los enlaces de aminoácidos como a la recuperación de los aminoácidos individuales. Por ejemplo, la recuperación de los aminoácidos durante la hidrólisis puede verse afectada por reacciones químicas específicas, las interferencias de la matriz de los reactivos y la estabilidad de los propios aminoácidos.

Dadas las grandes diferencias en las propiedades químicas y físicas de las muestras y los aminoácidos, se han desarrollado diferentes procedimientos de hidrólisis a lo largo de los años.

Estos procedimientos varían según el tipo de reacción (química o enzimática), la naturaleza de la reacción química (ácida o básica) y el estado físico de la reacción (líquida o vapor). Las diferencias pueden influir en la recuperación de aminoácidos específicos, que se pueden destruir mediante reactivos específicos, o la eficacia y el tiempo necesarios para la hidrólisis.

En algunos casos, es posible que se necesiten varios procedimientos de hidrólisis para determinar el contenido total de aminoácidos de una muestra. A continuación, se describen los tipos comunes de reacciones de hidrólisis química y los modos de hidrólisis.

Nota: La hidrólisis enzimática, un procedimiento de uso poco frecuente, no se aborda en este documento.

También se debe tener en cuenta que las diversas reacciones de hidrólisis se pueden realizar con diferentes tipos de instrumentos. Históricamente, los procedimientos de hidrólisis utilizaban una fuente de calor bajo vacío para garantizar la finalización de la reacción, pero la hidrólisis inducida por microondas, con equipos más modernos, también se ha convertido en una herramienta de uso común. Los beneficios de cada método son diferentes y se deben investigar antes de seleccionar el equipo.

5.2. Hidrólisis neutra

En la hidrólisis neutra, el PET se despolimeriza en presencia de un exceso de agua o vapor a temperaturas y presiones de reacción entre 115 y 420 °C y 10-420 atm, respectivamente. Como se muestra en la Figura 29, los productos son TPA y EG. El TPA puede recuperarse del PET no reaccionado mediante acidificación y filtración tras la hidrólisis. Se ha reportado que cuando el PET se encuentra en estado fundido a temperaturas superiores a 245 °C, la reacción se acelera, Campanelli et al. observaron que, con una relación en peso de agua a PET de 5:1, se logra la despolimerización completa del PET en 2 h a una temperatura de reacción de 265 °C. Los estudios cinéticos y termodinámicos de la hidrólisis neutra del PET se encuentran disponibles en la literatura. 202, 203 Por ejemplo, Zope y Mishra 203 determinaron que la energía de activación y el factor de frecuencia eran 9,58 kJ.mol⁻¹ y 2,9 × 10⁸ min⁻¹, respectivamente. Cocchi, M.; Angelis, D.D.; Mazzeo, L.; Nardozi, P.; Piemonte, V.; Tuffi, R.; Ciprioti, S.V. Pirólisis catalítica de un residuo plástico residual utilizando zeolitas producidas por ceniza volante de carbón. *Catalizadores* 2020, 10, 1113. [Google Scholar] [CrossRef]

Figura 32. Hidrólisis neutra del tereftalato de polietileno (PET) a ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG).

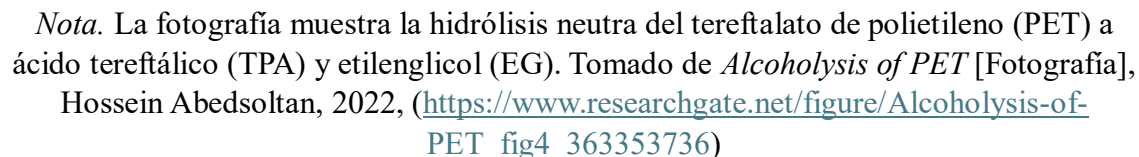


Tabla 16. Estudios destacados reportados en la literatura sobre la hidrólisis neutra del PET.

130

				rotatorio, velocidad = 600 rpm.	
250	39,5	1/10	6 horas	Humi- cola insolenscutinase (HiC) como catalizador, tubo reactor.	Quartinello y otros 204
300	NR ^a , autógeno	1/5	10 minutos	Se utilizó un baño de KNO ₃ - NaNO ₃ para controlar la temperatura de reacción, en un reactor tubular discontinuo.	Sato y otros 206
220–280	21–61	3.75/30	5–60 min	Acetato de zinc como catalizador, agua caliente a presión, reactor de autoclave.	Liu y otros 207
205	16	1.92/16.38	4 horas	Tratamiento con plasma para mejorar la humectabilidad del PET.	Mancini y otros 208
300 y 385	296.1	1/10	1–60 min	Reactor discontinuo de acero inoxidable refractario de alta aleación, sin agitación.	Căta y otros 209

Nota. Desde *A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate*, por Adebsoltan, H., 2023, <https://es.scribd.com/document/822711316/Hossein-et-al-2023>

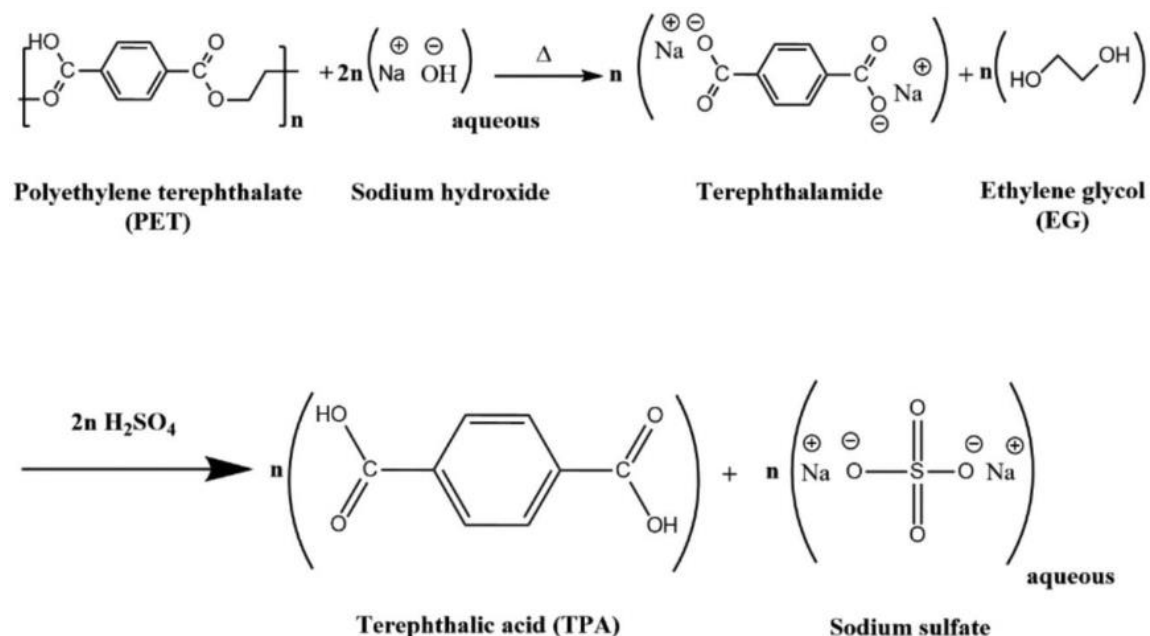
- Abreviatura: PET, tereftalato de polietileno.
- a. T_R , P_R , t_R y NR son las abreviaturas de temperatura de reacción, presión de reacción, tiempo de reacción necesario para una conversión de PET superior al 90% y no reportado, respectivamente.

5.3. Hidrólisis Alcalina

5.3.1. Antecedentes

En la hidrólisis alcalina estándar, los residuos de PET reaccionan con un catalizador básico en medio acuoso. La hidrólisis alcalina generalmente se lleva a cabo con un catalizador de óxido metálico, como hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, con una concentración entre 4 y 20 % p/p a una temperatura de reacción promedio de 225 °C y una presión de 17 atm. El hidróxido de sodio es un catalizador comúnmente utilizado para la hidrólisis alcalina del PET, donde el producto es la forma sódica del TPA (TPA-Na y EG. El TPA precipita al aplicar un ácido fuerte, como el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico, para ajustar el pH de la solución a 2. El catalizador básico se consume durante la hidrólisis alcalina y posteriormente se realiza un proceso de acidificación para recuperar el TPA. Las etapas de despolimerización del PET mediante hidrólisis con hidróxido de sodio se muestran en la Figura 30.

Figura 33. Hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno (PET) con hidróxido de sodio, recuperación de TPA con H₂SO₄.

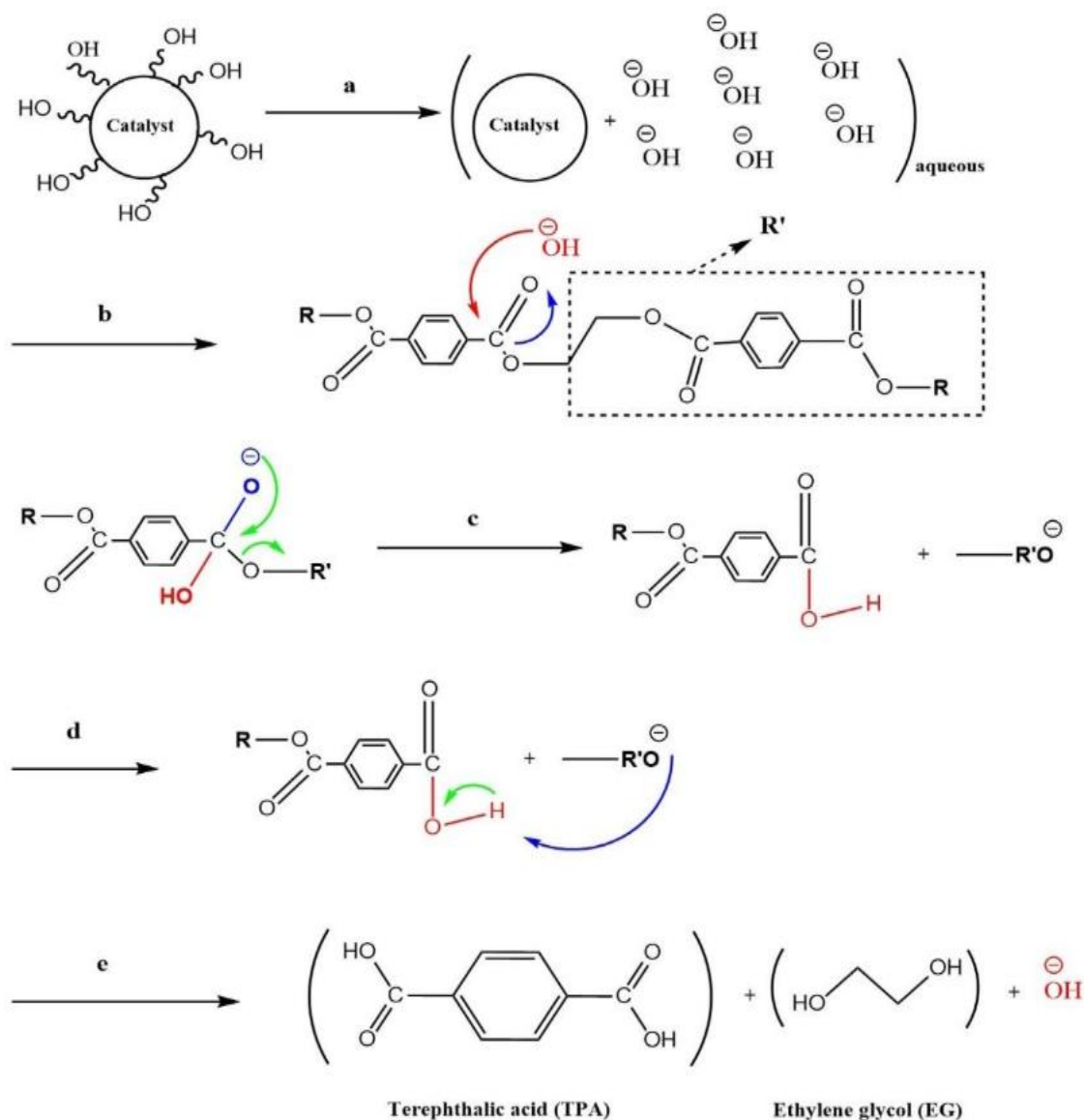


Nota. La fotografía muestra la hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno (PET) con hidróxido de sodio, recuperación de TPA con H₂SO₄. Tomado de *Pirólisis térmica y catalítica de una mezcla de plásticos procedentes de pequeños residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE)*. Waste Manag. [Fotografía], por Santella, C.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; La Marca, F.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S., 2016, 54, 143–152.

El mecanismo propuesto para la hidrólisis alcalina del PET se ilustra en la Figura 30. En la etapa de disociación (Figura 31.A), los grupos hidroxilo (OH) se liberan del catalizador en la solución acuosa.

En la siguiente etapa (adición nucleofílica), el anión hidroxilo ataca el átomo de carbono del grupo carbonilo del éster, formando un intermediario tetraédrico (Figura 31. B). Posteriormente, en la etapa de hidrólisis, el éster unido al intermediario tetraédrico ($\square OR'$) se separa de este (Figura 31.C). A continuación, el grupo negativo ($\square OR'$) ataca el enlace de hidrógeno del grupo hidroxilo y lo separa para formar el grupo hidroxilo (OH) (Figura 31D). Este paso se llama desprotonación del ácido carboxílico, que dará como resultado la formación de los productos de hidrólisis, TPA y EG (Figura 31.E).

Figura 34. Mecanismo de hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno (PET): (a) etapa de disociación, (b) etapa de adición nucleofílica, (c) etapa de hidrólisis, (d) etapa de desprotonación y (e) etapa de formación. 218 - 220.



Nota. La fotografía muestra el mecanismo de hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno (PET). Tomado de *Mechanism for polyethylene terephthalate (PET) acid hydrolysis, (a) dissociation step, (b) first protonation step, (c) water molecule attack step, (d) second protonation step, (e) formation step* [Fotografía], Hossein Abedsoltan, 2023, (https://www.researchgate.net/figure/Mechanism-for-polyethylene-terephthalate-PET-acid-hydrolysis-a-dissociation-step_fig13_371781563)

5.3.2. Patentes concedidas para la hidrólisis alcalina,

Los autores Pitat en el Abdy, C.; Zhang. Pirólisis de residuos plásticos de poliolefina y posibles aplicaciones en la construcción de carreteras asfálticas: una revisión técnica. Res. Conservar. Reciclar. 2022, patentaron un método de hidrólisis alcalina de PET mediante la aplicación de hidróxido de sodio al 18 % en peso en agua. El hallazgo más importante fue determinar el efecto de la precipitación máxima de TPA sódico alcalino (salting out) cuando la temperatura y el tiempo de reacción eran de 100 °C y 2 h, respectivamente.

En una patente posterior, Lazarus et al. Pagina 222. aplicaron NaOH al 3,38 % en peso para hidrolizar una mezcla de nailon-6:PET en proporción 70:30 (p/p) a 230 °C y 17 atm, con un rendimiento de TPA del 97,4 %. Mishra et al. Pagina 223. y Karayannidis et al. Pagina 224. informaron sobre la hidrólisis alcalina de PET con la degradación completa del PET y una alta producción de TPA. También estudiaron la cinética de reacción de la hidrólisis del PET.

La patente más reciente corresponde a Nikolaevich et al. Pagina 225. quienes informaron sobre la aplicación de hidróxido de sodio para producir TPA a partir de PET. El rango de temperatura y presión de la reacción fue de 130–150 °C y 1 atm, respectivamente. Introdujeron Flotoreagent-oxal T-92, una mezcla de alcoholes polihídricos, como medio de flotación utilizado durante el proceso alcalino para disolver el TPA producido, con la adición de agua. Posteriormente, el TPA se recuperó mediante el proceso de acidificación descrito por Lazarus et al. 222

5.3.3. Agentes de transferencia de fase como catalizadores para la hidrólisis alcalina.

Un agente de transferencia de fase (PTA) mejora las interacciones entre el catalizador básico y la superficie del PET en el medio de reacción. Para que el PTA funcione correctamente, debe tener una parte orgánica suficiente para ser lipofílico y un tamaño lo suficientemente pequeño para evitar el impedimento estérico. Pagina 226, 227. La estructura del PTA consta de dos partes: una catiónica y otra aniónica. Se ha observado que la parte catiónica transporta los aniones hidróxido dispersos a la superficie del PET, lo que facilita que los aniones hidroxilo ataquen el PET para su despolimerización. 228, 229. Muhammad, C.; Onwudili, J.A.; Williams, P.T. Degradación térmica de plásticos de residuos reales y plásticos mixtos simulados en un reactor de pirólisis-catálisis

de dos etapas para producción de combustible. Combustibles energéticos 2015, 29, 2601–2609.

Esta mayor interacción facilitó la hidrólisis alcalina del PET en condiciones de reacción más suaves, con temperaturas entre 70 y 95 °C y presión atmosférica. El TPA producido presentó una alta pureza, con trazas de un 2 % en peso de ácido isoftálico. Kosmidis et al. 226 utilizaron bromuro de trioctilmetilamonio como agente de transferencia de fase (PTA) en la hidrólisis alcalina.

Posteriormente, se describieron otros PTA, incluidos los de fosfonio cuaternario, las sales de amonio y el yoduro de tetrabutylamonio (TBAI), para la hidrólisis alcalina del PET. 227, 230-232. Por ejemplo, se observó que el bromuro de tributylhexadecilfosfonio (3Bu6DPB) aumentaba la actividad de la reacción en la hidrólisis alcalina del PET, reduciendo el tiempo de reacción necesario de 10 a 1,5 h para lograr una conversión de PET superior al 90 % a 80 °C en un reactor de presión Parr. 230. Muhammad, C.; Onwudili, J.A.; Williams, P.T. Degradación térmica de plásticos de residuos reales y plásticos mixtos simulados en un reactor de pirólisis-catálisis de dos etapas para producción de combustible. Combustibles energéticos 2015, 29, 2601–2609.

5.3.4. Métodos de calentamiento alternativos: microondas y ultrasonidos.

La hidrólisis alcalina del PET descrita en las secciones anteriores empleó métodos de calentamiento tradicionales. Se ha informado que la irradiación por microondas y ultrasonidos son fuentes de calor alternativas para la hidrólisis alcalina del PET. 233 Siddiqui et al. 234 informaron de la degradación completa del PET en 30 min con NaOH 1,25 M asistido por un agente de transferencia de fase (PTA), a una temperatura de reacción de 180 °C bajo irradiación por microondas.

Paliwal y Mungray 235 llevaron a cabo la hidrólisis del PET en hidróxido de sodio al 10 % en peso asistido por TBAI como PTA bajo irradiación por ultrasonidos. Se logró la despolimerización completa del PET en 45 min a 90 °C y 1 atm. Sin irradiación por ultrasonidos, el tiempo de reacción requerido fue de 65 min en estas condiciones. La irradiación por microondas y ultrasonidos mejora la difusión del agua en la matriz del PET al provocar la relajación estructural del mismo, lo que resulta en velocidades de reacción mayores que las obtenidas con el proceso de calentamiento tradicional por sí solo. Muhammad, C.; Onwudili, J.A.; Williams, P.T. Degradación térmica de plásticos de residuos reales y plásticos mixtos simulados en un reactor de pirólisis-catálisis de dos etapas para producción de combustible. Combustibles energéticos 2015, 236, 2601–2609.

5.3.5. Hidrólisis alcalina: Estudios recientes.

Estudios recientes sobre la hidrólisis alcalina del PET se han centrado en la introducción de métodos que permiten alcanzar una conversión superior al 90 % en tiempos de reacción cortos, con el fin de utilizar disolventes y productos químicos más ecológicos en el proceso de despolimerización o para despolimerizar PET con mayor contenido de

impurezas. Los estudios más destacados sobre la hidrólisis alcalina del PET se resumen en la Tabla.

Tabla 17. Estudios destacados reportados en la literatura sobre la hidrólisis ácida del PET.

T_R^a (°C)	P_R (atm) ^a	PET (g)/agua (g)	t_R^a	Condiciones de reacción específicas	Referencia
220	NR ^{una} alta presión	1/9	10 minutos	Irradiación por microondas en reactor de teflón sin agitador, con 10% vol. de NaOH como catalizador.	Adina y otros ²⁰⁹
100	NR ^a	NR ^a	60 minutos	Cuencos de acero inoxidable para instrumentos Linitest (reactor discontinuo), 1 g.mL ⁻¹ cloruro de hexadeciltrimetilamonio como surfactante catiónico (acelerador) junto con 1,5 mol.mL ⁻¹ NaOH como catalizador.	Çorak y otros ²¹⁰
90	NR ^a	1/17	8 minutos	Reactor discontinuo de acero inoxidable calentado por baño de aceite de silicona, γ -valerolactona (GVL) como agente de hinchamiento y disolución para PET, 15 % en peso de NaOH como catalizador.	Chen y otros ²³⁷
110	1	0.1/10	5 horas	Reactor sellado de teflón por lotes con agitador, 0,5 % en peso de [C ₁₆ H ₃₃ N(CH ₃) ₃] ₃ PW ₁₂ O ₄₀ (conocido como (CTA) ₃ PW) como PTA y 4 % en peso de NaOH como catalizador.	Wang y otros ²³⁸
80	1	NR ^a	20 minutos	Matraz de fondo redondo de tres bocas con condensador y agitador, etanol:agua en proporción 60:40 vol% como	Ügdüler y otros ²³⁹

				cosolventes y 5% en peso de NaOH como catalizador.	
100	1	1/10	4 horas	Reactor de tres cuellos con columna de refrigeración, agitador mecánico y placa calefactora, sal cuaternaria de bromuro de tributylhexadecilfosfonio como PTA junto con 6,54 % en peso de NaOH como catalizador.	Barredo y otros ²⁴⁰

Nota. Desde *A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate*, por Adebosun, H., 2023, <https://es.scribd.com/document/822711316/Hosseini-et-al-2023>

- Abreviatura: PET, tereftalato de polietileno.
- A, T R, P R, t R y NR son las abreviaturas de temperatura de reacción, presión de reacción, tiempo de reacción necesario para una conversión de PET superior al 90% y no reportado, respectivamente.

En conclusión, la hidrólisis alcalina puede aplicarse al tratamiento de residuos de PET con alto contenido de impurezas. Se ha reportado que esta técnica es más económica que la metanólisis debido a sus menores costos de inversión y operación. Sin embargo, el proceso de acidificación necesario para separar el TPA y la separación de la solución catalítica del medio de reacción representan obstáculos que pueden limitar la implementación de la técnica a gran escala en el reciclaje químico de residuos de PET. Más importante aún, el catalizador utilizado en la hidrólisis alcalina se consume y puede no ser recuperable.

Dado que la recuperabilidad y la reutilización del catalizador son cruciales para garantizar la sostenibilidad del reciclaje, esta podría ser una razón importante por la que se han realizado y publicado pocos estudios sobre hidrólisis alcalina en los últimos años, como se muestra en la Tabla 17.

5.3.6. Hidrólisis ácida

5.3.6.1 Antecedentes

Se han descrito catalizadores ácidos, incluidos ácidos minerales, para la hidrólisis del PET, siendo el ácido sulfúrico el más utilizado. Para evitar altas temperaturas y presiones de reacción, el PET se ha hidrolizado en soluciones ácidas concentradas con una concentración superior al 90 % de su peso. Cabe destacar que la corrosividad de las soluciones ácidas es elevada y puede provocar un mantenimiento prematuro de los sistemas de reacción.

Al igual que en la hidrólisis neutra, los productos son TPA sólido y EG. El TPA producido se recupera mediante un proceso de cristalización tras una hidrólisis completa. En el caso de una conversión completa del PET, la hidrólisis ácida no requiere el proceso

de acidificación, que constituye un paso adicional en la hidrólisis alcalina para la recuperación de TPA.

Yoshioka et al. estudiaron el ácido sulfúrico y el ácido nítrico para la hidrólisis del PET. La hidrólisis completa se produjo en 5 h en ácido sulfúrico 7 M a 150 °C y presión atmosférica. 246

Para el ácido nítrico, se observó hidrólisis completa en 16 h en ácido nítrico 13 M a 100 °C. 247 Además, los estudios cinéticos confirmaron que la temperatura de reacción desempeñó un papel fundamental en el progreso de la hidrólisis del PET. Las energías de activación reportadas para el ácido sulfúrico y el ácido nítrico fueron de 88,7 y 101,3 kJ·mol⁻¹, respectivamente. 246,247. Ahmad, I.; Khan, M.I.; Khan, H.; Ishaq, M.; Tariq, R.; Gul, K.; Ahmad, W. Estudio de pirólisis de polipropileno y polietileno en productos aceitosos de alta calidad. Int. J. Green Energy 2015, 12, 663–671

Los parámetros de reacción importantes en la hidrólisis del PET con ácidos minerales incluyen la concentración del ácido, la temperatura de reacción, la presión y el tamaño y la forma de las partículas de PET. Un aumento en la concentración del ácido y en la temperatura de reacción incrementa la velocidad de conversión del PET. Se observó que una disminución en el tamaño de partícula aumenta la velocidad de conversión del PET debido al incremento del área superficial por volumen y a la mayor accesibilidad de los protones para reaccionar con la superficie del PET.

Santos y Mendes, probaron tres medios de reacción diferentes para la hidrólisis ácida del PET: ácido sulfúrico concentrado, ácido sulfúrico concentrado con yodo como cocatalizador y ácido sulfúrico fumigante. En todos los casos, la reacción de hidrólisis se llevó a cabo a 87,5 °C durante 2 h. No se observaron reacciones secundarias y la conversión completa del PET solo se logró con el ácido sulfúrico concentrado. Ahmad, I.; Khan, M.I.; Khan, H.; Ishaq, M.; Tariq, R.; Gul, K.; Ahmad, W. Estudio de pirólisis de polipropileno y polietileno en productos aceitosos de alta calidad. Int. J. Green Energy 2015, 12, 663–671

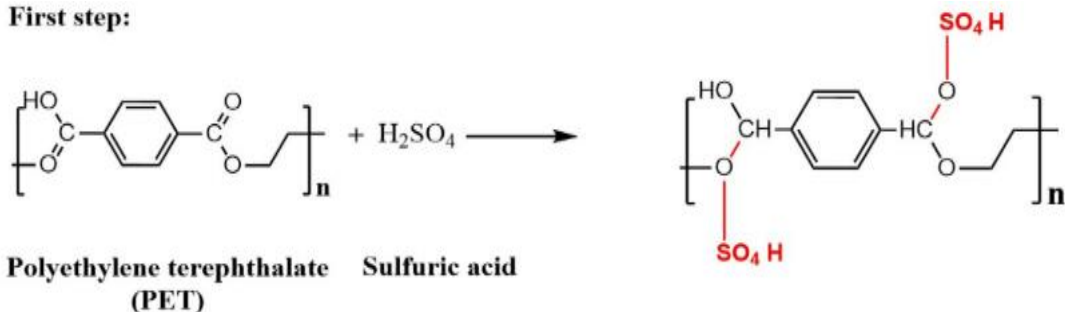
5.3.6.2 . Patentes concedidas para la hidrólisis ácida

Brown y O'Brien (254) publicaron la primera patente sobre la hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico con una concentración mínima del 87 % en peso a temperaturas de entre 60 y 93 °C y presión ambiente. Se observó la conversión completa del PET en aproximadamente 4 minutos cuando la concentración de ácido era del 95 % en peso a una temperatura promedio de 75 °C. Además, se propuso el mecanismo mostrado en la Figura 12, para la hidrólisis ácida. En la primera etapa, el ácido sulfúrico reacciona con el oxígeno del doble enlace del enlace éster dentro de la cadena del PET.

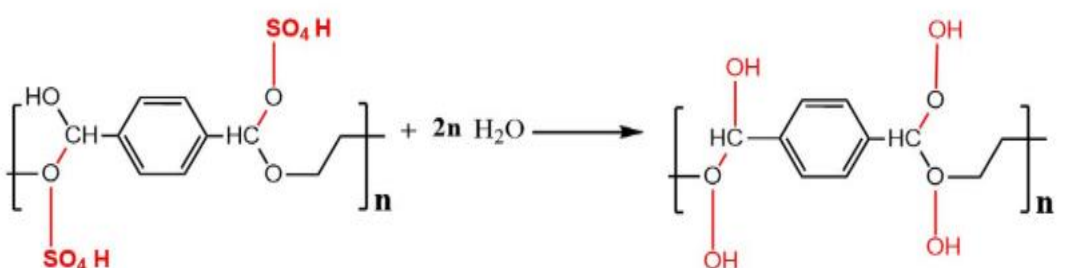
En la segunda etapa, la adición de agua regenera el ácido sulfúrico en el medio de reacción y sustituye los grupos hidroxilo dentro de la cadena. En la última etapa, los enlaces de carbono con dos grupos hidroxilo son químicamente inestables y se rompen rápidamente en TPA y EG.

Figura 35. Mecanismo de hidrólisis del tereftalato de polietileno (PET) con H_2SO_4 .

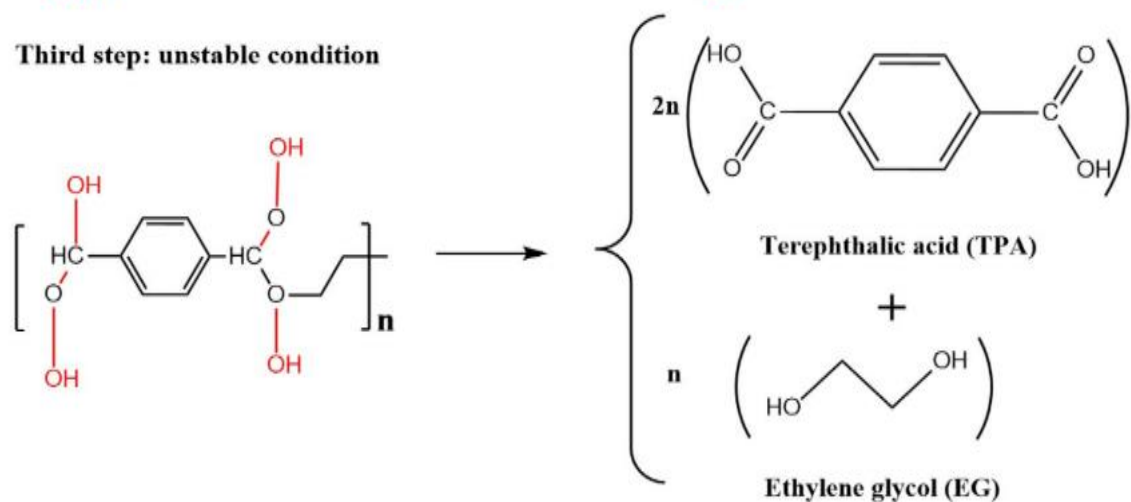
First step:



Second step:



Third step: unstable condition



Nota. La fotografía muestra el mecanismo de hidrólisis del tereftalato de polietileno (PET) con H_2SO_4 . Tomado de *Pirólisis térmica y catalítica de una mezcla de plásticos procedentes de pequeños residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE)*. *Waste Manag.* [Fotografía], por Brown y O'Brien. Santella, C.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; La Marca, F.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S., 2016, 54, 143–152.

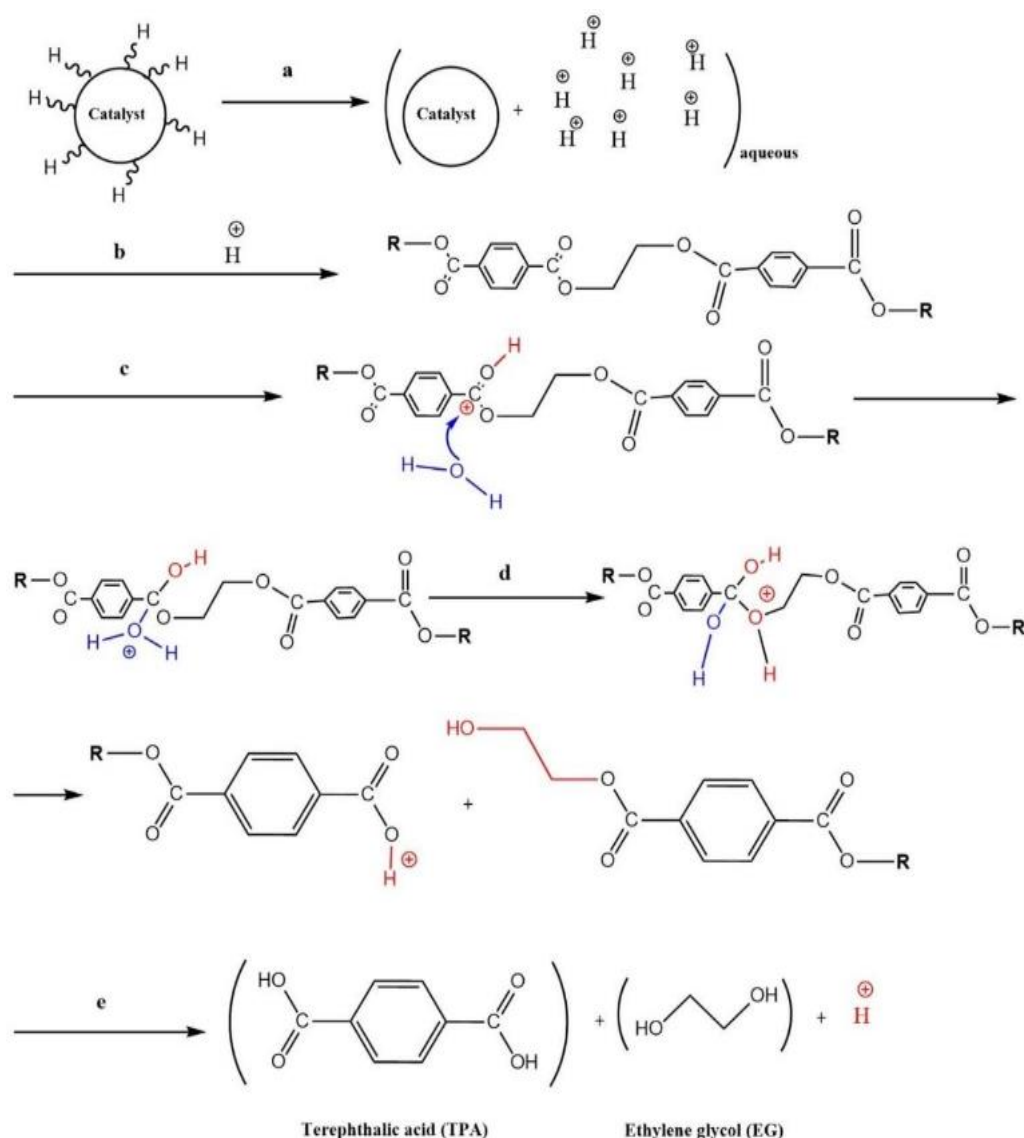
El mecanismo propuesto por Brown y O'Brien no solo puede extenderse a otros catalizadores ácidos, sino que, más importante aún, no se considera una descripción precisa de la hidrólisis del PET con ácido sulfúrico. Por ello, Li et al. propusieron un mecanismo integral para la hidrólisis ácida del PET, como se muestra en la Figura 13. En

primer lugar, los protones de hidrógeno se disocian del catalizador en la fase acuosa (Figura 13A). En segundo lugar, el protón ataca aleatoriamente el átomo de carbono del grupo carbonilo del éster (Figura 13B). En este punto, el átomo de oxígeno del grupo carbonilo se transforma en un grupo hidroxilo secundario.

En tercer lugar, el átomo de oxígeno del agua ataca el átomo de carbono protonado del grupo carbonilo del éster (Figura 13C). Simultáneamente, el protón de hidrógeno del agua se une al átomo de oxígeno del enlace éster, protonándolo como resultado del efecto del enlace de hidrógeno (Figura 13D).

El enlace éster es inestable y se rompe rápidamente para formar un grupo carboxilo terminal y un grupo hidroxilo (Figura 13E). Simultáneamente, el protón de hidrógeno se separa del oxígeno carbonílico y regresa al entorno acuoso para la siguiente reacción.

Figura 36. Mecanismo para la hidrólisis ácida del tereftalato de polietileno (PET), (a) paso de disociación, (b) primer paso de protonación, (c) paso de ataque de la molécula de agua, (d) segundo paso de protonación, (e) paso de formación, propuesto por Li et al.



Nota. La fotografía muestra el mecanismo para la hidrólisis ácida del tereftalato de polietileno (PET). Tomado de *Mechanism for polyethylene terephthalate (PET) acid hydrolysis*, (a) dissociation step, (b) first protonation step, (c) water molecule attack step, (d) second protonation step, (e) formation step, proposed by Li et al. [Fotografía], Hossein Abedsoltan, 2023, (https://www.researchgate.net/figure/Mechanism-for-polyethylene-terephthalate-PET-acid-hydrolysis-a-dissociation-step_fig13_371781563)

Pusztaszeri 257 patentó un método para hidrolizar de forma económica e industrial residuos de PET en una solución concentrada de ácido sulfúrico a temperatura ambiente y presión atmosférica. La hidrólisis completa del PET se logró en 30 minutos con una relación de volumen ácido/agua de al menos 6:1. Se consideraron cuatro tipos de residuos de PET como materia prima para la hidrólisis: películas con contenido de plata, películas convencionales, textiles y botellas. La invención se basa en una técnica para producir TPA

con una pureza del 99 %. Tras la hidrólisis, los sólidos en la solución se filtraron y se mezclaron con una solución alcalina para disolver el TPA producido.

Una segunda filtración separó el TPA de las impurezas restantes, y este se precipitó ajustando el pH de la solución a un rango de 0 a 3. Los filtrados de la primera y la segunda filtración se neutralizaron y se desecharon.

Estas dos patentes datan de las décadas de 1970 y 1980, y desde entonces no se ha emitido ninguna patente para la hidrólisis ácida del PET. Esto se debe posiblemente a dos razones principales. En primer lugar, la hidrólisis ácida del PET requiere una solución de ácido mineral altamente concentrada para convertir el PET por completo en poco tiempo y a temperatura ambiente. Esta alta concentración de ácido es corrosiva, lo que limita la selección del reactor para la hidrólisis. En segundo lugar, durante la reacción se producen volúmenes sustanciales de ácido y etilenglicol (EG) en agua, lo que requiere un costoso proceso de destilación para separar el ácido del EG.^{48, 65, 232} Sin embargo, se han llevado a cabo estudios sobre métodos para mejorar la técnica de hidrólisis ácida del PET debido a sus prometedoras características, como el uso de disolventes acuosos y la producción directa de TPA.

5.3.6.3 Enzimas como catalizadores para la hidrólisis ácida.

Se ha estudiado la aplicación de enzimas como catalizadores ácidos para la despolimerización del PET con el fin de introducir métodos más sostenibles para la hidrólisis ácida de este compuesto. Dado que existen numerosos trabajos publicados sobre la despolimerización enzimática del PET, también se han escrito revisiones específicas en este campo. En este trabajo, se mencionan brevemente las enzimas más relevantes. Estas enzimas se clasifican como hidrolasas de ácidos carboxílicos, incluidas las cutinasas, lipasas, serina esterasas, y carboxilesterasas. Con catalizadores enzimáticos, la hidrólisis del PET se lleva a cabo a una temperatura de reacción promedio de 45 °C y presión atmosférica, produciendo TPA y EG. La conversión completa del PET generalmente tarda días o semanas, dependiendo de la actividad enzimática. Por lo tanto, este método podría no ser adecuado para la degradación del PET en plantas de reciclaje. Sin embargo, la aplicación de enzimas para la hidrólisis del PET podría utilizarse para la degradación de los residuos de PET acumulados en instalaciones estáticas como los vertederos.

5.3.6.4. Hidrólisis ácida: Estudios recientes

Entre los tipos de hidrólisis analizados (neutra, alcalina y ácida), la hidrólisis ácida presenta menores costos operativos que la hidrólisis neutra, además de que el catalizador ácido no se consume durante el proceso, a diferencia del catalizador alcalino.

Estas dos características de la hidrólisis ácida han motivado estudios recientes centrados en el diseño de catalizadores ácidos con mayor actividad que los ácidos convencionales, como los ácidos minerales, para despolimerizar el PET a mayor velocidad. importante aún, el objetivo ha sido proponer catalizadores ácidos recuperables tras la hidrólisis y reutilizables para mejorar la sostenibilidad del reciclaje del PET. estudios más relevantes sobre la hidrólisis ácida del PET se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18. Estudios destacados reportados en la literatura sobre la hidrólisis ácida del PET.

T_R^a (°C)	P_R (atm)	PET (g)/agua (g)	t_R^a	Condiciones de reacción específicas	Referencia
220	NR ^a	1/8	3 horas	Reactor hermético a presión con agitador, 0,1 g.ml ⁻¹ de TPA en agua (0,6 M TPA) como catalizador sólido.	Yang y otros ²⁵⁶
NR ^a	NR ^a	1/4	5 minutos	Irradiación por microondas con una potencia de 200 vatios, recipiente sellado para realizar la hidrólisis, geles de sílice modificados con ácido fosfórico como catalizador sólido.	Ohmura y otros ²⁸¹
121	3–28 Rango de cambio de presión durante la hidrólisis	1/120	40 minutos	Irradiación de microondas con un rango de potencia de 60–940 vatios, reactor de vidrio sellado con septos de teflón-silicio, H + @ZSM-5-25 como catalizador ácido de Brønsted-Lewis (1,25 mmol.g ⁻¹).	Kang y otros ²⁸²
100	1	NA ^a	60 minutos	Matraz con agitador y condensador de reflujo, FeCl ₃ · 6H ₂ O / ácido metanosulfónico de Lewis-Brønsted con relación molar 1:1 como disolvente eutéctico profundo.	Rollo y otros ²⁸³
NR ^a	NR ^a	~1/8	30 minutos	Irradiación de microondas con potencia media de 180 vatios, ácido adípico como catalizador con una relación molar óptima de 0,7 (ácido a PET).	Hoang y otros ²⁸⁴

Nota. Desde *A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate*, por Adebositan, H., 2023, <https://es.scribd.com/document/822711316/Hosseini-et-al-2023>

- Abreviatura: PET, tereftalato de polietileno.

- A T R, P R, t R, NA y NR son las abreviaturas de temperatura de reacción, presión de reacción, tiempo de reacción necesario para una conversión de PET superior al 90%, no aplicable y no reportado, respectivamente.

5.3.6.5. Hidrólisis alcalina vs. Hidrólisis ácida

Si bien la hidrólisis ácida con HCl es, por mucho, la técnica más común para hidrolizar proteínas y péptidos, a menudo se usa la hidrólisis alcalina o básica para determinar triptófano. Debido a que el triptófano es estable en condiciones básicas, esta técnica proporciona una cuantificación exacta de triptófano y se utiliza en gran medida para una variedad de muestras, desde alimentos y piensos hasta péptidos y proteínas. La hidrólisis alcalina suele utilizar NaOH o KOH como reactivo. Sin embargo, la hidrólisis alcalina no puede sustituir a la hidrólisis ácida para la cuantificación de todos los aminoácidos.

En condiciones alcalinas, la arginina, la cisteína, la serina y la treonina se destruyen y no se pueden cuantificar. Otros aminoácidos también se ven afectados, por lo que la hidrólisis alcalina se usa generalmente solo para el triptófano.

5.4. Modos de hidrolisis

Las reacciones de hidrolizado se realizan en fase líquida o vapor. Independientemente del modo, los instrumentos diseñados específicamente para la hidrólisis facilitan la reacción.

Históricamente, muchas reacciones de hidrolizado se producían a altas temperaturas y al vacío durante un período de horas a días, pero con la llegada de los instrumentos de hidrólisis por microondas, el mismo proceso se puede realizar en minutos a temperaturas más bajas.

5.5. Hidrólisis en fase líquida

En la hidrólisis en fase líquida, la muestra y el HCl se añaden directamente al tubo de hidrólisis para la reacción. Este procedimiento requiere añadir la muestra, el patrón interno y el ácido directamente al tubo de hidrólisis. El tubo se purga con nitrógeno, después se sella y se calienta durante el tiempo necesario para completar la hidrólisis. La hidrólisis líquida puede tardar de horas a días en completarse. Este procedimiento se suele utilizar para muestras más complejas.

5.6. Hidrólisis en fase vapor

En la hidrólisis en fase de vapor, la muestra solo reacciona con el HCl en la fase de vapor. El procedimiento requiere colocar la muestra y el patrón interno (si se utiliza) en tubos de hidrólisis. A continuación, se seca la muestra y se coloca cada tubo abierto en un recipiente de hidrólisis.

El ácido (HCl 6 M) se añade al fondo de un recipiente que contiene los tubos y, luego, el recipiente se cierra herméticamente, se hace vacío y se purga con nitrógeno. El recipiente se calienta durante el tiempo necesario para completar la hidrólisis.

Este modo reduce la contaminación de cualquier reactivo impuro, como el HCl. La hidrólisis en fase de vapor por lo general se produce a un ritmo más rápido que la hidrólisis en fase líquida. En la hidrólisis en fase de vapor, generalmente las muestras deben ser de alta pureza.

La hidrólisis se define como la reacción con agua en la que las moléculas de agua conducen a la ruptura de enlaces químicos dentro de un material. En muchos sentidos, la hidrólisis se considera a menudo lo contrario a la condensación.

En la condensación, la formación de agua suele ir acompañada del crecimiento en la cadena del polímero; en la hidrólisis, la reacción va en sentido contrario, donde la reacción con una molécula de agua da como resultado la rotura de enlaces poliméricos ya formados. La hidrólisis se acelera con la presencia de una pequeña cantidad de catalizadores en el agua. Los catalizadores podrían ser la presencia de iones dentro del agua. La velocidad de hidrólisis no solo depende de los enlaces químicos susceptibles dentro del polímero, sino también de la concentración de agua dentro del material.

Tanto la hidrólisis por agua pura como la catálisis por la presencia de sales requieren agua en el polímero. Los polímeros hidrófilos son más susceptibles al hidrólisis y la posterior degradación hidrolítica en comparación con los polímeros hidrófobos. Después de la absorción de la humedad de la superficie, la velocidad de difusión del agua dentro del polímero también es bastante crítica. Se observa que la mayor biodegradación de ciertos polímeros ocurre más rápidamente cuando la tasa de difusión y permeabilidad son más altas.

Muchas otras propiedades de los polímeros también pueden afectar la naturaleza hidrolítica de un polímero, si un enlace químicamente susceptible está protegido por una estructura hidrófoba o por regiones cristalinas, la velocidad efectiva de hidrólisis puede ralentizarse. En un polímero reticulado, altos niveles de reticulación pueden suprimir la hidrólisis.

La relación entre el área de la superficie y el volumen de un dispositivo afecta la tasa de hidrólisis, una relación alta entre el área de la superficie expuesta y el volumen como en una estructura porosa puede aumentar en gran medida la tasa de hidrólisis. También se ve que la presencia de tensión mecánica aumenta la tasa de hidrólisis.

El peso molecular del polímero no parece tener un efecto directo sobre la velocidad de hidrólisis; sin embargo, un polímero de peso molecular relativamente alto podría mostrar una disminución más lenta en la pérdida de propiedades debido al hidrólisis.

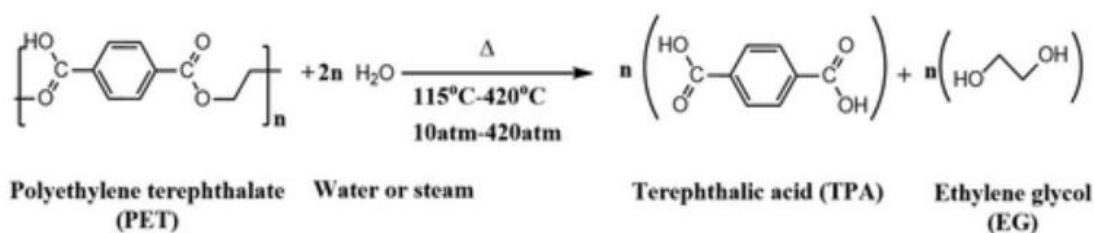
En la hidrólisis neutra, el PET se despolimeriza en un exceso de agua o vapor a temperaturas y presiones de reacción entre 115 y 420 °C y 10–420 atm, respectivamente. 196 - 198.

Como se muestra en la Figura 9, los productos son TPA y EG. El TPA se puede recuperar del PET sin reaccionar mediante acidificación y filtración después del hidrólisis.

Se informó que cuando el PET está en estado fundido a temperaturas superiores a 245 °C, la reacción avanza más rápido. 199, 200 Campanelli et al. 201 encontraron que cuando la relación en peso de agua a PET es de 5 a 1, la despolimerización completa del PET se puede lograr en 2 h a una temperatura de reacción de 265 °C.

Los estudios cinéticos y termodinámicos para la hidrólisis neutra del PET se encuentran en la literatura. 202, 203 Por ejemplo, Zope y Mishra 203 determinaron que la energía de activación y el factor de frecuencia eran 9,58 kJ.mol⁻¹ y 2,9 × 10⁸ min⁻¹, respectivamente.

Figura 37. Hidrólisis neutra de tereftalato de polietileno (PET) a ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG).



Nota. La fotografía muestra la hidrólisis neutra de tereftalato de polietileno (PET) a ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG).. Tomado de *Alcoholysis of PET*. [Fotografía], Hossein Abedsoltan, 2022, (https://www.researchgate.net/figure/Alcoholysis-of-PET_fig4_363353736)

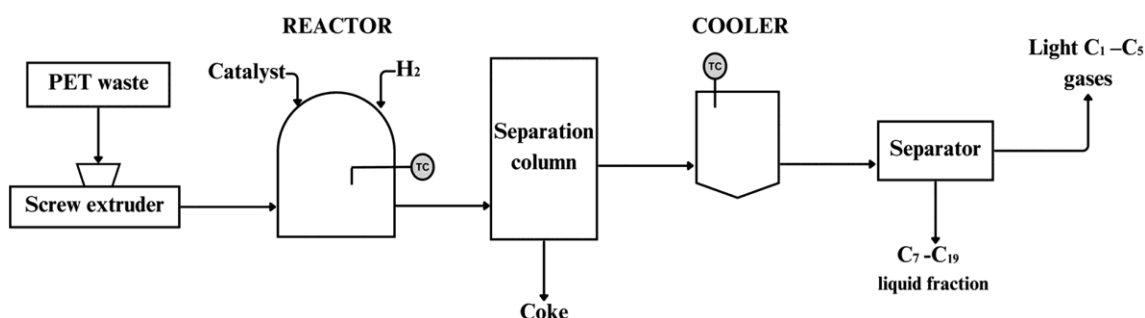
5.7. Hidrocraqueo/hidrogenación

La hidrocraqueo/hidrogenación tiene similitudes con la pirólisis. Sin embargo, en la hidrocraqueo, los residuos de PET se someten a calentamiento en presencia de hidrógeno (H_2).^{51, 86, 89} De hecho, el proceso de hidrocraqueo se utiliza a menudo para tratar los aceites y gases de los productos de pirólisis.⁹⁰ En **la figura 35** se presenta un esquema del proceso de reciclaje de hidrocraqueo/hidrogenación. El proceso implica la descomposición de las moléculas de PET más pesadas en sustancias más ligeras mediante la ruptura de los enlaces carbono-carbono, mientras que simultáneamente se someten los subproductos insaturados a hidrogenación. Por lo tanto, la hidrocraqueo produce un mayor porcentaje de productos saturados en comparación con la pirólisis, lo que lleva a la producción de $\text{C}_7 - \text{C}_{19}$ como productos líquidos de calidad superior.⁹¹ Se produce una mayor fracción de gases a partir del PET en comparación con otros tipos de plástico,⁹¹ y consiste predominantemente en gases de hidrocarburos ligeros $\text{C}_1 - \text{C}_5$.⁹² El proceso también produce un residuo de carbono sólido similar al **coque**. (Muhammad, C.; Onwudili, J.A.; Williams, P.T. Degradación térmica de plásticos de residuos reales y plásticos mixtos simulados en un reactor de pirólisis-catálisis de dos etapas para producción de

combustible. Combustibles energéticos 2015, 29, 2601–2609). Las condiciones de reacción habituales incluyen temperaturas que oscilan entre 300 y 450 °C y presiones que oscilan entre 2 y 15 MPa (20–150 bar) en presencia de H₂ frío presurizado .

Estas condiciones se logran generalmente utilizando un reactor autoclave agitado por lotes. (Ahmad, I.; Khan, M.I.; Khan, H.; Ishaq, M.; Tariq, R.; Gul, K.; Ahmad, W. Estudio de pirólisis de polipropileno y polietileno en productos aceitosos de alta calidad. Int. J. Green Energy 2015, 12, 663–671) Para facilitar la actividad de craqueo, el proceso utiliza un catalizador ácido bifuncional, a menudo una zeolita. Ratnasari, D.K.; Nahil, M.A.; Williams, P.T. Pirólisis catalítica de plásticos de desecho utilizando catálisis escalonada para la producción de aceites hidrocarburos para gama de gasolina. J. Anal. Appl. Pirólisis 2017, 124, 631–637

Figura 38. Esquema del proceso de reciclaje de hidrocraqueo/hidrogenación.



Nota. La fotografía muestra un esquema del proceso de reciclaje de hidrocraqueo/hidrogenación. Tomado de *Schematic of the hydrocracking/hydrogenation recycling process (adapted with permission [Fotografía], por Elsevier, 2005, Copyright 2005* (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

5.8. Solvólisis (despolimerización o quimiólisis)

La solvólisis es un método altamente eficiente utilizado en el reciclaje de plásticos, en el que se emplean compuestos químicos para desintegrar el polímero en sus componentes constituyentes. (KK Bhanderi, JR Joshi , JV PatelJ. Indian Chem. Soc. , 100 (2023) , p. 100843)

La solvólisis presenta ventajas significativas en el reciclaje de plásticos contaminados y heterogéneos, ya que permite la posible mejora de los procesos de filtración y purificación.

El método de solvólisis comprende una serie de procesos que incluyen la glicólisis, la alcoholólisis (metanolólisis), la aminólisis, la amonólisis y la hidrólisis (ácida, neutra y alcalina). (Y.-B. Zhao , X.-D. Lv , H.-G. Ni Chemosphere , 209 (2018) , págs . 707-720)

5.9. Glucólisis

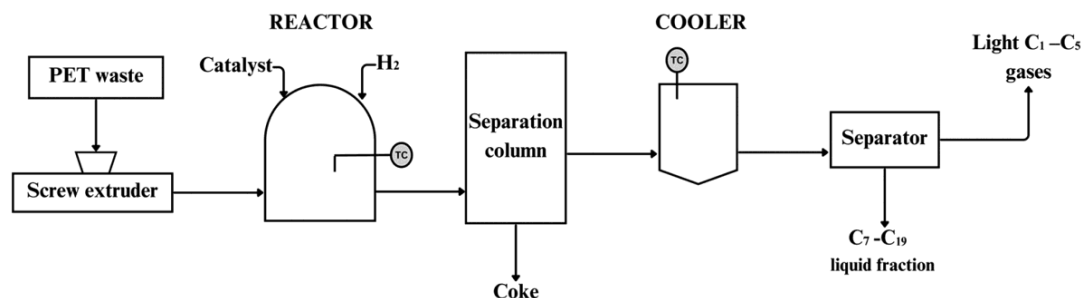
La glucólisis es un proceso de reciclaje destacado que despolimeriza eficazmente el PET en sus componentes constituyentes a través de una reacción de transesterificación, facilitada por un exceso de glicoles como el EG. El esquema del proceso de reciclaje de glucólisis se muestra en **la Fig. 37**. El EG inicia un ataque químico sobre los enlaces éster en los residuos de PET, induciendo así la despolimerización del polímero (como se muestra en **la Fig. 38**). La reacción química ocurre a temperaturas elevadas, típicamente en el rango de 180 a 240 °C, y puede ser facilitada por la presencia de un catalizador como el acetato de zinc.

El producto predominante de la glucólisis consiste en monómeros de bis(2-hidroxietil) tereftalato (BHET), acompañados de pequeñas cantidades de PET sin despolimerizar, dímeros, oligómeros de bajo peso molecular y potencialmente otras impurezas y colorantes.

Es crucial priorizar la eliminación del PET sin despolimerizar, ya que estos oligómeros pueden sufrir policondensación.

Los procesos de purificación pueden presentar cierto grado de complejidad debido a la posible ocurrencia de reacciones de polimerización posteriores. En consecuencia, la destilación al vacío no es una opción viable. En cambio, las metodologías efectivas para separar los componentes en la mezcla despolimerizada incluyen precipitación, agitación, filtración, cristalización y destilación por membrana o molecular.

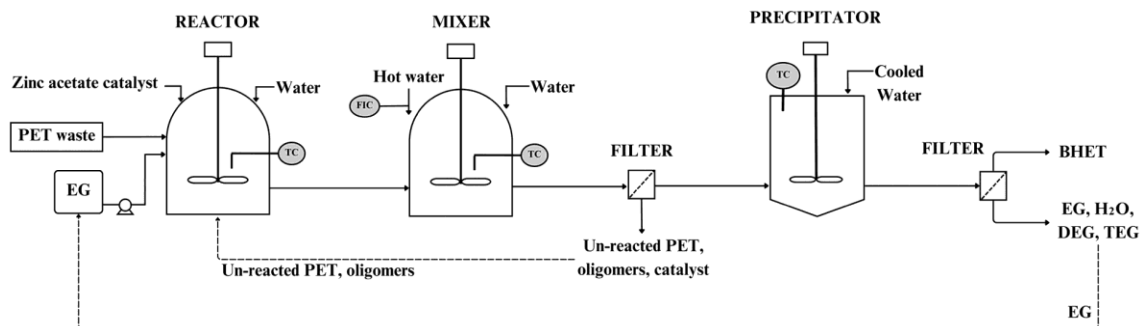
Figura 39. Esquema del proceso de reciclaje de hidrocrackeo/hidrogenación.



Nota. La fotografía muestra un esquema del proceso de reciclaje de hidrocrackeo/hidrogenación. Tomado de *Schematic of the hydrocracking/hydrogenation*

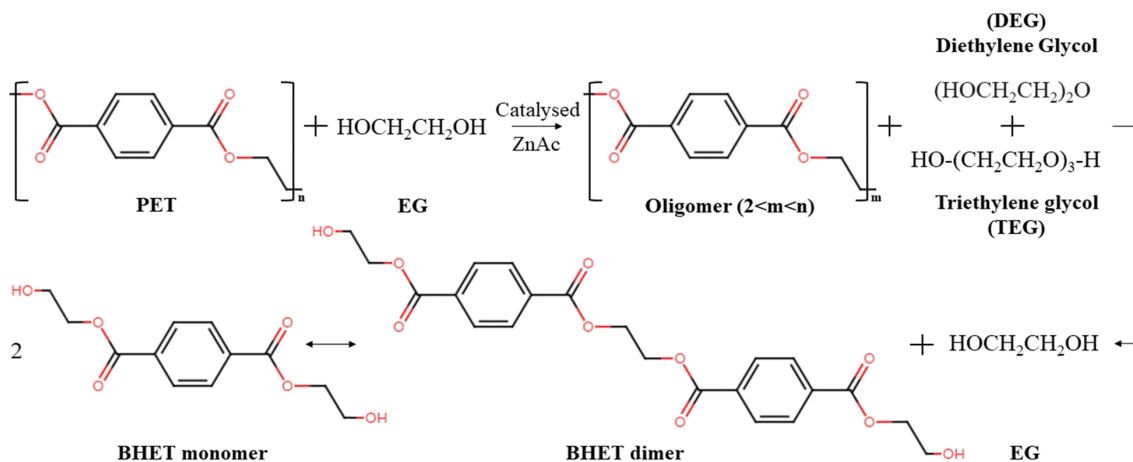
recycling process (adapted with permission [Fotografía], por Elsevier, 2005, Copyright 2005 (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>))

Figura 40. Esquema del proceso de reciclaje de la glucólisis.



Nota. La fotografía muestra un esquema del proceso de reciclaje de la glucólisis. Tomado de *Schematic of the glycolysis recycling process (adapted with permission. 93 Copyright 2013, Springer Nature)*. [Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al. (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

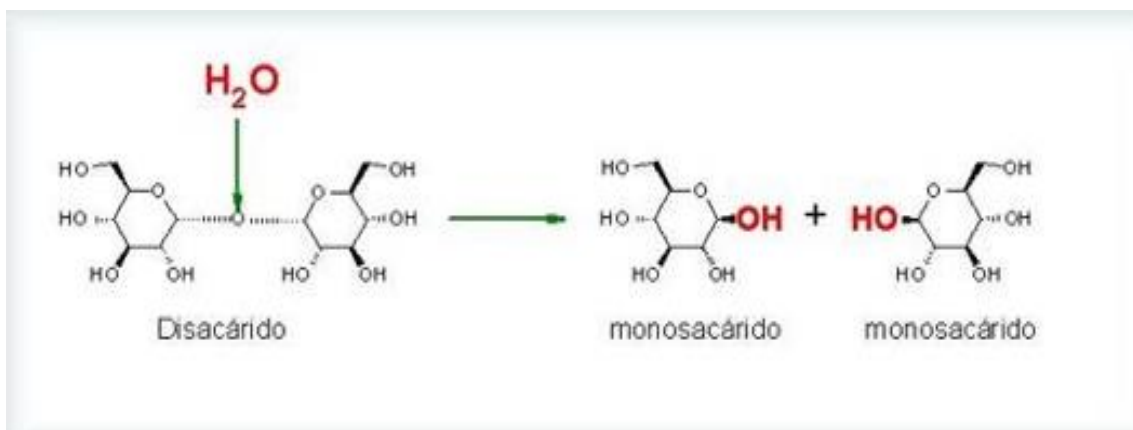
Figura 41. Representación esquemática del mecanismo de glucólisis de PET.



Nota. La fotografía muestra la representación esquemática del mecanismo de glucólisis de PET. Tomado de *Schematic representation of the PET glycolysis mechanism*. [Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al.

(<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

Figura 42. Representación de la hidrólisis de polisacáridos. PET.

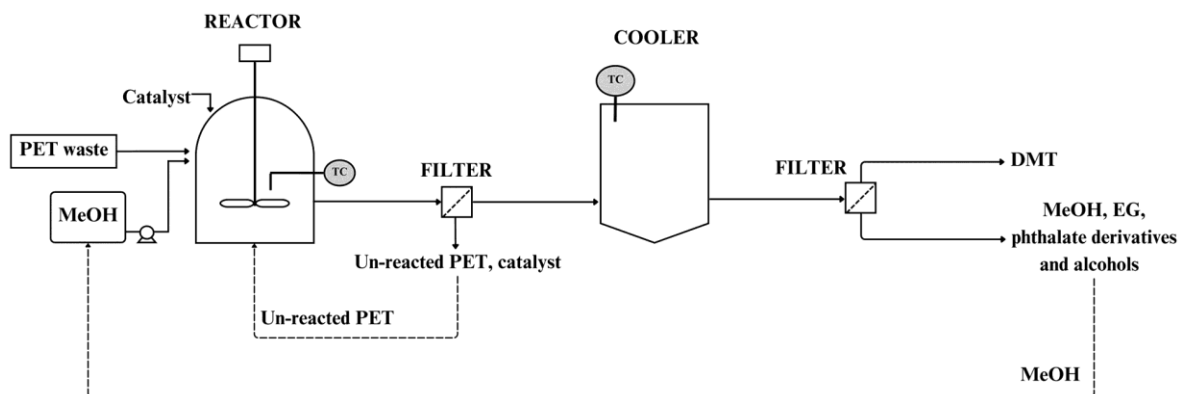


Nota. La fotografía muestra la representación de la hidrólisis de polisacáridos. PET. Tomado de *La Química de la vida. Biología Sesión 3*. [Fotografía], por E. Matallana, E. Sánchez, D. Sebastián, (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

5.10. Alcoholisis

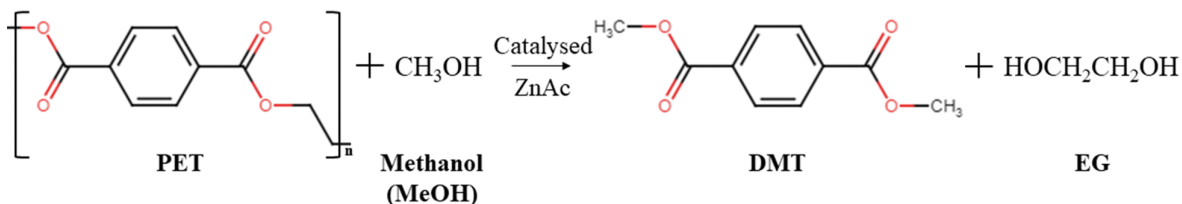
La alcoholisis facilita la despolimerización del PET mediante una reacción de transesterificación que implica el uso de un alcohol, que suele ser metanol. [29](#) La representación esquemática del proceso de reciclaje de metanólisis se presenta en [la Fig. 40](#). El grupo carbonilo en la cadena polimérica del PET es sometido al ataque del alcohol, lo que da como resultado la formación de tereftalato de dimetilo (DMT) y EG. [54](#) Este proceso tiene lugar a temperaturas que van desde 180 a 280 °C y presiones que van desde 2 a 4 MPa, acompañado de un catalizador como acetato de zinc, acetato de cobalto, dióxido de plomo o acetato de magnesio. [6,29](#) [La Fig. 41](#) ilustra una representación esquemática que detalla el mecanismo de metanólisis del PET. Los productos resultantes también pueden consistir en algunos subproductos, incluidos derivados de ftalato y una variedad de alcoholes. [29](#) Para garantizar la eficiencia del proceso, es esencial eliminar cualquier agua residual, ya que desactivaría el catalizador y formaría un azeótropo indeseable. [94](#) Además, para evitar reacciones posteriores y la posible pérdida de DMT, es esencial separar el catalizador de los productos resultantes.

Figura 43. Esquema propuesto del proceso de reciclaje de metanólisis.



Nota. La fotografía muestra el esquema propuesto del proceso de reciclaje de metanólisis. Tomado de *Schematic of the glycolysis recycling process (adapted with permission. Copyright 2013, Springer Nature)*. [Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al. (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

Figura 44. Representación esquemática del mecanismo de la metanólisis del PET.



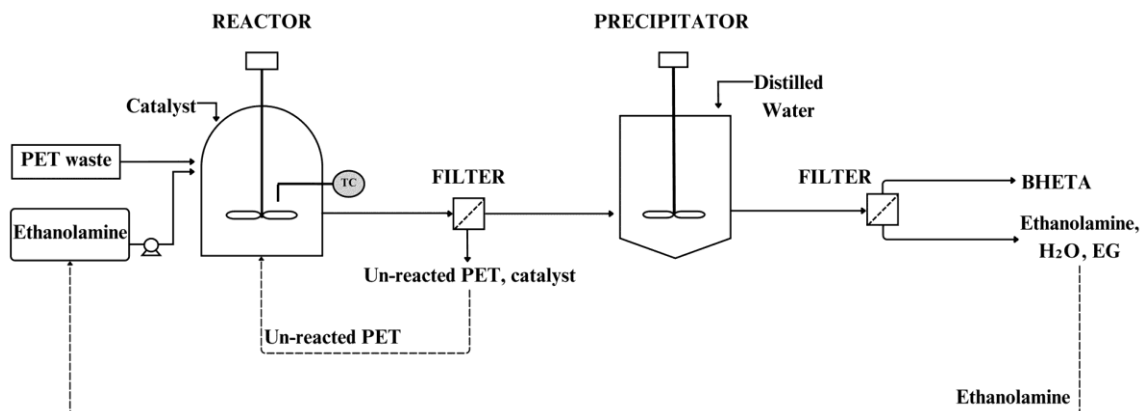
Nota. La fotografía muestra una representación esquemática del mecanismo de la metanólisis del PET. Tomado de *Schematic representation of the mechanism of PET methanolysis*. [Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al. (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

5.11. Aminólisis

La aminólisis implica la despolimerización del PET mediante su reacción con una amina. [La figura 42](#) proporciona un esquema de un proceso de reciclaje de aminólisis. Las aminas, como las alilaminas, hidrazinas, poliaminas y morfollinas, experimentan una reacción química con el grupo éster del PET, lo que da como resultado la formación de derivados monoamínicos y diamínicos de EG y TPA. [La figura 43](#) ilustra una representación esquemática del mecanismo de la aminólisis del PET. La reacción tiene lugar en un rango de temperatura moderado de 20 a 100 °C y se ve facilitada por la presencia de un catalizador, que a menudo incluye ácido acético glacial, acetato de sodio o sulfato de potasio. La etanolamina es una amina comúnmente utilizada en la aminólisis, que da como resultado la producción de bis(2-hidroxietileno) tereftalamida (BHETA) y algo de EG. [6](#) El producto BHETA se puede precipitar posteriormente añadiendo agua destilada mientras se agita.

R. Meys , A. Kätelhön , M. Bachmann , B. Winter , C. Zibunas , S. Suh , A. Bardow
Ciencia , 374 (2021) , págs . 71-76

Figura 45. Esquema propuesto del proceso de reciclaje de aminólisis.

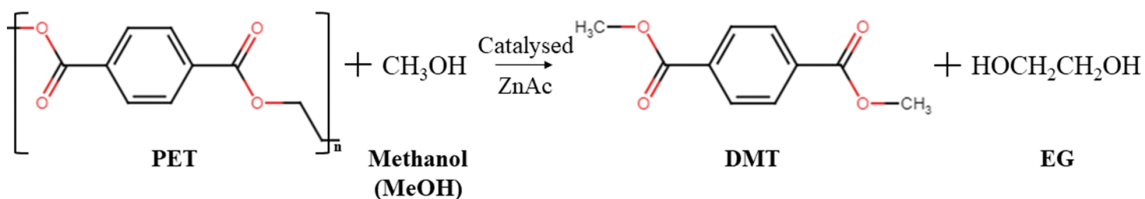


Nota. La fotografía muestra un esquema propuesto del proceso de reciclaje de aminólisis. Tomado de *Proposed schematic of the aminolysis recycling process*.

[Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al.

(<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

Figura 46. Representación esquemática del mecanismo de aminólisis de PET.



Nota. La fotografía muestra la representación esquemática del mecanismo de aminólisis de PET. Tomado de *Schematic representation of the mechanism of PET methanolysis*.

[Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al.

(<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

5.12 Enzimólisis

La enzimólisis es un mecanismo de degradación biológica en el que los plásticos sufren descomposición enzimática y microbiana. Este fenómeno puede ocurrir espontáneamente en el medio natural o acelerarse mediante ingeniería genética para producir y/o modificar

enzimas y microorganismos. S. Sharifian , N. Asasian-Kolur J. Anal. Appl. Pyrolysis , 163 (2022) ,

Estos procesos ofrecen una solución potencialmente viable para despolimerizar los residuos plásticos derivados del petróleo en componentes aptos para el reciclaje o, alternativamente, mineralizarlos en CO₂, agua y nueva biomasa. N. Mohanan , Z. Montazer , PK Sharma , DB Levin Front. Microbiol. , 11 (2020) , pág. 580709 105. AA Shah , F. Hasan , A. Hameed , S. Ahmed Biotechnol . Adv. , 26 (2008) , págs . 246-265

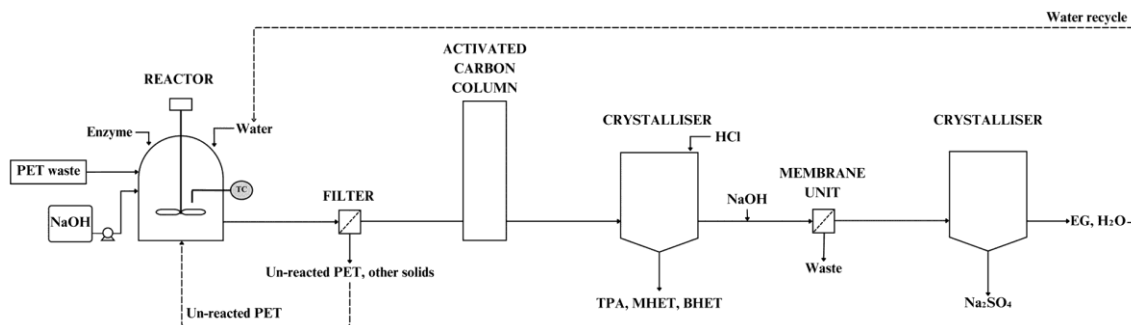
La degradación enzimática del PET implica la utilización de enzimas como biocatalizadores para catalizar reacciones químicas, con un enfoque específico en la ruptura de enlaces éster en el PET.

Las enzimas se adhieren inicialmente a la superficie del polímero, después de lo cual los enlaces sufren hidroperoxidación/hidrólisis. N. Mohanan , Z. Montazer , PK Sharma , DB Levin Front. Microbiol. , 11 (2020) , pág. 580709 Esta reacción degrada el PET en sus componentes constituyentes, a saber, TPAEG, N. Mohanan , Z. Montazer , PK Sharma , DB Levin. Front. Microbiol. , 11 (2020) , pág. 580709 permitiendo su uso posterior para la producción de PET reciclado.

La hidrólisis enzimática es el proceso más investigado para la degradación del PET. Sin embargo, otras reacciones similares incluyen reacciones enzimáticas oxidativas, enzimas que exhiben actividad polimerasa y enzimas que poseen capacidades de esterificación o transesterificación. La figura 44 muestra un esquema del proceso de reciclaje enzimático. Las enzimas más investigadas para el PET incluyen lipasas, cutinasas, esterasas y carboxilesterasas. Las enzimas tienen una limitación importante, ya que no pueden funcionar correctamente en residuos de PET a granel; su función a menudo se limita a pequeños oligómeros. Además, la actividad de las enzimas hidrolizadoras de PET puede verse obstaculizada por subproductos de hidrólisis incompleta, específicamente mono(2-hidroxietil) tereftalato (MHET) y BHET, que funcionan como inhibidores competitivos de las enzimas. La eliminación de MHET y BHET cuando se utilizan enzimas para la biodegradación de PET, sin comprometer la integridad de la enzima, presenta desafíos significativos.

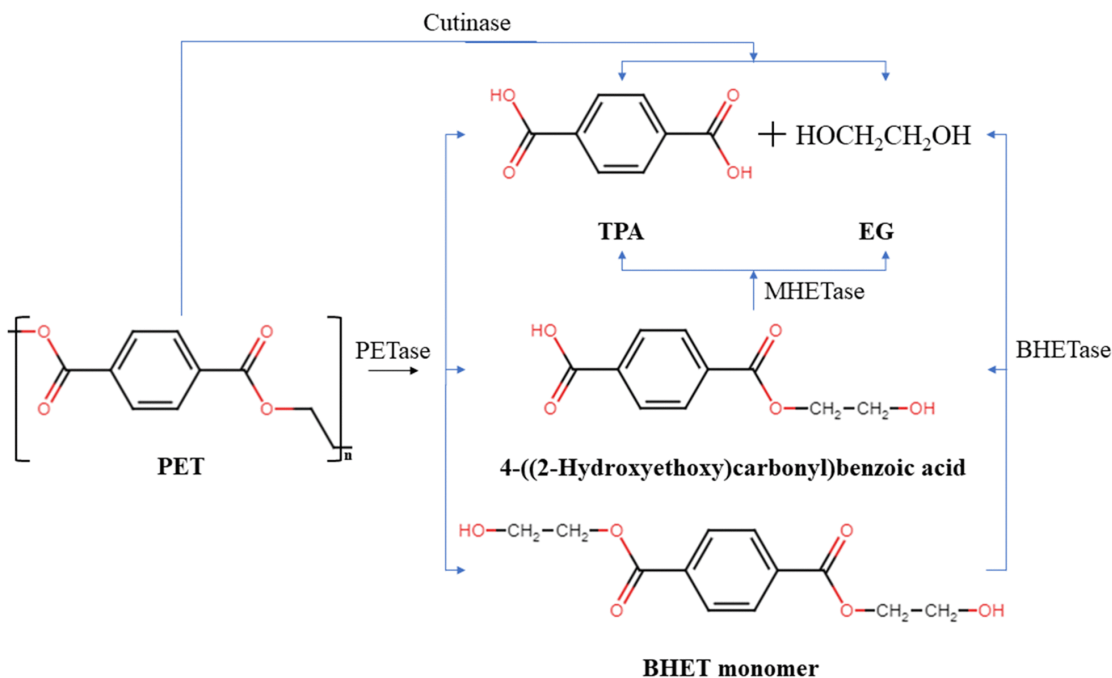
Estos factores resaltan la importancia de obtener enzimas que sean resistentes a la inhibición por MHET y BHET, ya sea a través de cribado directo o modificación, enzimática. T. Narancic , KE O'Connor Microbio. Biotecnología. , 10 (2017) , págs. 1232 - 1235 La figura 45. proporciona una representación esquemática del mecanismo de degradación enzimática del PET.

Figura 47. Esquema del proceso de reciclaje enzimático.



Nota. La fotografía muestra un esquema del proceso de reciclaje enzimático. Tomado de *Schematic of the enzymatic recycling process (adapted with permission. I14 Copyright 2021, Elsevier)*. [Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al. (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

Figura 48. Representación esquemática del mecanismo de degradación enzimática del PET.



Nota. La fotografía muestra una representación esquemática del mecanismo de degradación enzimática del PET. Tomado de *Schematic representation of the mechanism of PET enzymatic degradation* [Fotografía], por Hamidreza Mahdavi et al. (<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926225008180>)

5.13. Resultados de la hidrólisis

En la Tabla 5 se muestran los valores obtenidos en el ensayo de MFI realizado al PET, PP y PLA puro y a las mezclas preparadas, con distintas proporciones de PLA. En ella se observa que, el PLA presenta un MFI de 13, que representa una diferencia que supera los nueve puntos en comparación al MFI del PET (de 4) y del PP (de 0,85). Es de resaltar, que algunos autores señalan que el MFI está relacionado de manera inversa con el peso molecular del polímero, por lo que esto resultados indican que el PLA posee un peso molecular bajo en comparación con el PET y PP.

Esto puede estar relacionado a la naturaleza del PLA, el cual es un polímero biodegradable de fuentes naturales, mientras que el PET y PP, son polímeros derivados del petróleo y sus cadenas moleculares son de gran tamaño [Xue, Y.; Johnston, P.; Bai, X. Efecto del modo de contacto catalizador y la atmósfera gaseosa durante la pirólisis catalítica de plásticos de desecho. Conversación de energía. Manag. 2017, 142, 441–451]. En tanto, que otros autores indican, que es una ventaja que un polímero posea un peso molecular bajo, ya que esto favorece el proceso de degradación que puede transformar a estos materiales en otros componentes de bajo pesos molecular, tales como: dióxido de carbono, humus, derivados de los ácidos carboxílicos, entre otros [Paula, T.P.; Marques, M.D.F.V.; Marques, M.R.D.C.; Oliveira, M.S.; Monteiro, S.N. Pirólisis térmica y catalítica de residuos plásticos urbanos: Zeolitas modificadas de mordenita y ZSM-5. Química 2022, 4, 297–315.].

Tabla 18. Valores de Índice de Fluidéz obtenido para los materiales puros utilizados y de las mezclas preparadas a diferentes proporciones de PLA

Material	Material puro g/(10 min)	Porcentaje de PLA añadido, %.			
		5,00	10,00	15,00	20,00
PP	0,85 ±	1,21	1,4 ±	1,9 ±	2,8
	0,03	± 0,01	0,2	0,2	± 0,2
PET	4 ± 1	18 ±	12 ±	13 ±	21 ±
		10	3	6	10

El PLA al 100 % obtuvo: (13 ± 2) g/(10 min).

Nota. Desde Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos, por Medina J. et al, 2018, (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

Ahora bien, se puede observar que la incorporación del PLA al PP genera valores de MFI superiores que al del polímero sintético. Esta circunstancia se encuentra asociado a que las propiedades resultantes en las muestras son productos de ambos componentes en las mezclas, por lo tanto, al aumentar el porcentaje de PLA, el índice de fluidez se

incrementa. Esta misma analogía puede aplicarse para el peso molecular en las mezclas, en donde la presencia del PLA reduce aparentemente esta propiedad, ocasionando que sea susceptibles a procesos de degradación que provocan el acortamiento en las cadenas poliméricas resultantes [Aishwarya, K.N.; Sindhu, N. Pirólisis asistida por microondas de residuos plásticos. *Procedia Technol.* 2016, 25, 990–997.].

En tanto, que al incorporar PLA al PET se observa similar comportamiento que en las mezclas PP/PLA, con excepción a las muestras con un 5 % de PLA, donde existe una discrepancia con lo antes mencionado, ya que se observa que el MFI es mayor en esta proporción en comparación a los otros porcentajes de PLA agregados, salvo al correspondiente con el 20 % de PLA.

La causa de esto, pudo ser ocasionada a la distribución de las partículas del PLA; y al someterla a altas temperaturas, se alcanzó la fundición de las zonas en la que se agrupó el PLA, con baja cantidad de PET, por lo que se obtuvo un mayor índice de fluidez [Marcilla, A.; Gómez-Siurana, A.; Berenguer, D. Estudio de la influencia de las características de diferentes sólidos ácidos en la pirólisis catalítica de distintos polímeros. *Aplaus. Catal. A Gen.* 2006, 301, 222–231]. Los resultados obtenidos indican que existen diferencias significativas en los valores del índice de fluidez en las mezclas de PP/PLA y PET/PLA preparadas. Por lo, que se consideró las mezclas con 20 % de PLA para llevar a cabo los procesos de degradación [Zhang, Y.; Ji, G.; Chen, C.; Wang, Y.; Wang, W.; Li, A. Aceites líquidos producidos por pirólisis de residuos plásticos con portador de calor en horno rotatorio. *Proceso de combustible. Technol.* 2020, 206 y 106455.].

Durante el desarrollo de los procesos de degradación aplicados se observó que el PLA se fue opacando al paso de los días. Perdiendo su apariencia transparente inicial hasta alcanzar un aspecto blanquecino al final de ambos procesos. La opacidad del PLA puede ser por la formación de agujeros en la muestra durante la degradación o por la evolución en la cristalinidad de la matriz polimérica [9]. Sin embargo, la apariencia física es similar en ambos procesos.

Por lo que, a simple vista no se puede inferir que medio está degradando con mayor intensidad al PLA. En cuanto al PP y PET se observó que el aspecto físico de las muestras no varió durante ambos procesos. Por lo que, es anticipado señalar que las muestras no fueron degradadas.

En relación a las mezclas de PP/20 %PLA se observó en ambos procesos una menor opacidad que la observado en el PLA puro. En tanto que, para la mezcla PET/20 %PLA no se observó ningún cambio en su aspecto físico. En virtud de lo anterior, se establece que mediante observaciones macroscópicas no se puede evidenciar si los muestras son degradadas por los procesos en estudios.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en el porcentaje de pérdida de masa (%Pm) durante los procesos de degradación. En ella, se evidencia una disminución de masa de las muestras analizadas a lo largo del periodo de estudio.

En la Figura 1 y en la Figura 2 se muestran las tendencias obtenidas en el proceso de degradación hidrolítica y de biodegradación respectivamente.

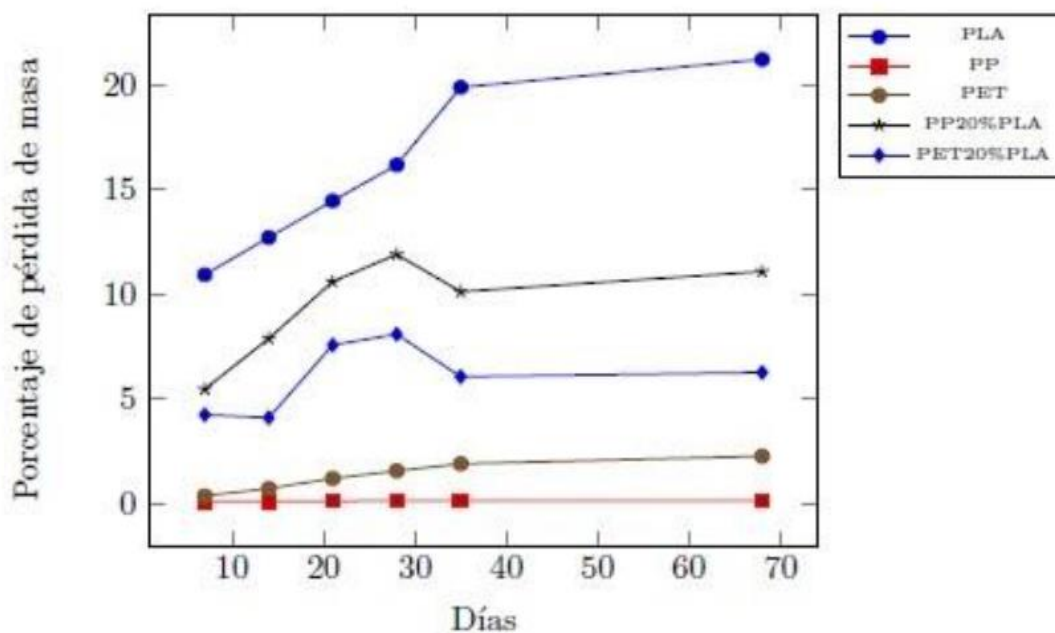
Tabla 19. Porcentaje de pérdida de masa (%Pm) durante los procesos de degradación.

Material	Día del proceso de Degradación Hidrolítica						Día del proceso de Biodegradación					
	7	14	21	28	35	68	7	14	21	28	35	68
PLA	10,92	12,70	14,45	16,16	19,87	21,20	0,57	1,21	1,83	2,44	3,05	3,68
PP	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,03	0,08	0,13	0,18	0,23	0,35
PET	0,36	0,71	1,19	1,55	1,89	2,25	0,22	0,45	0,87	1,33	1,80	2,26
PP/20%PLA	5,45	7,87	10,59	11,89	10,11	11,07	0,03	0,28	0,41	0,56	0,73	0,94
PET/20%PLA	4,23	4,09	7,56	8,08	6,05	6,25	0,34	0,55	0,69	0,93	1,41	1,86

%P_m ±0,01

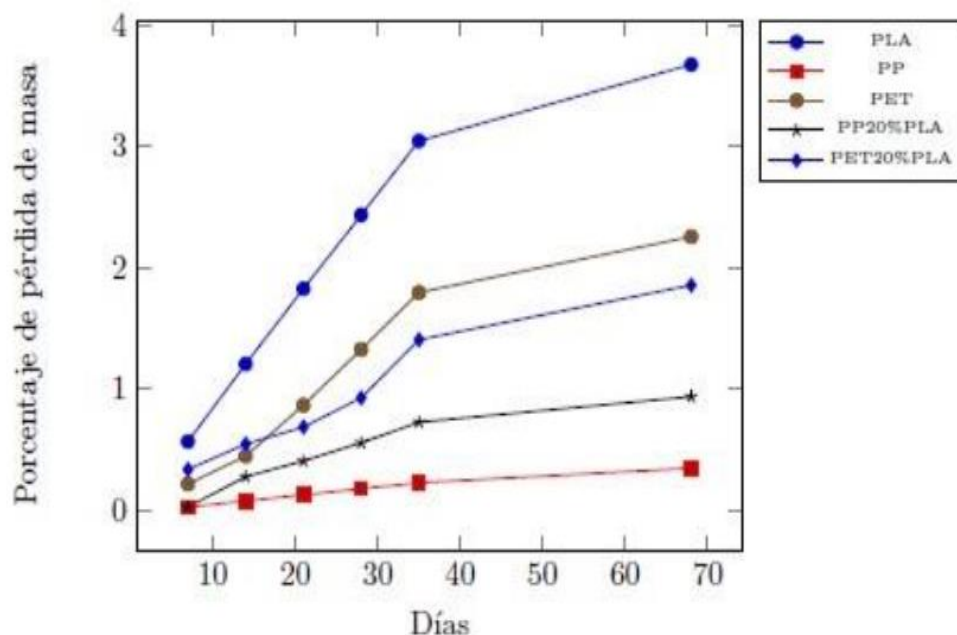
Nota. Desde Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos, por Medina J. et al, 2018, (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>)

Figura 49. Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de degradación hidrolítica.



Nota. El gráfico muestra la evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de degradación hidrolítica. Tomado de Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos [Gráfico], por J. Medina et al., 2018, (<https://www.redalyc.org/journal/707/70757669013/html/>)

Figura 50. Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de biodegradación.



Nota. El gráfico muestra la evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de biodegradación.. Tomado de *Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos* [Gráfico], por J. Medina et al., 2018, (<https://www.redalyc.org/journal/707/70757669013/html/>)

En la Figura 47 se observa que la pérdida de masa en el PP fue constante y poco significativa, con apenas 0,12 % de pérdida durante el tiempo de degradación. En tanto que, en el PET se obtuvo que la pérdida de masa se incrementó levemente de 0,36 % desde el día 7, hasta 2,25 % al final del proceso. El PLA puro fue el material que presentó una mayor pérdida de masa con 21,20 %. Estos resultados, indican que el PP y PET tienen buena resistencia química y son capaces de soportar las condiciones de hidrólisis por ser materiales termoplásticos, mientras que el PLA por tener enlaces del tipo éster, hidrolíticamente inestables, reúne las características adecuadas degradarse mediante el proceso de hidrólisis [6, 9].

Es de resaltar, que el PET posee grupo éster tal como el PLA. Sin embargo, su bajo índice de fluidez (asociado a un alto peso molecular) evita que se degrada como lo hace el PLA, el cual posee un alto índice de fluidez que facilita su degradación. Ahora bien, en la mezcla de PP/20 %PLA se obtuvo una pérdida de masa de 11,07 % al final del proceso, mientras que en la muestra de PET/20 %PLA de 6,06 %. Estos valores pueden estar asociado a las interacciones que ocurren entre los polímeros. Es de suponer, que la poca afinidad que debe existir entre el PP y el PLA ocasione una mayor pérdida de masa que

en la mezcla de PET y PLA donde las interacciones entre los polímeros son mayores debido a la presencia del grupo éster en ambos compuestos.

En la Figura 32 se observa que el porcentaje de pérdida de masa de las muestras sometidas al proceso de biodegradación no supera el 4 %. El PLA con 3,68 % fue el material con la mayor pérdida de masa durante el periodo de biodegradación, mientras que en el PET se obtuvo 2,26 % y en el PP 0,38 %.

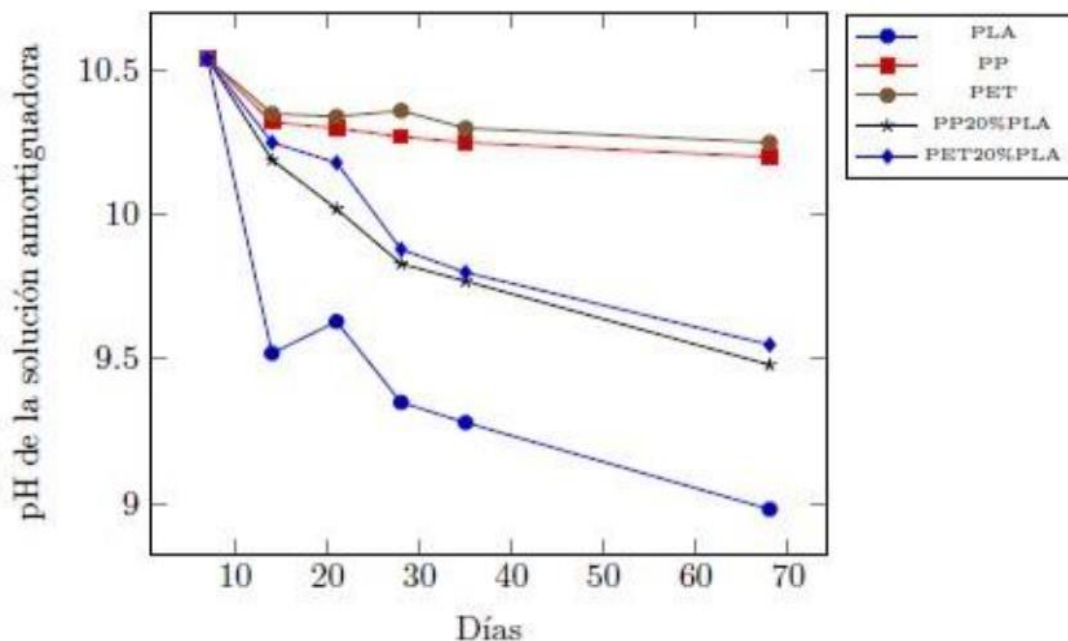
Esto puede atribuirse a que los microorganismos colonizan la superficie del PLA y son capaces de segregar enzimas que rompen en pequeños fragmentos el polímero. En tanto que, en el PET y PP, por ser polímeros sintéticos son resistentes a la degradación biológica, puesto que los microorganismos no son capaces de romper los enlaces C-C; y el carácter hidrofóbico, inhibe la actividad enzimática [Zhang, Y.; Ji, G.; Chen, C.; Wang, Y.; Wang, W.; Li, A. Aceites líquidos producidos por pirólisis de residuos plásticos con portador de calor en horno rotatorio. *Proceso de combustible. Technol.* 2020, 206 y 106455]. Ahora bien, en la mezcla de PP/20 %PLA se obtuvo una pérdida de masa de 0,94 % al final del proceso, lo que indica que la inclusión de PLA al PP, no acelera significativamente el proceso de biodegradación. En tanto que, en la muestra de PET/20 %PLA la pérdida de masa fue 1,86 %, lo que representa que la incorporación de PLA al PET, disminuye la pérdida de masa durante el proceso de biodegradación, debido a las interacciones existentes entre los polímeros que inhiben la actividad enzimática.

En la Figura 3 se presenta la variación del pH de la solución amortiguadora en el proceso de degradación hidrolítica. En ella, se observa que el pH de las soluciones al final del proceso es menor que el pH inicial, el cual fue de 10,54.

Esto se debe, a que en la degradación hidrolítica se liberan especies de bajo peso molecular de naturaleza ácida [9, 17]. Ahora bien, el pH de la solución con las muestras de PET disminuyó a 10,25 esto pone en evidencia la resistencia química del polímero debido a los grupos funcionales que se encuentra en su cadena carbonada [6]. Por su parte, en la solución con PP se obtuvo un pH de 10,20.

Esta disminución es consecuencia del carácter no higroscópico del PP, que hace que la solución alcalina solo esté en contacto superficial con el PP. Además, de la estructura química del PP con enlaces de carbono (-C-C-) que evitan que la degradación hidrolítica se lleve a cabo. En tanto, que en la solución con PLA se obtuvo la mayor disminución de pH con 8,89 lo que indica que las cadenas de PLA fueron atacadas hidrolíticamente facilitando la ruptura de las cadenas y aumentando la posibilidad de liberar mayor cantidad de grupos ácidos al medio [1 Zhang, Y.; Ji, G.; Chen, C.; Wang, Y.; Wang, W.; Li, A. Aceites líquidos producidos por pirólisis de residuos plásticos con portador de calor en horno rotatorio. *Proceso de combustible. Technol.* 2020, 206 y 1064557]. En cuanto, a las soluciones con las muestras PP/20 %PLA y PET/20 %PLA el pH fue de 9,48 y 9,55 respectivamente. Esto se encuentra en correspondencia a lo señalado anteriormente referente a las interacciones que se generan entre el PLA con el PP y el PET en cada mezcla, que hacen que el ataque hidrolítico sea mayor en el PP que en el PET.

Figura 51. Variación del pH de la solución amortiguadora durante el proceso de degradación hidrolítica.

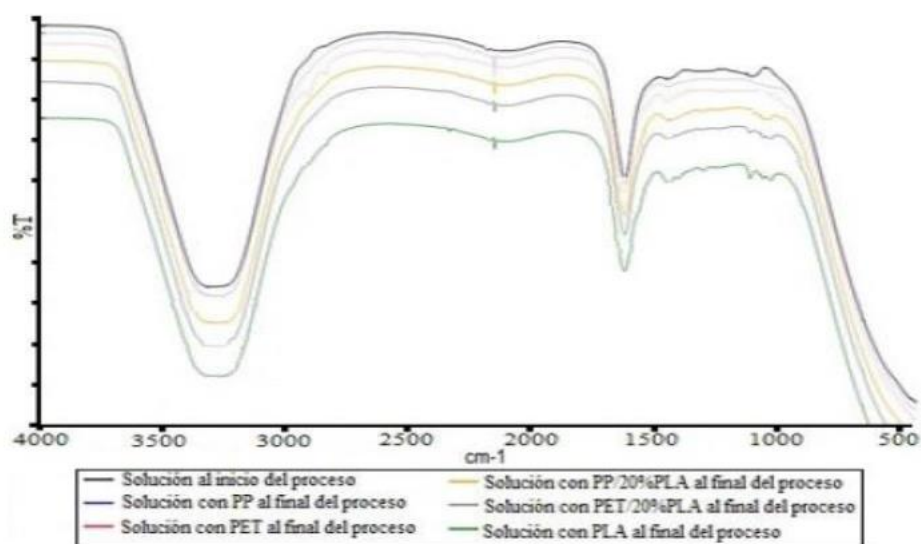


Nota. El gráfico muestra la variación del pH de la solución amortiguadora durante el proceso de degradación hidrolítica. Tomado de *Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos* [Gráfico], por J. Medina et al., 2018, (<https://www.redalyc.org/journal/707/70757669013/html/>)

En la Figura 4, se muestra los espectros infrarrojos de la solución amortiguadora utilizada en la degradación hidrolítica del PET, PP, PLA, PP/20 %PLA y PET/20 %PLA, tanto al inicio del proceso como al final del mismo. En ella, se puede observar la banda característica del grupo oxidrilo (-OH) en 3294 cm^{-1} , cuyo pico es mayor al resto, debido a los puentes de hidrógenos que están presentes.

Seguidamente en la banda 2930 cm^{-1} , correspondiente a las soluciones amortiguadoras del PET y PLA, se mostró la presencia de los enlaces C-H de hibridación sp^3 , ya que absorben frecuencia justo por debajo de 3000 cm^{-1} .

Figura 52. Espectro Infrarrojo de la solución amortiguadora utilizada en el proceso de degradación hidrolítica.



Nota. El gráfico muestra el espectro Infrarrojo de la solución amortiguadora utilizada en el proceso de degradación hidrolítica. Tomado de *Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos* [Gráfico], por J. Medina et al., 2018, (<https://www.redalyc.org/journal/707/70757669013/html/>)

En este sentido, se observa en 1637 cm-1 un pico en común para todas las soluciones. Esto es característico de la solución de amoníaco que posee adicionalmente un pico en las bandas 3444 cm-1 y 3337 cm-1, los cuales se aprecian en el espectro debido al solapamiento de bandas que puede ocurrir entre 3600 cm-1 y 3000 cm-1, por motivo de las interacciones de puentes de hidrógenos que se encuentra en la solución. Además, se obtuvo un pico entre 1453 cm-1 -1461 cm-1 producto de los iones amonio (NH4+) del cloruro de amonio presente en la solución; Para valores altos de pH, este grupo funcional se aprecia en este rango. Posteriormente en 1129 cm-1 se aprecia la formación de un pico a medida que la sustancia es más susceptible a degradarse hidrológicamente, atenuándose en la solución amortiguadora que estuvo en contacto con el PLA. Esta banda es debido a la tensión en el enlace C-O. Por último, se evidencia que en 1038 cm-1 aparece la banda característica de las trazas del grupo carboxilo (-COOH). [Swamardika, I.B.A.; Winaya, I.N.S.; Hartati, R.S. Utilización de residuos plásticos usando pirólisis en lecho fijo. 24–25 de octubre de 2018; IOP Publishing: Bristol, Reino Unido, 2020; Volumen 539, p. 012021].

En la Figura 5 se presenta el espectro infrarrojo realizado al PP, PET y PLA al inicio del proceso (día0) y al final de los procesos de degradación utilizados (día 68).

En ella, se observa que los tres espectros del PP (a, b y c) poseen las bandas características del PP; 4 picos entre 2950 cm-1 y 2838 cm-1 debido a vibraciones de

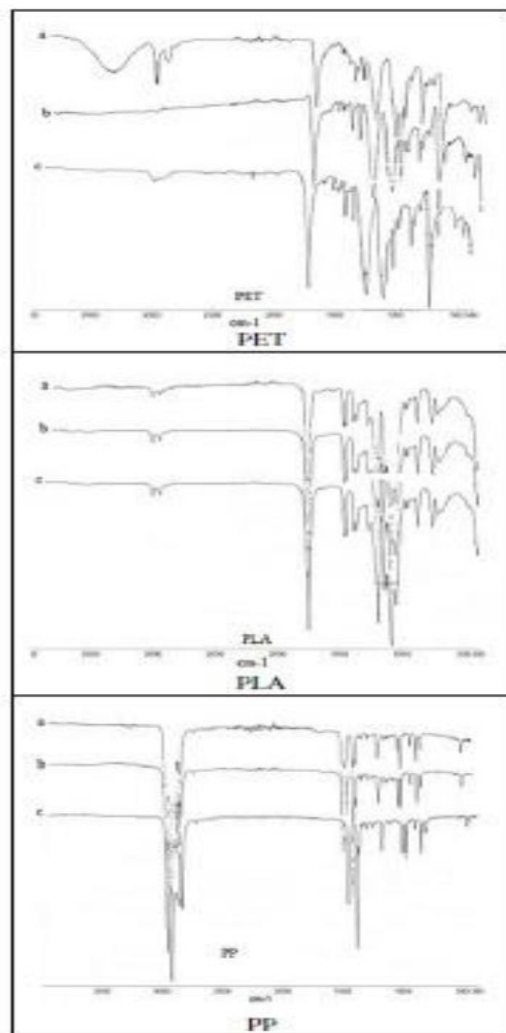
tensión (estiramiento) y las bandas por flexión (doblamiento) a 1455 cm^{-1} , generadas por la cadena carbonada. Esto demuestra que el PP no sufrió ningún cambio significativo en su estructura durante el desarrollo de los procesos de degradación [Anuar Sharuddin, S.D.; Abnisa, F.; Wan Daud, W.M.A.; Aroua, M.K. Una reseña sobre la pirólisis de residuos plásticos. *Conversación de energía. Manag.* 2016, 115, 308–326.].

Por su parte, en el espectro b del PET correspondiente al proceso de biodegradación, se observa la pérdida de los grupos oxidrilos (-OH) aportados por el etilenglicol presente en los extremos de la cadena. Esto puede atribuirse al ataque de los microorganismos, que genera como producto dióxido de carbono (CO_2), lo que explica la desaparición del pico presente en la banda 1046 cm^{-1} , correspondiente al C-O.

Además, se aprecia un pico en 2974 cm^{-1} asociado al enlace -CH proveniente del grupo aromático presente en las cadenas del PET, lo cual es lógico en los procesos de degradación biológica que transforman estos en productos de bajo peso molecular [Swamardika, I.B.A.; Winaya, I.N.S.; Hartati, R.S. Utilización de residuos plásticos usando pirólisis en lecho fijo. 24–25 de octubre de 2018; IOP Publishing: Bristol, Reino Unido, 2020; Volumen 539, p. 012021]. Otro cambio notable es el aumento del pico en la región 1713 cm^{-1} propio al estiramiento del enlace C=O del grupo éster. Esto es debido a las rupturas de la cadena que pueden formar grupos finales tipo aldehído y también por los largos segmentos de cadena del PET que pueden unirse al anillo aromático proveniente de dicha escisión, lo que confirma el hecho de que se observen bandas alrededor de 1665 cm^{-1} correspondiente a enlaces de tipo Ar-CO-Ar [Swamardika, I.B.A.; Winaya, I.N.S.; Hartati, R.S. Utilización de residuos plásticos usando pirólisis en lecho fijo. 24–25 de octubre de 2018; IOP Publishing: Bristol, Reino Unido, 2020; Volumen 539, p. 012021].

Todo esto, corrobora lo antes señalado sobre la biodegradación que experimenta el PET. En cuanto, al espectro c de la Figura 5, referente a la degradación hidrolítica del PET se observan algunos cambios en la estructura del material que demuestran que el PET también es degradado durante este proceso.

Figura 53. Espectro infrarrojo del PP, PET y PLA. (a) Al inicio del proceso, día 0. (b) Al final del proceso de biodegradación, día 68. (c) Al final del proceso de degradación hidrolítica, día 68.



Nota. El gráfico muestra el espectro infrarrojo del PP, PET y PLA. (a) Al inicio del proceso, día 0. (b) Al final del proceso de biodegradación, día 68. (c) Al final del proceso de degradación hidrolítica, día 68. Tomado de *Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos* [Gráfico], por J. Medina et al., 2018, (<https://www.redalyc.org/journal/707/70757669013/html/>)

En relación al PLA, se observa en los espectros b y c de la Figura 5 la aparición de una nueva banda en 2946 cm^{-1} debido a un alargamiento de los grupos C-H [19]. En la Tabla 7, se muestra que para las bandas de los grupos funcionales C=O y CO, el porcentaje de transmitancia en ambos procesos disminuye (mayor absorbancia) en comparación al espectro obtenido al inicio del proceso, como se observa para la banda

más importante (1747 cm^{-1}) correspondiente al grupo carbonilo. El PLA presentó al inicio una transmitancia de 66,45 %T, y al final del proceso de biodegradación obtuvo una transmitancia de 22,78 %T y en la degradación hidrolítica de 21,16 %T. Esto se debe a que en la degradación se producen nuevas especies, como ácidos carboxílicos, que ocasionan un aumento de la absorbancia en la banda.

Por lo antes mencionado, se corrobora que el PLA fue degradado en ambos procesos, y que la degradación hidrolítica actuó con mayor intensidad sobre el PLA [Swamardika, I.B.A.; Winaya, I.N.S.; Hartati, R.S. Utilización de residuos plásticos usando pirólisis en lecho fijo. 24–25 de octubre de 2018; IOP Publishing: Bristol, Reino Unido, 2020; Volumen 539, p. 012021].

En cuanto, a los espectros b y c de la Figura 6 de la muestra de PET/20 %PLA se observa un ligero desplazamiento del grupo carbonilo debido a la presencia de interacciones del tipo puentes de hidrógeno que influyen en su desplazamiento.

Esta banda del grupo carbonilo (C=O) se mantiene en $1712\text{--}1713\text{ cm}^{-1}$ por lo que se puede inferir que la energía de activación de la reacción del grupo carbonilo terminal en la cadena del PLA es mucho más baja que en la cadena del PET, debido a la baja concentración del grupo carbonilo perteneciente a la cadena de PLA. En la mezcla se generó entre los polímeros una baja interacción molecular; que ocasiona una mínima degradación en ambos procesos [6].

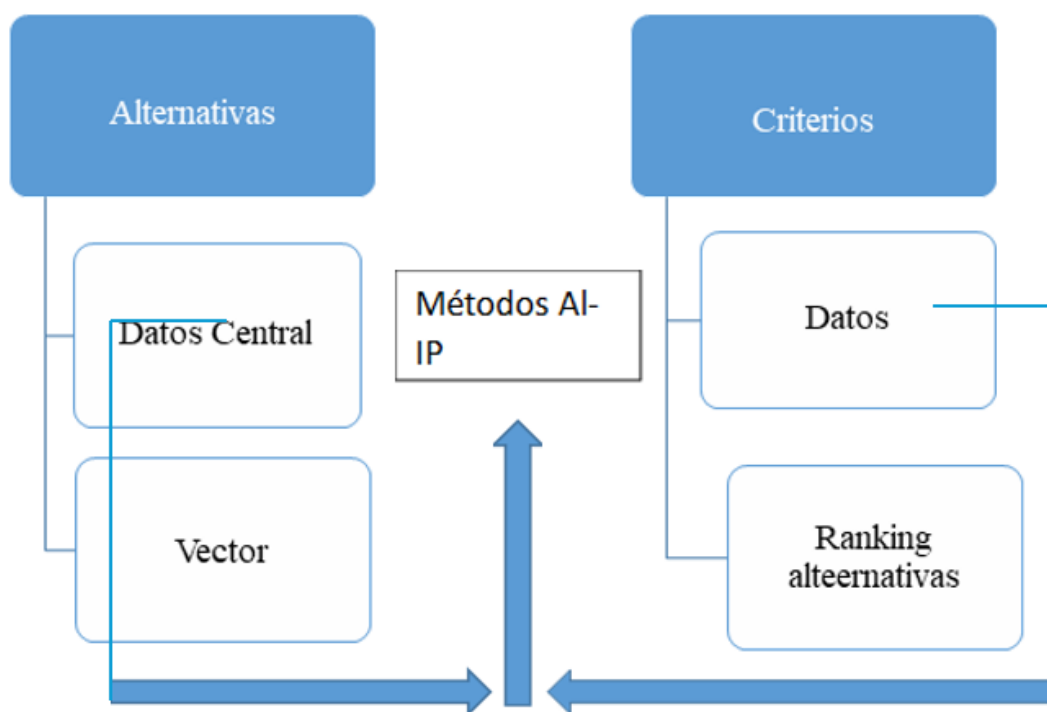
6. IMPLEMENTACIÓN

Para la aplicación de esta empresa se puede iniciar desde cero o lo más conveniente es recomberción de una empresa ya establecida, pero con poca ganancia en el aérea de la producción de compbustible o materias a fin para la posterior puesta en marcha.

6.1 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA RECONVERSIÓN

Diagrama de flujo de la propuesta metodológica En la Figura 5.1 para la propuesta metodológica. Como método de decisión se utilizará el método AHP, cuyo objetivo es escoger la mejor alternativa de reconversión para una central termoeléctrica en Chile. Las entradas deben incluir los datos de la central, como ubicación y acceso a puerto, las alternativas aplicables en Chile, los criterios relevantes para la reconversión y los datos correspondientes a cada criterio según la alternativa.

Figura 54. Diagrama de flujo de la propuesta metodológica para la reconversión de centrales termoeléctricas a carbón. (Elaboración propia).



Nota. La fotografía muestra el diagrama de flujo de la propuesta metodológica para la reconversión de centrales termoeléctricas a carbón. Elaboración propia, 2026.

. Un valor alto en este vector indica una mejor valoración de la alternativa de reconversión, ya que significa que dicha alternativa cumple de manera más adecuada con los criterios evaluados. Con el vector obtenido, se puede armar un ranking de alternativas,

ordenándolas de mejor a peor según su valoración. Aguado, J., et al., 2007. Feedstock recycling of polyethylene in a two-step thermo-catalytic reaction system. J. Anal. Appl. Pyrolysis 79 (1–2), 415–423.

Los plásticos de un solo uso son sometidos a un proceso de transformación, mediante el cual se generan productos líquidos y una corriente gaseosa. Esta corriente gaseosa puede ser separada y acondicionada para su aprovechamiento energético. La energía obtenida a partir de estos gases puede ser utilizada para alimentar parte de los requerimientos energéticos de la propia planta, permitiendo la realimentación del proceso. De esta manera, se busca integrar el aprovechamiento energético de los gases con el proceso de producción y acondicionamiento del petróleo sintético.

Tecnologías aplicables en Chile Considerando los objetivos del Plan de Descarbonización en Chile, como apoyo a la acción de uso de petróleo sintético, el desarrollo de nuevas tecnologías innovadoras para el país y los ejemplos actuales de tecnologías empleadas en la reconversión. Recordemos que la de la planta de pirolisis e Hidrolisis se generan estos combustibles que alimentaran la propia planta del petróleo sintético. se han identificado las siguientes alternativas tecnológicas viables en Chile:

- Alternativa 1: Biomasa
- Alternativa 2: Gas natural
- Alternativa 3: Baterías de Carnot
- Alternativa 4: Blending de hidrógeno (H₂)
- Alternativa 5: Co-combustión de amoníaco (NH₃)

Las alternativas de biomasa y gas natural se incluyen debido a que son tecnologías maduras, como se indicó anteriormente en la Tabla 2.2 del marco teórico, y poseen un alto nivel de reutilización de la infraestructura de la central a carbón. Los elementos que son reutilizados para estas tecnologías se muestran en la Tabla 2.3, en donde se observa que los principales componentes del ciclo termodinámico (caldera, turbina y generador) pueden ser reutilizados. Además, existen proyectos actuales de reconversión en Chile, como las centrales Andinas y Hornitos a biomasa y la central IEM a gas natural.

Respecto a la alternativa de baterías de Carnot, a pesar de no ser una tecnología madura como las mencionadas anteriormente, actualmente la central Angamos 1 y 2 está siendo reconvertida a esta tecnología.

La reconversión mediante blending con hidrógeno y la co-combustión con amoníaco son alternativas bastante nuevas, pero el gobierno tiene un alto interés en evaluar estas tecnologías. Existe un proyecto de reconversión de la central Guacolda a co-combustión de NH₃.

6.2 Criterios

Los criterios considerados en la propuesta de reconversión son los siguientes:

- Criterio 1: Disponibilidad del recurso en la región
- Criterio 2: Levelized Cost of Energy (LCOE)
- Criterio 3: Capacidad de reutilización de los activos
- Criterio 4: Capital Expenditure (CAPEX)
- Criterio 5: Costos de mantenimiento anual
- Criterio 6: Madurez de la tecnología
- Criterio 7: Vida útil.

Los criterios de disponibilidad del recurso, capacidad de reutilización de activos, madurez de la tecnología y vida útil están más relacionados con la parte técnica, mientras que los criterios de LCOE, CAPEX y costos de mantenimiento están relacionados con la parte económica.

Los 7 criterios establecidos poseen diferentes valorizaciones de importancia. El orden establecido de mayor a menor importancia se define a continuación:

Disponibilidad del recurso: La disponibilidad del recurso es fundamental porque determina si la nueva tecnología puede ser implementada de manera factible. Un recurso disponible en la región implica menores costos asociados al transporte, mientras que un recurso que no esté disponible localmente puede aumentar los costos de transporte y requerir un mayor almacenamiento para enfrentar las demoras del transporte, lo que puede hacer que la tecnología deje de ser una opción viable.

LCOE: El LCOE es el segundo criterio más importante, ya que es una medida la cual permite comparar diferentes tecnologías en términos de costos y eficiencia. Un valor más bajo de LCOE indica que una tecnología es más competitiva económicamente.

Reutilización de activos y CAPEX: En tercer lugar, de importancia se encuentran los criterios de reutilización de activos y CAPEX. A mayor cantidad de componentes de la central que pueden ser reutilizados, se reducen los costos de inversión asociados con la implementación de la nueva tecnología.

Costo de mantenimiento: En cuarto lugar, de importancia se encuentra el costo de mantenimiento, que es un gasto recurrente y afecta la rentabilidad a largo plazo de un proyecto. Una tecnología con bajos costos de mantenimiento será más atractiva porque reduce los gastos operativos.

Madurez tecnológica y vida útil: En quinto lugar, de importancia se encuentran los criterios de madurez tecnológica y vida útil. Estos criterios pueden considerarse menos relevantes en comparación con los anteriores, ya que la madurez tecnológica, desde una perspectiva más innovadora, no resta atractivo a las alternativas que han sido desarrolladas en menos tiempo o que están en etapas más experimentales que comerciales. Además, no existe una diferencia extrema en la vida útil entre las distintas tecnologías.

Datos Se construye la Tabla con la información para cada criterio según alternativa, esta tabla se utilizará para obtener las 7 matrices de comparación de alternativas según cada criterio.

Para el caso de blending de H₂ se estimó el CAPEX a partir del estudio técnico-económico para una central de 400 [MW] de ciclo combinado [Zhang, Z.; Gora-Marek, K.; Watson, J.S.; Tian, J.; Ryder, M.R.; Tarach, K.A.; López-Pérez, L.; Martínez-Triguero, J.; Melián-Cabrera, I. Recuperación de plásticos residuales utilizando reactores nanoescala selectivos en forma como catalizadores. *Nat. Sustain.* 2019, 2, 39–42.] con el cual se obtuvo un CAPEX aproximado de 1300 [USD/kW] junto con un costo de mantenimiento aproximado de un 2% en relación a la inversión. Respecto a la vida útil se estimó que sería mayor a la de una central a gas natural.

En el caso de la co-combustión con NH₃, se estimó el CAPEX combinando el costo de inversión para la reconversión de una central a carbón con captura de carbono, que es de 1319 [USD/kW] según el estudio de [Buekens, A. Introducción al reciclaje de materias primas de plásticos.

En reciclaje de materias primas y pirólisis de plásticos de desecho; Scheirs, J., Kaminsky, W., Eds.; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, Reino Unido, 2006; pp. 1–41.], y el costo de inversión en tecnología de amoniaco, que es de 766 [USD/kW] según [Aguado, J.; Serrano, director de fotografía; Escola, J.M. Combustibles a partir de plásticos residuales mediante procesos térmicos y catalíticos: una revisión. *Resolución Independiente de Ingeniería Química* 2008, 47, 7982–7992.]. Al considerar una co-combustión de 20% amoniaco y 80% carbón, el costo de inversión aproximado se estima en 1200 [USD/kW].

Además, se estimó un costo de mantenimiento alto del 5%, asociado al manejo de amoniaco, y la vida útil se considera igual o mayor que la de una central a carbón [Constantinescu, M.; Bucura, F.; Ionete, E.I.; Ion-Ebrasu, D.; Sandru, C.; Zaharioiu, A.; Marin, F.; Miricioiu, M.; Niculescu, V.; Oancea, S.; y demás. *Del plástico al combustible: nuevos retos. Importa. Plast.* 2019, 56, 721–729]. Ya definida la propuesta de integración, ahora hay que analizar dónde y cómo podría implementarse en Chile, considerando las tecnologías de reconversión existentes y la infraestructura disponible.

Caso de estudio Se escoge la central Guacolda para aplicar la propuesta metodológica porque, dentro del estudio realizado por el Centro de Energía, se efectuó una visita técnica a esta central, ubicada en Huasco, Atacama. Durante la visita, se proporcionó información sobre su plan de reconversión a co-combustión con amoníaco, el análisis realizado por la empresa, la participación de Mitsubishi en la reconversión y los planes a futuro para la ex-central diésel ubicada al lado de la central Guacolda.

En la Figura, se ilustra la ubicación de la central Guacolda, así como la ex-central diésel TG, que fue adquirida por Guacolda. También se puede ver el puerto adyacente a la central.

Figura 55. Ubicación e infraestructura de la central Guacolda.



Nota. La fotografía muestra la ubicación e infraestructura de la Central Guacolda. Tomado de *Guacolda, la mayor eléctrica a carbón de Chile, estudia usar amoníaco y alianzas con firmas de Corea del Sur y Japón* [Fotografía], por Valeria Ibarra, 2023, (<https://www.df.cl/empresas/energia/guacolda-la-mayor-electrica-a-carbon-de-chile-estudia-usar-amoniaco-y>)

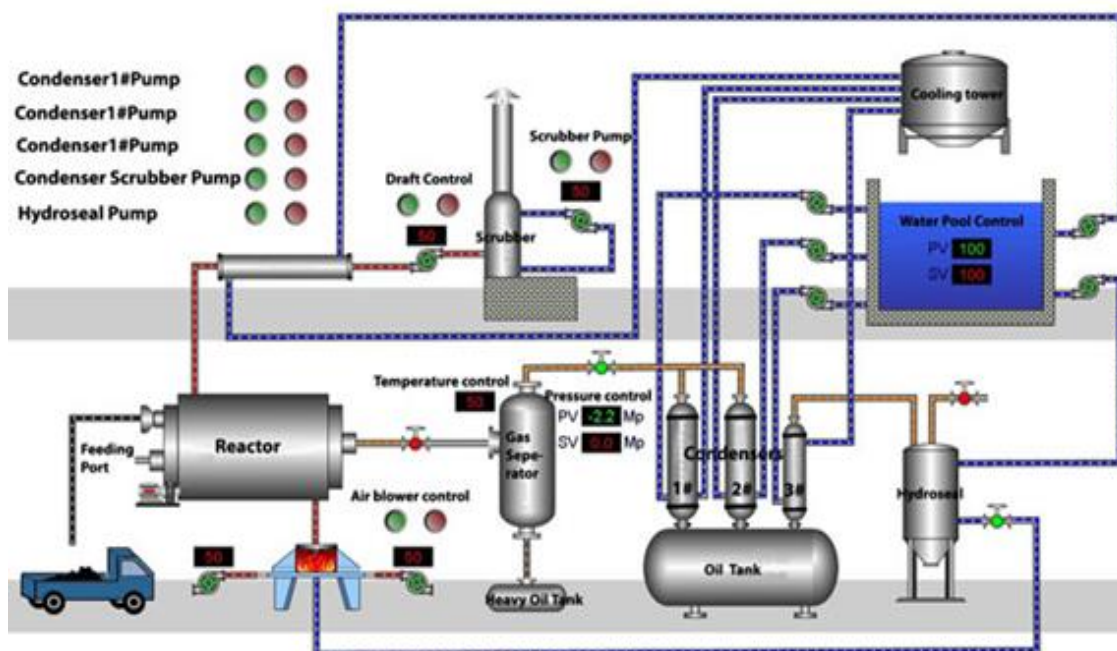
En la Figura 52 se muestra una unidad de generación de la central, la central genera como se puede cambiar una empresa a algo más ecológico como por ejemplo el tratamiento de los gases tóxicos que se envían a la atmosfera y reconvertir una zona de una nueva industria a partir de la zona y la infraestructura de una preexistente.

La economía de Huasco se sustenta en dos pilares industriales: la central termoeléctrica Guacolda y CMP. En el caso de la central Guacolda, esta representa una fuente significativa de empleo en la región. Se estima que alrededor de 600 personas trabajan como contratados y colaboradores dentro de sus instalaciones.

Este número no solo refleja la importancia de la central como generadora de energía, sino también su impacto en la dinámica laboral y socioeconómica de la comunidad huasquina. El desarrollo de la ciudad de Huasco se ve impulsado por la presencia de estas industrias, 59lo que ha generado un crecimiento significativo en el sector de servicios, especialmente en hostelería y restaurantes.

La demanda de servicios de alojamiento y alimentación ha aumentado para satisfacer las necesidades de los trabajadores y visitantes relacionados con la actividad industrial. Es por lo anterior que el cierre de la central impactaría directamente a la población de Huasco. Por ello, se consideran opciones de reconversión para mantener la central en operación. Además, la última unidad fue instalada en 2015, es decir, cuatro años antes de la implementación del plan de descarbonización.

Figura 56. Diagrama de flujo del plástico y combustible sintético. PET.



Nota. La fotografía muestra el proceso de pirólisis por lotes. Tomado de *Regulación del procedimiento de seguridad del proceso de pirólisis por lotes* [Fotografía], por Beston Recycling for better life, 2025, (<https://bestonpyrolysisplant.com/es/industry-news/safety-procedure-regulation-batch-pyrolysis-process/>)

6.3. Inversión Inicial Estimada

Aprovechar una instalación preexistente ahorra entre un **30% y un 45%** del costo de una planta construida desde cero (*Greenfield*). La inversión inicial requerirá capital principalmente para la compra de los reactores, la planta de lavado de plástico y la adecuación de tuberías.

A modo de referencia para una escala industrial mediana-alta: Tabla: 21

Tabla 20. Inversión estimada en equipos e infraestructura para una planta de procesamiento de plásticos mediante el método "Medio Hecho".

Componente / Equipo requerido	Inversión Estimada (USD)	Notas / Ventajas de estar "Medio Hecho"
Línea de Pretratamiento (Trituradoras, lavadoras, bandas)	\$150,000 – \$400,000	Obligatorio. Depende del volumen de toneladas diarias.
Reactores de Pirólisis Industrial (Capacidad ~20-30 toneladas/día)	\$500,000 – \$1,200,000	Reactores continuos con control de temperatura automatizado.
Sistemas de Condensación y Destilación	\$200,000 – \$500,000	Se reduce costo adaptando las torres de enfriamiento de la termoeléctrica.
Ingeniería, Tuberías y Adecuación de Calefacción	\$150,000 – \$300,000	Conexión del sistema térmico viejo con el nuevo.
Permisos, Licencias Ambientales y Certificación	\$80,000 – \$200,000	Varía según las normativas del país.
TOTAL ESTIMADO (Inversión CAPEX)	\$1,080,000 – \$2,600,000	<i>Para proyectos piloto o de menor escala (1 a 5 ton/día), existen reactores modulares desde \$150,000 a \$400,000.</i>

Nota. Tabla generada con ChatGPT. (OpenAI, 2026).

5.4 Factores Críticos de Éxito

1. **Rendimiento:** Por regla general de la pirólisis de poliolefinas, **1 tonelada de plástico limpio produce entre 650 y 750 litros de petróleo sintético**, junto con gas de combustión y carbón pirolítico (que puede venderse a la industria del caucho).
2. **Logística de suministro:** El éxito económico de la planta no dependerá de la tecnología, sino de asegurar un contrato de suministro constante (toneladas diarias masivas) de residuo plástico segregado.

Para ajustar mejor los números de la inversión,

Tabla 21. Generación de residuos sólidos municipales por región.

Tipo de Proceso	Escala Mediana (~15-20 Toneladas/Día)	Notas sobre la Infraestructura
Hidrólisis / Quimiólisis (Específica para PET / Poliésteres)	\$2,200,000 – \$4,500,000 USD	Requiere metalurgia especial (aceros inoxidables de alto grado) para resistir la corrosión química y presiones elevadas.
Planta de Pretratamiento Compleja	\$300,000 – \$600,000 USD	El plástico para quimiólisis debe estar extremadamente limpio (lavado profundo y remoción estricta de etiquetas y tapas de otros plásticos).

Nota. Tabla generada con ChatGPT. (OpenAI, 2026).

Tabla 22. Generación de Residuos sólidos municipales por región

Región	Generación Residuos Ton/año	Distribución regional
XV de Arica y Parinacota	114.489	1,76%
I de Tarapacá	189.806	2,91%
II de Antofagasta	196.289	3,01%
III de Atacama	103.433	1,59%
IV de Coquimbo	220.860	3,39%
V de Valparaíso	587.600	9,02%
Metropolitana de Santiago	2.807.247	43,10%
VI de O'Higgins	239.833	3,68%
VII del Maule	359.862	5,52%
VIII del Bío-Bío	645.875	9,92%
IX de La Araucanía	425.234	6,53%
XIV de Los Ríos	147.563	2,27%
X de Los Lagos	369.925	5,68%
XI Aysén	40.918	0,63%
XII Magallanes y Antártica	64.524	0,99%
TOTAL	6.513.458	100%

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

7. MARCO LEGAL

7.1. Comercialización del Diésel Sintético.

El diesel sintético es nuevo en Chile y, por consecuencia, no está definido como un tipo de combustible. La Superintendencia de Energía y Combustible (SEC), entidad fiscalizadora, carece de una legislación o normas específica para este producto, por lo que, se debe trabajar en conjunto con la CNE y los ministerios de Medio Ambiente, de Energía y de Transporte para generar una ley con respecto a la comercialización de diésel de segunda generación. Según el Decreto N° 16027 del año 2009 del Ministerio de Economía de Chile, artículo 5°:

“Estas tecnologías deberán estar técnicamente respaldadas en normas, códigos o especificaciones nacionales o extranjeras, así como prácticas recomendadas de ingeniería, internacionalmente reconocidas. Para ello el interesado deberá presentar el proyecto y una versión vigente de la norma, código o especificación extranjera.”

Esto se debe a que, al igual que el biodiesel, este combustible puede cumplir con las especificaciones del diésel fósil, sin embargo, su composición físico química no es la misma. En consecuencia, se requieren estudios en Bancos de ensayo de motores, emisiones y comportamiento en vehículos y la cadena de distribución (por si provoca alteraciones). Dado que no existen casos de producción masiva de dicho producto en el mundo, es necesario crear normas desde cero, por lo que este proceso demoraría entre 1 y 2 años. Hoy, sólo se produce diésel sintético a mediana escala, en los laboratorios de Fundación Natura, con resultados positivos.

Por el momento, se espera que el diésel sintético cumpla las especificaciones del diésel fósil, ya que ambos provienen del petróleo (el plástico y el caucho son productos hechos a partir del petróleo). El Decreto 13228 del año 1979 del Ministerio de Minería establece las normas que aseguran la calidad de los combustibles.

Por otro lado, el mercado chileno se abastece prácticamente de diésel ciudad. Existe un tipo de diésel A2 que es permitido para uso industrial en calderas y para generación eléctrica que tiene normas menos estrictas.

Sin embargo, éste casi no se vende ya que es más costoso para quienes refinan diésel hacer dos tipos diferentes de diésel, y las industrias, por cuestiones medioambientales, prefieren usar un diésel más limpio, como lo son el B y el A1. Es por esto que se pretende asimilar este diésel de segunda generación al diésel fósil y, así, penetrar más fácilmente en el mercado.

Para poder comenzar a comercializar cualquier tipo de combustible es necesario inscribir las instalaciones en la SEC. El Decreto 160 del Ministerio de Minería, declara en el artículo 10° lo siguiente:

“Las personas naturales o jurídicas que importen, refinen, produzcan, distribuyan, transporten, expendan o abastezcan toda clase de Combustible Líquido [...] deberán inscribirse en los registros de la Superintendencia previo al inicio de sus actividades.”

Finalmente, el mismo decreto, en el artículo 7°, (El Decreto 160 del Ministerio de Minería) manifiesta que son necesarios certificados de calidad para la comercialización de combustibles líquidos. La SEC es el organismo fiscalizador, quien es encargado de exigir el tipo de certificado y autoriza la subcontratación de laboratorios certificadores, bajo los dominios del Decreto Supremo N° 298, de 2005.

Las normas que debe cumplir el transporte, el almacenamiento y las operaciones del diésel sintético están detalladas en el Decreto N°160. Éste clasifica a los combustibles líquidos según su punto de inflamación, es decir, dado el peligro de incendio que presenten.

El diésel de segunda generación corresponde a combustible de Clase II, es decir, con un punto de inflamación entre 37,8 y 60°C, al igual que el diésel fósil y el kerosene. Las normas que tienen relación con la manipulación de combustibles líquidos, que afectan al proyecto se desglosan en la Tabla 17.

Tabla 23. Normativas Asociadas a la Manipulación de Combustibles.

Normativa	Contenido
D.S. N°160 de 2009 Ministerio de Economía	Aprueba el reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos.
D.S. N°132 de 1979 Ministerio de Minería	Establece normas técnicas, de calidad y de procedimiento de control aplicables al petróleo crudo, a los combustibles derivados de este y a cualquier otra clase de combustibles.
D.S. N°298 de 2005 Ministerio de Economía	Aprueba reglamento para la certificación de productos eléctricos y combustibles.
D.S. N°594 de 2000 Ministerio de Salud	Aprueba Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. Expone normas sobre la fabricación o manipulación de productos tóxicos, corrosivos, peligrosos, infecciosos, radioactivos, venenosos, explosivos o inflamables, sobre emisiones atmosféricas,

	residuos industriales líquidos, calidad de agua y manejo de residuos sólidos industriales.
--	--

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Tabla 24. Otras normas asociadas al proyecto.

Normativa	Contenido
D.F.L. N°725 de 1967 Ministerio de Salud	Código Sanitario. Rige todo lo relacionado con el fomento, protección y recuperación de la salud de los habitantes.
D.S. N°144 de 1961 Ministerio de Salud	Establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza.
D.S. 146 de 2002 Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República	Reformula y Actualiza Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana.
D.F.L. N°458 de 1976. Ministerio de la Vivienda y Urbanismo	Aprueba nueva Ley General de Urbanismo y Construcciones. Establece las disposiciones relativas a planificación urbana, urbanización y construcción.
D.S. N°4 de 1992 Ministerio de Salud	Establece norma de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales.
D.F.L N° 1122 de 1981 Ministerio de Justicia	Fija Texto del Código de Aguas.
D.S. N°146 de 1998 Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República	Establece norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas, elaborada a partir de la revisión de la norma de emisión contenida en el Decreto N° 286, de 1984, del Ministerio de Salud.

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

7.2. Evaluación de Impacto Ambiental

El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) es uno de los principales instrumentos de gestión para prevenir el deterioro ambiental que podrían causar nuevos proyectos de inversión pública y privada en Chile. Este instrumento busca prevenir los impactos que pueda generar estas iniciativas, o hacer que, cuando se generan impactos adversos significativos, exista una atenuación.

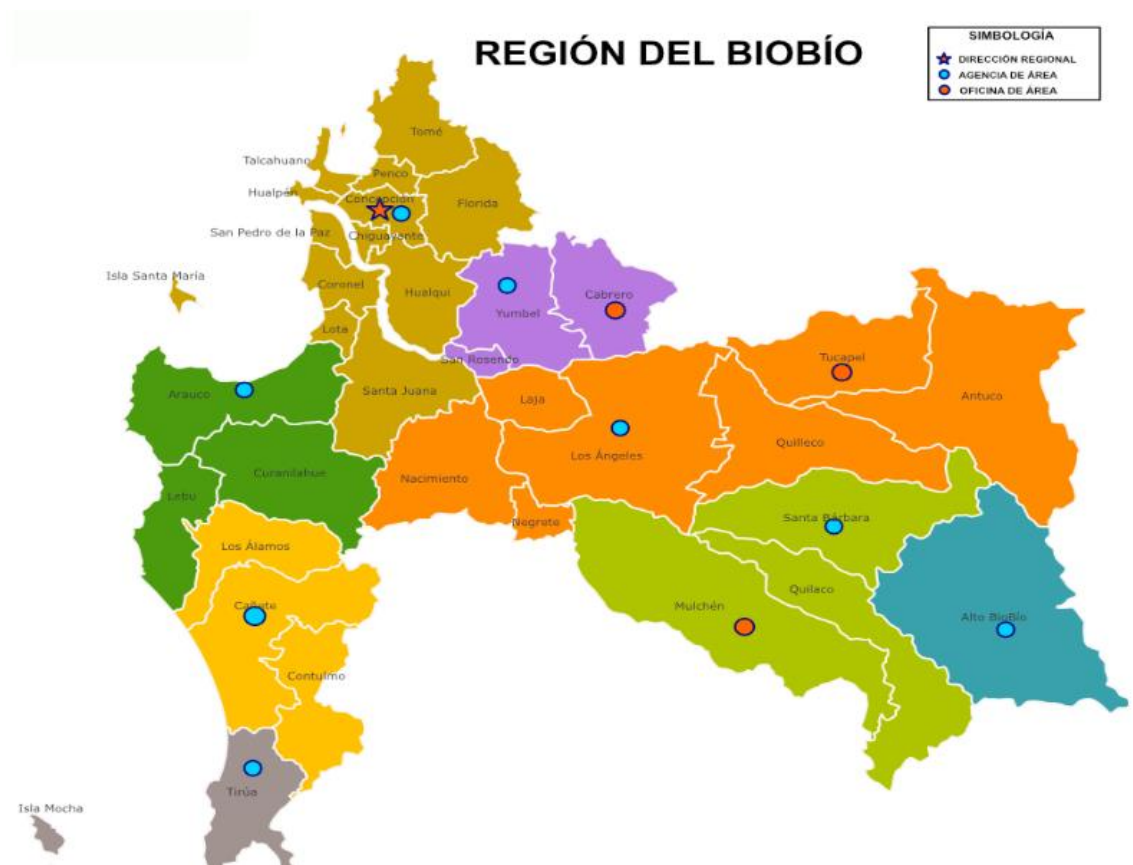
La ley 19.300 de 1994 del Ministerio Secretaría General de la República establece las Bases Generales Sobre el Medio Ambiente. Ésta indica que todo proyecto susceptible de causar algún tipo de impacto ambiental debe someterse al SEIA. De ser así, se deben presentar una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) antes de poder llevarse a cabo o modificarse. Estos instrumentos permiten acreditar que el proyecto se rige por de las normas que lo enmarcan; determina y se hace cargo de los efectos medioambientales que podría producir, es decir, analiza qué impactos tendrá y sus formas de compensación y/o mitigación.

Una DIA sólo requiere los antecedentes generales del proyecto, que acrediten también el cumplimiento de las normas medioambientales y los permisos que aplican. Sin embargo, según el artículo 11° de la ley 19.300, existen 6 tipos de proyectos que deben realizar un EIA, más complejo y completo. Éste exige, además de lo pedido en la DIA, que se describan detalladamente los efectos que tienen a nivel medioambiental y de salud de la población, siguiendo la normativa en cuestión. Estos documentos son luego revisados por la CONAMA quien es encargado de fiscalizar. Este proceso demora de 4 a 6 meses en el caso de un EIA, y 2 a 3 para una DIA.

La instalación de una planta de diésel sintético es un proyecto de “producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización habituales de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas, inflamables, corrosivas o reactivas, deben entrar al sistema” por lo que debe someterse al SEIA – según el artículo 10°, inciso ñ) –. Además, el proyecto conllevaría la realización de un EIA dado que presenta un “riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos”³².

Sin embargo, el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental³³, que detalla las regulaciones y normativas de la ley, señala en el artículo 3°, inciso ñ.4), que los proyectos que manipulen sustancias inflamables en cantidad igual o superior a 80 toneladas al día deben someterse a un EIA. Este proyecto tiene como tope de producción 16 toneladas diarias, por lo que no es necesario.

Figura 57 Viabilidad por sectores de empresas derivadas del combustible sintético. PET.



Nota. La fotografía muestra la viabilidad por sectores de empresas derivadas del combustible sintético. Tomado de *Experiencias Significativas En La Gestión De La Convivencia Escolar En Contexto De Pandemia Covid-19* [Fotografía], por Beston

Recycling for better life, 2025, (https://culturaeducativa.mineduc.gob.cl/wp-content/uploads/2021/10/libro-experiencias-convivencia-escolar-en-tiempos-de-pandemia-2021-BIO-BIO_compressed-1-4.pdf)

EL PRMS define los Límites de Extensión Urbana, Zonificación Metropolitana, Uso del Suelo, Equipamientos de carácter Metropolitano e Intercomunal, Zonas Exclusivas de Usos Molestos, Áreas de Restricción, Áreas de Resguardo de la Infraestructura Metropolitana, Intensidad de Ocupación del Suelo, como asimismo actividades que provocan impacto en el sistema metropolitano y exigencias de urbanización y edificación cuando sea pertinente.

Un aspecto fundamental del PRMS es limitar la expansión geográfica de la ciudad como también busca incrementar la oferta de áreas verdes y servicios urbanos en las distintas comunas y definir normas de localización industrial.

En este caso, la localización de la planta debe hacerse en zonas fuera de los límites urbanos y donde no haya restricciones del PRMS, es decir en la zona sur poniente de la

Región Metropolitana, en las comunas de Melipilla, Peñaflor, Curacaví, Talagante, entre otras.

Para definir la localización de la planta de diesel sintético de manera precisa se aplicará el Método de Evaluación Multicriterio. Este método consiste en el establecimiento de diversas variables territoriales para la localización de la actividad en cuestión, las cuales definen restricciones que corresponden a las prohibiciones territoriales establecidas por la normativa, y factores que corresponden a las condiciones de localización que exige la actividad para maximizar su rentabilidad. Dicho método se lleva a cabo a través del uso de software de Sistemas de Información Geográfica.

7.3. Análisis de mercado

7.3.1. Consumo de combustible

El diésel es la primera fuente de energía tanto en Chile como en el mundo. Su consumo total en Chile alcanzó los 9,1 millones de metros cúbicos en el año 2009, y según proyecciones, se espera que este número crezca un 6,5% cada año hasta el 2030, triplicando el uso de este combustible.

La CNE realiza anualmente un informe estadístico del consumo de combustibles en el país, dividiendo por tipo de energético, tipo de industria y por región. El último informe data del año 2008, base con la cual se trabajará.

7.3.2. Consumo por sector

El diésel es utilizado como combustible en diversas aplicaciones energéticas. Éste puede ser empleado tanto en motores de encendido automático, es decir, para movilización y transporte, como en industrias para el manejo de calderas y generación eléctrica. Las ventas de combustible se dividen según 5 sectores industriales: Transporte; Industrial y Minero; Comercial, Público y Residencial; y, Centros de Transformación. Para el caso del petróleo diésel, la tabla siguiente demuestra el nivel de consumo del 2004 al 2008 y los porcentajes asociados para cada sector.

Tabla 25. Consumo de Diesel por Sector en miles de m³ (años 2004 a 2008)

AÑO	SECTOR				TOTAL
	Transporte	Industrial y Minero	Comercial, Público y Residencial	Centros de Transformación	
2004	3.462 64,04%	1.687 31,21%	151 2,80%	105 1,94%	5.405
2005	3911 65,87%	1635 27,54%	119 2,01%	272 4,58%	5937
2006	3.861 62,73%	2.033 33,03%	115 1,86%	146 2,37%	6.155
2007	4.107 43,72%	2.375 25,28%	126 1,34%	2.786 29,66%	9.394
2008	4.272 43,56%	2.442 24,91%	198 2,02%	2.894 29,51%	9.806

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

En el año 2007, fue inaugurada la central termoeléctrica San Isidro II, en la V Región, propiedad de Endesa. Ésta contribuyó considerablemente al aumento en el consumo de petróleo diésel en el país. En teoría, esta central debería cambiar su fuente energética por gas natural licuado, sin embargo, hasta el momento, ésta sigue operando a partir de diésel.

Hasta antes de la entrada en funcionamiento de la central termoeléctrica, el sector transporte consumía más del 63% del diésel en Chile, actualmente, su participación relativa cayó a un 44%. Sin embargo, el consumo real, sigue en constante aumento para todos los sectores involucrados. El cambio se hizo presente en el sector de centros de transformación. En el año 2009, hubo una leve caída en las ventas de diésel dada la crisis económica, pasando de 9,8 a 9,1 millones de m³. Este año ha ido en ligero aumento y se espera que retome el curso normal al alza, sin tomar en cuenta las posibles variaciones dado su uso en la central termoeléctrica.

Usando otros niveles de desagregación, los subsectores que más consumen este combustible alternativo son las empresas transportistas por tierra, que representan casi el 15% de la demanda total, es decir, 1,4 millones de m³, y donde se proyecta que el 57% del consumo energético promedio equivale a diésel; y las ventas a industrias, comercio y particulares que ocupan más del 60% de las ventas de éste en el país, equivalentes a cerca de 6 millones de m³. El consumo residencial, marítimo y aéreo es despreciable, y las ventas minoristas – estaciones de servicio y público general – representan alrededor del 19%.

7.3.3. Consumo por región

Otra forma de desagregación del consumo de combustible se realiza a nivel geográfico. La región de Antofagasta es la que tiene un mayor consumo de diésel, debido a la actividad minera presente. El sector del cobre ocupa más del 43% del petróleo diésel de todo el sector minero e industrial.

Le sigue la Región Metropolitana con casi un 20%, dado que es donde se concentran la mayor parte de la actividad del país, y donde está el mayor número de vehículo, además de albergar un gran número de industrias. La V Región tiene un nivel de consumo no despreciable, sin embargo, el resto de las regiones tiene consumos bajos a nivel país.

La Tabla a continuación detalla la distribución porcentual regional del consumo de diésel fósil en el país.

Tabla 26. Distribución Regional del Consumo de Diésel.

Región	Consumo relativo
XV de Arica y Parinacota	1,12%
I de Tarapacá	4,23%
II de Antofagasta	24,76%
III de Atacama	3,83%
IV de Coquimbo	3,35%
V de Valparaíso	16,82%
VI de O'Higgins	4,84%
VII del Maule	3,08%
VIII del Bío-Bío	8,29%
IX de La Araucanía	2,56%
XIV de Los Ríos	1,16%
X de Los Lagos	4,41%
XI Aysén	0,84%
XII Magallanes y Antártica	1,01%
Metropolitana de Santiago	19,69%
TOTAL	100%

Nota. Desde Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

7.3.4. Mercado potencial

Este diésel de segunda generación es equivalente al diésel fósil en cuanto a su uso y función por lo que es posible entrar en todos los sectores industriales que utilizan este combustible. Sin embargo, existen sectores más atractivos y accesibles en cuanto a distancia geográfica, tipos de clientes y niveles de consumo.

Dado que la empresa se localiza en la Región Metropolitana, se buscará trabajar dentro de la misma dado que se ven aumentados los costos de logística y transporte al alejarse de la planta. Este último alcanza los 2,85 USD por kilómetro³⁴, por lo que abarcar un radio demasiado importante incrementaría los costos notablemente. Es por esto que, dentro de los mercados potenciales, se descarta el sector de la minería. Eventualmente, se podría pensar en trabajar con clientes de la V Región.

Se descartan también las ventas a canal minorista ya que implica la inversión en estaciones de servicio, de muy alto costo para la empresa. Además, se pretende externalizar este servicio y no perder especialización de mercado. Los centros de transformación no forman parte de los posibles clientes a atacar ya que tienen un nivel de consumo poco relevante lo que no asegura los niveles de venta a alcanzar, aun cuando si son potenciales clientes.

Dentro de los mercados potenciales más importantes para la empresa se encuentran el transporte terrestre e industrias y comercio, que abarcan el 75% del consumo de diésel en el país. Estos clientes se alinean con las características del producto y su tiene alto potencial en cuanto a sus niveles de crecimiento de consumo.

Ambos sectores tienen las mayores tasas de crecimiento – de 7,2% y 5,5% anual – , llegando a multiplicar su consumo en 20 años más. Sumado a esto, se espera que la cantidad de vehículos comerciales operados con motores diésel supere ampliamente a los de gasolina, y haya la misma cantidad de automóviles a gasolina y diesel³⁵.

7.3.5. Mercado objetivo

Este negocio apunta a contribuir a la mejora del medioambiente, no sólo gracias a la eliminación de parte de los desechos sólidos generados en el país, sino que gracias a la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidos por el uso de petróleo diésel. Esto se debe a que este nuevo combustible es más limpio, y emite menos contaminantes a la atmósfera si se usa en un 100%.

Es por esto que se pretende vender directamente a usuarios finales, dado que la venta a empresas distribuidoras entorpecería el objetivo de la empresa. Este producto sería utilizado para refinar diésel fósil de menor calidad, mezclándose con este último, y así disminuir los índices de azufre o de cetano, por ejemplo. De este modo, el diésel final

destinado a la venta sería de la misma calidad que el fósil, yendo en contra de uno de los objetivos del proyecto que es entregar un combustible amigable con el medio ambiente.

Dentro de las industrias potenciales para la venta de diésel sintético, se decidió trabajar en sectores donde se encuentre el mayor consumo y que cumplan con los objetivos antes descritos. El mercado objetivo es, entonces, empresas transportistas vía terrestre e industrias, comercio y particulares.

La venta de diésel sintético se realizará dentro de la Región Metropolitana dada la localización de la empresa. El mercado en esta región es el más importante luego de la región de Antofagasta, reconocida por su actividad minera. Así, es más fácil acceder a los clientes y se abaratan costos puesto que el esfuerzo de logística y el costo del transporte se incrementan a medida que se aleja de la planta. Además, contar con un mercado más grande permite penetrar más fácilmente con un producto nuevo.

La oferta de diésel sintético se ve limitada por la capacidad de la maquinaria y las instalaciones, y es de 7.900 m³ al año. La planta abarcaría el 1,43% del consumo del mercado objetivo en la Región Metropolitana.

Se calcularon los niveles de consumo de combustible diésel de los diferentes tipos de vehículos gracias al gasto y nivel de actividad promedios³⁶. Gracias a estos datos y los niveles de producción de la empresa fue posible obtener la cantidad de cada vehículo a abastecer en el año. La empresa abastecería 208 buses del Transantiago, o 636 camiones de la Región. La Tabla 21 muestra los detalles de dichos cálculos.

Tabla 27. Numero de vehículos a abastecer.

Tipo de vehículo	Consumo m³/año	Cantidad a abarcar
Livianos	1,143	6.909
Comerciales	2,457	3.214
Buses Interurbanos	15,935	496
Camiones	12,421	636
Buses Transantiago	37,912	208
Otros	1,594	4.954

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Dada la localización, se abarcaría menos del 1% de la demanda del sector de industrias y comercio, y poco más del 1,5% del sector transporte. La flota total del Transantiago es de 6.400 buses, por lo que sería necesario llegar a abarcar el 3,25% de estos, o el 1,66% de los más de 38.000 camiones de la Región Metropolitana. Estos números parecen totalmente accesibles dentro de un horizonte cortoplacista.

7.3.6. Análisis financiero

Para la realización del análisis financiero, se asume que el producto ya cumple con todos los requisitos para ser vendido en Chile, es decir que ya se realizaron los estudios necesarios para la creación de normativas y, por lo tanto, que se cumple con tales especificaciones.

7.3.7. Inversión

7.3.7.1. Inmobiliario

Las instalaciones de la empresa deben contar con un inmueble para oficinas y un galpón para el almacenamiento de materia prima. Ambos fueron costeados gracias a la Resolución Exenta N° 925437 del 2009, de la Ley General de Urbanismo y Construcciones del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, que “fija valores unitarios de construcción para aplicar en cálculos de derechos de permisos municipales”, gracias a las Tablas de costos unitarios por metro cuadrado de construcción del 4° trimestre 2010 (Ver Anexo D).

Se construirán 200 m² para oficinas que serán de tipo de edificación A o C, categoría 3, que tiene un costo por metro cuadrado de \$138.962. La categoría se estima gracias a una guía técnica, y la edificación corresponde al tipo de construcción. En este caso se decidió en función de la calidad y del precio. Edificaciones del tipo D hacia abajo son de menor calidad, y la B es significativamente más costosa.

Los galpones deben almacenar al menos un mes de inventario, es decir, 500 toneladas de plásticos. Dados el volumen y peso promedios de un neumático – 0,21 m³ y 40 kg., respectivamente – se necesitan unos 2.625 m³. Para dar espacio de holgura, se asume que las 500 toneladas de plástico ocupan el mismo volumen, por lo se construirán dos galpones de 1000 m² y 3,5 metros de altura cada uno. Estos se harán con estructuras de hormigón en paredes y de acero en techumbre – Tipo de estructura BA, Categoría b –, con un costo de \$56.534 por metro cuadrado.

7.3.7.2. Terreno

Las instalaciones de la empresa deben contar con la planta de producción, un galpón para bodega y un inmueble para oficinas. Ambas líneas de producción deberían ocupar 1.500 m², sumándole a eso el galpón y las oficinas, se necesitan unos 3.700 m² aproximadamente. Además, es necesario contar con espacio extra suficiente, por si se desea instalar otra línea de producción a futuro. Así, es necesario un terreno de al menos 7.200 m².

Dentro de las localizaciones posibles para el proyecto, fueron cotizados terrenos en las comunas de Melipilla, Lampa y Talagante. Con un promedio aproximado de 35.000.000 millones de pesos para terrenos de esta envergadura, que se traducen en unos 73.000 USD.

7.3.7.3. Maquinaria

La maquinaria fue cotizada en la empresa Wuxi Kingship Enterprises para el procesamiento de 20 toneladas de desechos plásticos y 20 toneladas de neumáticos, es decir, cuatro líneas de producción. Ésta contempla:

- Trituradora de plásticos
- Trituradora de neumáticos
- Reactores de pirólisis
- Cámaras de remoción de polvo
- Sistemas de purificación
- Sistemas de quema de gas de residuo
- Sistema de procesamiento de negro de humo
- Tanques de Almacenamiento de Combustible (50 y 100 m³)

El costo total de las máquinas necesarias para el procesamiento de 40 toneladas de materia prima asciende a 1.110.800 USD, precio a marzo 2010.

Para hacer el escalamiento a una maquinaria que procesa 20 toneladas de insumos por lote se utiliza el método de Williams (Ver Anexo A).

$$Ca = Cb \times \frac{(Pa)}{(Pb)}$$

Donde:

= Costos de los equipos a instalar en Chile.

= Costos de los equipos costeados anteriormente.

= Capacidad de la maquinaria en Chile.

= Capacidad de la maquinaria costeadada anteriormente.

= Exponente de Williams, generalmente igual a 0,6.

$$Ca = 1.110.800 \frac{(20)^{0,6}}{(40)}$$

$$Ca = 732.855 \text{ USD}$$

7.3.7.4. Planta

Para el cálculo de los costos de la instalación de la planta, se utilizó el método de Miller, detallado en el Anexo A. Los diferentes gastos a incurrir para la instalación de la planta serán los siguientes:

7.3.7.5. Estimación de Costos Directos

1. Costos de los Equipos Principales = 732.855 USD.
2. Costos del ítem misceláneo = 109.928 USD.
3. Costo Maquinaria Total = 842.783 USD.
4. Costos de Edificación = 800.644 USD, que se desglosan en:
 - a. Levantamiento = 92.706 USD.
 - b. Fundaciones y Soportes = 25.283 USD.
 - c. Piping = 168.557 USD.
 - d. Tendido Eléctrico = 42.139 USD.
 - e. Instrumentación = 58.995 USD.
 - f. Misceláneos = 33.711 USD.
 - g. Edificaciones = 249.974 USD.
 - h. Servicios en Edificaciones = 84.278 USD.
5. Total de Costos de Equipos y Edificación = 1.643.427 USD
6. Costos de Almacenamiento y Utilidades = 1.068.227 USD.
 - a. Almacenamiento = 657.371,66 USD.
 - b. Utilidades = 410.857 USD.
7. Costos de Equipos, Edificación y Almacenamiento = 2.711.654 USD.
8. Costos de Servicios = 352.515 USD.

Total, Costo Directos = 3.064.169 USD.

7.3.7.6. Estimación de costos indirectos

Como costos indirectos se consideran los costos asociados a la Ingeniería del Proceso y a la Construcción. Estos corresponden a 20% y 10%, respectivamente, del Total de los Costos Directos. Sin embargo, el diseño de la planta ya fue realizado por el Ingeniero Químico Adolfo Brinkmann para el proyecto en Ecuador, por lo que no aplica como parte de la inversión necesaria para la planta en Chile. Los costos indirectos en este caso sólo corresponden a los de construcción, estos ascienden a:

Total, Costo indirectos = 306.147 USD.

7.3.7.7. Contingencia

Para mejorar la precisión de la estimación, es importante considerar un margen de contingencia equivalente a un 10% del Total de los Costos.

Total, Costo indirectos = 3. 370.586 USD.

7.3.7.8. Publicidad y Promoción

Antes de la puesta en marcha de la planta, existen una serie de requisitos, como, por ejemplo, establecer normativas para el diesel de segunda generación, que demoran el proceso. Durante ese tiempo, que se prevé de 2 años, se pretende establecer un plan de marketing previo al comienzo de las ventas. Éste durará un año y consta de las siguientes fases:

- Apariciones en revistas o páginas web especializadas en el rubro como Revista Transporte Terrestre, Revista del Transporte, Revista Kaufmann Transporte, entre otras, o directoriotransporte.cl, para entrar en el mercado objetivo.
- Esto tiene un costo aproximado de 800.000 a 1,2 millones de pesos por publicación³⁸. Asumiendo una publicación por mes en 2 revistas, el costo total es de 24 millones de pesos, es decir, cerca de 50.000 USD.
- Mailing a empresas del mercado objetivo, donde se pretende publicitar el producto, dando a conocer sus ventajas y proponiendo charlas y vistas informativas a las mismas. El mailing tiene un costo de 5 UF para 4.000 mails enviados³⁹.
- Visitas a empresas, donde se contratará a un ingeniero en mecánica automotriz para realizar las charlas informativas, con un sueldo mensual de 800 USD. Se pretende que se realicen al menos unas 5 charlas mensuales.
- Prueba en un camión propio, donde se importe el diesel sintético de la planta que entrará en funcionamiento en Ecuador, para asegurar a los clientes la calidad del producto, haciendo revisiones periódicas del motor. Para tal fin, se destinarán 40.000 USD a la compra de un camión usado. Dados los niveles de actividad de un camión promedio, es decir, 12.500 litros al año, se destinarán 4.000 USD. El costo de fabricación de un metro cubico en Ecuador es de 170 USD, más costos de flete e importación, se calcula en no más de 320 USD/m³.

El total de la inversión en marketing supera los 210.000 dólares. En la Tabla 22 se desglosan los costos totales asociados a la promoción y publicidad del producto.

Tabla 28. Costos de Marketing

Ítem	Monto en USD
Revistas	49.996,88
Mailing	107.105,30
Visitas	9.600,00
Prueba Camión	44.000,00
TOTAL	210.702,18

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Gracias a esto, se puede lograr dar a conocer el producto antes de su lanzamiento al mercado y, así, dar seguridad a los clientes con respecto al uso del diesel sintético y aumentar la penetración de mercado.

7.3.7.9. Inversión total

La inversión total llega casi a los 4,3 millones de dólares, y se desglosa en la compra del terreno y los equipos principales de operación, además de la instalación de la planta y la construcción de oficinas y galpones. Estos montos se detallan en la Tabla que se muestra a continuación.

Tabla 29. Desgloce de la Inversión.

Ítem	Monto en USD
Terreno	73.000
Galpón + Oficina	293.440,83
Maquinaria	842.782,89
Edificación	800.643,75
Almacenamiento	1.068.227,32
Servicios	352.515,01
Costos Indirectos	306.416,90
Contingencia	337.058,59
Promoción y Publicidad	210.702,18
TOTAL	4.284.787,46

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

7.3.7.10. Costos. Costos Fijos y Variables

a) Costos Fijos

Los costos fijos de la empresa hacen alusión a los sueldos que debe pagar la empresa. Estos se dividen entre mano de obra directa e indirecta. Por otro lado, también se consideran como costo fijo otros gastos de administración y venta, como pagos de cuentas de teléfono, internet, seguros, artículos de oficina, publicidad y promoción, y otros misceláneos. El total de este ítem se calcula como el 12% de los costos fijos totales⁴⁰. Además, es necesario hacer una mantención preventiva a la maquinaria al año, que tiene un costo de 40.000 USD.

En la planta son necesarios tres operarios por cada turno de trabajo de 8 horas cada uno, donde se pretende que la planta funcione 24 horas al día, los 7 días de la semana. Es por eso que son necesarios 4 turnos diferentes, donde se roten los días libres, llegando a un total de 12 operarios. Además, es necesario tener un jefe de planta por turno que conozca bien el proceso de producción, la maquinaria y supervise a los operarios.

En el área administrativa, se destinaron cuatro cargos diferentes: Gerente General, Gerente Comercial, Contador y una persona de servicio. Los sueldos de cada uno y los detalles de todos los costos fijos se detallan en la Tabla 27.

Tabla 30. Costos Fijos Mensuales

Ítem	Cantidad	Monto Unitario USD	TOTAL Mensual (USD)
Operarios Máquinas (3 por turno)	12	600	7.200
Jefe Planta	4	1.200	4.800
Gerente General	1	3.000	3.000
Gerente Comercial	1	2.400	2.400
Contador	1	1.600	1.600
Personal de Servicio	1	400	400
GAV	1	2.728	2.728
Mantenimiento Preventivo Maquinaria	1	40.000	3.333
TOTAL			25.461

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

b) Costos Variables

Los costos variables hacen alusión al proceso productivo, y se dividen entre las dos líneas de producción diferentes, a partir de desechos plásticos. Estos se desglosan en 5 puntos diferentes:

Materia prima:

- Plásticos: Como se expuso en el punto 5.2.3, éste tiene un costo que se encuentra entre los 200 y los 300 USD por tonelada. Se asumirá un precio promedio de 250, y, luego, se analizará la sensibilidad del proyecto con respecto de este costo.
- Energía eléctrica: Una vez arrancado el proceso, la planta necesita tan sólo de energía eléctrica para funcionar, ya que se autoalimenta gracias a los mismos subproductos. La planta ocupa 75 kW de potencia en un lote de producción, es decir, 975 kWh. El costo es de 0,12 USD/kWh⁴¹.

- Aditivos y catalizadores: Este monto alcanza unos 400 USD por batch, sin embargo, por confidencialidad del proceso, no se pueden entregar más especificaciones.
- Agua: El proceso necesita agua principalmente para la etapa de condensación, y se ocupan unos 30 m³ por cada lote de producción. Se utilizaron tarifas para el posible sector de localización de Aguas Andinas SA. Los detalles de los costos del agua se encuentran en el Anexo E.
- Diesel: Es necesario medio galón de diesel para arrancar la maquinaria. Se utilizará el mismo diesel que se produce, por lo que se restará a la cantidad final destinada a la venta.

Las dos tablas a continuación detallan los costos fijos mensuales para ambas líneas de producción.

Tabla 31. Costos variables mensuales para línea de plásticos.

Ítem	Cantidad	Monto unitario USD	TOTAL USD
Plásticos (ton)	514,3	250	128.575
Energía Eléctrica (kwh)	50144,25	0,12	5.786,08
Diesel (galón)	25,715		Abastecimiento propio
Agua	1542,9	1,31	2.014,91
Aditivos y Catalizadores	--	400	20.572
TOTAL			156.947,99
Costo por m³			359,10

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Además, existen otros costos variables. Uno de ellos se asocia a los certificados de calidad requeridos, donde se asegura que el combustible cumple con las normas exigidas. Dado que no existe normativa aun para el diesel sintético, se tomará el costo para un certificado para diesel fósil ya que se asume que se pedirán los mismos ítems. El desglose de los costos se encuentra en el Anexo F.

Estos certificados se piden para el diesel comercializable, es decir, el estanque final, que debe estar sellado. Se necesitan un total de 8 certificados al mes, 4 para cada línea de producción, dado que se pretenden hacer despachos semanales. Esto se debe a la forma en que se dispone de la materia prima.

Otro costo a considerar tiene relación con el transporte de diesel al cliente. Se pretende hacer outsourcing de este servicio dados los niveles de especificación necesarios, los costos de inversión, el trabajo logístico, entre otros. Éste se obtuvo gracias a datos entregados por COPEC, y se hace a través de camiones tanque de 33 m³ de capacidad, por lo que se necesitan 20 viajes en un mes.

Se cobra un precio fijo desde la planta en Maipú hacia otra comuna involucrada por metro cúbico transportado. Se obtuvieron diferentes costos para distintas comunas de la Región Metropolitana.

Se optó por usar el de mayor distancia abarcada ya que aún no se conoce la ubicación exacta de los potenciales clientes, y se espera vender dentro de toda la Región Metropolitana. Se utilizará, entonces, el caso conservador, donde el costo del flete es de 2.862 pesos por metro cúbico, es decir, 5,96 USD/m³ entre Maipú y San José de Maipo. Por temas de confidencialidad, no se detallarán los otros datos a los cuales se tuvo acceso.

Tomando en cuenta el total de los costos fijos y variables, el costo promedio por unidad de producción de diesel sintético alcanza los 330,95 dólares por metro cúbico, costo que permite hacer este combustible absolutamente competitivo con el derivado del petróleo. La tabla a continuación detalla lo anterior.

Tabla 32. Costos Mensuales Totales y Unitarios.

Ítem	Cantidad	Monto unitario USD	TOTAL (USD)
Costos Línea de Plásticos	1	156.947,99	156.947,99
Certificación Calidad	8	386,64	3.093,14
Transporte Diesel	658,109	5,96	3.923,73
Costos Variables Totales		192.337,85	
Costos Totales (CF+CV)		217.799,18	
Costo unitario promedio por m³		330,95	

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

7.3.8. Ingresos

7.3.8.1. Precio del Diésel Sintético

Aunque en Chile no existen normas ni leyes que limiten los precios, se utiliza el PPI, que considera los valores del mercado internacional según la mejor alternativa de

suministro, usando como referencia el valor de los diferentes combustibles en el mercado de la costa de Estados Unidos en el Golfo de México. La Empresa Nacional del Petróleo informa cada semana las fluctuaciones en los precios de los diferentes derivados del petróleo.

Finalmente, los distribuidores determinan libremente, a partir del precio al cual compraron a la ENAP y de su margen de comercialización, los precios finales a consumidores.

Hoy en día, en este caso, dados los costos que se tienen, se puede alcanzar un precio competitivo a nivel de mercado. A modo de comparación, como precio del diesel en el horizonte de evaluación, se tomará un promedio histórico de los últimos años ya que éste presenta una reversión a la media de mediano plazo, aun cuando sus fluctuaciones son constantes.

Tomando los valores semanales del PPI para los últimos 5 años⁴², y sumando el costo de transporte hasta los distribuidores y el impuesto específico⁴³, se obtuvieron los siguientes resultados, detallados en la Tabla 31.

Tabla 33. Precio a Distribuidor Mayorista (en USD/m³)

PPI en USD	5 años
Promedio	734,14
Precio Mínimo	458,56
Precio Máximo	1.245,97

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Cabe destacar que este precio aún no es el precio final de competencia, ya que no toma en cuenta el margen de la ENAP ni de los mismos distribuidores que es variable y desconocido, y el precio de transporte del producto final. Por lo tanto, para el estudio del flujo de caja, se utilizará un precio de venta que representa casi del 90% del precio promedio a distribuidor mayorista para todo el horizonte de evaluación, dado la característica del PPI de reversión a la media. Éste alcanza los 660 USD/m³. Se decidió usar un precio inferior para poder penetrar en el mercado compitiendo en precio, tomando en cuenta que se trata de un producto nuevo en el mundo.

Las posibles variaciones en el precio de venta y sus repercusiones para el negocio se evaluarán en el punto final de este capítulo: Análisis de Sensibilidad. Tomando como referencia los datos expuestos en la tabla anterior.

7.3.8.2. Negro de humo

Se utilizará como precio alternativo del Negro de Humo el costo de importación del mismo. Éste alcanza los 1.100 USD por tonelada. Para efectos del estudio, se tomará un precio menor, dado que no es el producto principal de la empresa y, además, éste no es muy refinado. Además, para penetrar en el mercado, se espera partir de un precio más bajo. Éste será fijado en 825 USD la tonelada, lo que significa una reducción del 25%.

7.3.8.3. Scrubbers o lavadores de gases.

a. Cantidad

La producción de diesel sintético se ve ligeramente disminuida al descontarse el diesel utilizado por la misma maquinaria para su arranque. Esta etapa del proceso utiliza unos 195 litros mensuales. La oferta final alcanza, entonces, los 658,110 m³. mensuales, llegando casi a los 7.900 m³ anuales. Como se mencionó anteriormente, este nivel de producción es bajo en comparación a la demanda del combustible del mercado objetivo y no satisface más del 1,44% del total de la demanda de éste en la Región Metropolitana.

La introducción al mercado será progresiva durante el primer año, puesto que se necesita un periodo de adaptación y aprendizaje con respecto a la maquinaria.

Además, se debe asumir una etapa de inserción al mercado que no puede ser inmediata. Se utilizaron los siguientes porcentajes de utilización de la planta:

Tabla 34. Penetración de Mercado

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Penetración	20%	20%	30%	30%	40%	40%	50%	50%	60%	70%
Oferta (m ³)	1.579	1.579	2.369	2.369	3.159	3.159	3.949	3.949	4.738	5.528

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Se pueden asegurar las ventas dados los bajos niveles de oferta de la empresa y el porcentaje de mercado a abarcar. Esto significa, por ejemplo, que una sola empresa del Transantiago (de 200 buses) debería cambiar el combustible de toda su flota en un año, lo que parece alcanzable. Sin embargo, de todas formas, se pretende vender no sólo a empresas del Transantiago, sino a industrias, y otras empresas transportistas. Es por esto que parece accesible especular que, empezando el segundo año, se alcance el 100% de penetración.

Además, se puede asumir que la legislación será favorable para este diesel sintético, por lo que ciertas empresas se verán motivadas a su uso, llamadas por las externalidades positivas que aportaría en cuanto al medioambiente y el bajo precio de este combustible.

Finalmente, se tomó en cuenta también la inserción de mercado de la empresa Polambiente, dedicada al reciclaje de plásticos y otros desechos. Esta empresa es la única en Chile, por lo que se asemeja en cuanto a aprendizaje de maquinaria y penetración en un mercado nuevo. Polambiente llegó al 100% de funcionamiento en menos de un año, aumentando mensualmente su capacidad de producción en un 10%.

Se eligió pensar en una penetración más bien lenta en un principio, que al final del primer año fuera más acelerada dada la capacidad de copia y adaptación del mercado y el mayor conocimiento y confianza de las ventajas del diesel de segunda generación.

Sumado a todo lo anterior, se espera que el esfuerzo de marketing planteado en el capítulo 11.1.5 logre dar a conocer el producto y dar confianza a los posibles clientes antes del funcionamiento de la misma, por lo que la entrada al mercado se facilitaría.

El tal de ingresos en un año promedio.

7.3.9. Comparación: Diesel vs. Petróleo Pirolítico vs. Petróleo Hidrolítico (Degradación del Plástico).

Tabla 35. Comparación: Diésel vs. Petróleo Pirolítico vs. Petróleo Hidrolítico (Degradación del Plástico)

Propiedad	Petróleo Diésel	Petróleo Pirolítico (Plástico)	Petróleo Hidrolítico (Plástico)
Proceso de obtención	Refinación del petróleo crudo	Pirolisis (descomposición térmica sin oxígeno)	Hidrólisis: ruptura química con agua a alta T° y presión (a veces con catalizadores)
Composición general	Alcanos, cicloalcanos y aromáticos	Mezcla amplia de hidrocarburos (C5–C30)	Hidrocarburos + alcoholes, ácidos grasos, glicoles dependiendo del plástico
Rango de ebullición	180–360 °C	150–400 °C	120–350 °C (más ligero gracias a la hidrólisis parcial)
Densidad	0.83–0.86 g/cm ³	0.78–0.95 g/cm ³	0.80–0.88 g/cm ³
Viscosidad a 40 °C	2–4 cSt	20–50 cSt	3–15 cSt (más fluido que el pirolítico)
Índice de cetano	40–55	30–50	35–55 (puede acercarse más al

			diésel si está bien catalizado)
Poder calorífico (MJ/kg)	35–45	35–45	30–43 (algo menor por la presencia de oxígeno en moléculas hidrolíticas)
Aromáticos	10–20%	Puede ser alto (20–40%)	Medio–bajo (8–20%) gracias a la ruptura hidrolítica
Impurezas típicas	Azufre muy bajo	Puede contener cloro, metales y aditivos	Baja concentración de cloro (menos que en pirolisis), restos de agua, oxigenados
Olor	Característico leve	Olor fuerte, químico	Menos intenso que el pirolítico, más “aceitoso”
Color	Amarillo claro	Oscuro o marrón	Ámbar a marrón claro
Estabilidad a oxidación	Alta	Baja (se degrada rápido)	Media (más estable que el pirolítico)
Temperatura de inflamación	52–96 °C	40–70 °C	50–90 °C
Emisiones al quemar	Relativamente controladas	Puede generar hollín, aromáticos y cloro	Emisiones más limpias que el pirolítico, menos hollín

Nota. Tabla generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

El total de ingresos en un año promedio supera los 6,85 millones de dólares, donde cada línea de producción tiene prácticamente la misma participación. Para el primer año, dados los porcentajes de funcionamiento mensual de la empresa antes 70 expuestos, por procesamiento de desechos plásticos se tienen ingresos por 1.673.057 dólares, y por el diésel sintético proveniente del procesamiento de otros plásticos 846.186 USD. El detalle de los ingresos promedios según línea de producción y producto se aprecia en la Tabla 30.

Tabla 36. Ingresos Promedio Mensuales y Anuales.

Producto	Producción mensual	Precio por Tonelada USD	Ingreso mensual	Ingreso anual
Por Procesamiento de Plásticos				
Diesel	437,058	660	288.458	3.461.497
Ingresos Totales				3.461.497

Nota. Adaptado desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

7.3.10. Indicadores y Parámetros

Se asumió el precio del dólar al 12 de noviembre del 2010 como 480,03 pesos, y de la UF en 21421,06 pesos. La UTM al mismo mes fue de 37.567 pesos. Todos los datos fueron obtenidos del SII.

Se utilizó depreciación normal, gracias a valores obtenidos de la Tabla de Vida Útil fijada por el Servicio de Impuestos Internos para bienes físicos del activo inmovilizado, donde el inmobiliario se deprecia linealmente en 40 años y la planta en 10.

Se trabajó con una tasa de descuento convencional del 12% ya que para proyectos de la industria química se encontraron tasas un poco superiores al 11%, y para dar holgura y utilizar valores promedios de evaluación se optó por dicha tasa. Se utilizó un horizonte de evaluación de 10 años, dado el periodo de vida útil de los equipos principales.

Para el capital de trabajo se utilizó el método de déficit acumulado máximo. En este caso, el costo corresponde al total de los costos fijos y variables de un año, asumiendo el peor caso, donde no se obtengan ingresos durante el primer año, es decir, el desfase entre egresos e ingresos sea de un año. Éste corresponde, entonces, a 2.613.590 USD.

El Valor residual corresponde al valor contable de los activos de la empresa al final del periodo de evaluación, es decir, el precio de adquisición menos la depreciación acumulada hasta el final del horizonte. Este valor es nulo en el caso de las maquinarias y corresponde entonces sólo al precio del terreno y valor residual del inmobiliario, lo que asciende a 293.081 USD.

7.3.11. Flujos de Caja

Finalmente, se realizaron 3 flujos de caja diferentes utilizando la información antes descrita. En estos casos, no se tomó en cuenta el impuesto específico ya que es la situación más probable, sin embargo, sus repercusiones y efectos en el flujo de caja son analizadas en el capítulo siguiente.

Se analizaron los casos donde la planta funciona solamente con una línea de producción a partir de una sola materia prima y para ambas líneas en conjunto. La asignación de inversión cuando se trabaja sólo con una línea de producción se asumió de un 55% para la maquinaria en el caso de procesamiento de plásticos contra el 45% para cuando se tiene sólo para este material. Además, se tomó en cuenta la construcción de un solo galpón en cada caso. Las inversiones en terreno, marketing e inmobiliario, al igual que los costos fijos se mantienen iguales en ambos casos. Los niveles de ingreso son diferentes en cada caso, como se muestra en el Finalmente, la depreciación fue calcula en función de estos datos.

En la Tabla 35 se pueden observar los resultados obtenidos para todos los casos en cuestión. Los flujos anuales detallados para todos los casos, para los casos del proyecto total, sólo procesamiento de plásticos y solamente de neumáticos, respectivamente.

Tabla 37. Resultados Flujos de Caja

Indicadores	Línea de Plásticos
VAN (USD)	545.989
TIR	13,96%
PRC	7 años

Nota. Adaptado desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

El proyecto presenta resultados positivos para todos los flujos analizados, pero con variaciones importantes entre uno y otro. Como era de esperar, el caso menos rentable se presenta para línea de procesamiento de plásticos, dado los altos costos variables involucrados, provocando que el margen de ganancia sea mínimo.

La línea de procesamiento de neumáticos tiene una tasa de renta notablemente superior lo que permite equilibrar baja rentabilidad de la línea de plásticos, dándole al proyecto general una TIR de 41,40% y un VAN que asciende a 12,3 millones de dólares.

7.3.12. Análisis de Sensibilidad

Para hacer el análisis de sensibilidad del proyecto, se tomaron en cuenta cuatro variables que se consideraron importantes y que podrían alterar significativamente el resultado del flujo de caja. Por un lado, se estableció un escenario en el caso en que sí se cobre el impuesto específico al diesel sintético.

Se decidió también sensibilizar con respecto al precio del petróleo y de la materia prima, tanto del plástico. Estas variaciones se estudiaron para los casos en que se toman

en cuentas ambas líneas de producción, a base de plásticos y neumáticos, y para cada una por separado.

Todas las variaciones para cada una de estos parámetros se harán *ceteris paribus* y se analizarán sus repercusiones para los 3 flujos de caja antes mencionados. Para algunos de estos análisis, se utilizó el software Crystal Ball de Oracle, en el cual se simulaban 1.000 escenarios (con un nivel de confianza del 95%). Además, se buscó el punto de inflexión de cada flujo para las variables estudiadas. Este punto refleja hasta qué valor el aumento de una variable hace que el proyecto tenga VAN nulo, y deje de ser rentable. Los resultados se exhiben a continuación.

7.3.13. Impuesto específico

Aun cuando se supone que el diesel sintético estaría libre de impuesto específico, al igual que el biodiesel, se analizó el caso en que no se estaría exento de él. Si se llegase a cobrar dicho impuesto, disminuiría el margen de ganancias, haciendo que el proyecto baje su rentabilidad. Los resultados se detallan en la tabla siguiente.

Tabla 38. Resultados Flujo de Caja con Impuesto Específico.

Indicadores	Resultados
VAN (USD)	7.059.461
TIR	29,18%
PRC	4 años

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Existe una clara e importante baja en todos los indicadores, no obstante, el proyecto sigue siendo altamente rentable, con un VAN superior a los 7 millones de dólares y una TIR del 29,18%. Para más detalles, ver el flujo de caja en el Anexo K.

7.3.14. Precio del Petróleo Diesel

Las variaciones en los precios de cualquier activo poseen una componente estocástica, aun cuando tengan alguna tendencia marcada. En el caso del precio del petróleo, existe una reversión a la media de mediano plazo, aun cuando este factor random afecte las fluctuaciones a corto plazo. Dadas las características de esta variable, se decidió asumir un precio constante para el horizonte de evaluación del proyecto que corresponde al promedio de mediano plazo. Para efectos del estudio de sensibilidad, es necesario ajustar el comportamiento del precio promedio a alguna distribución de probabilidad.

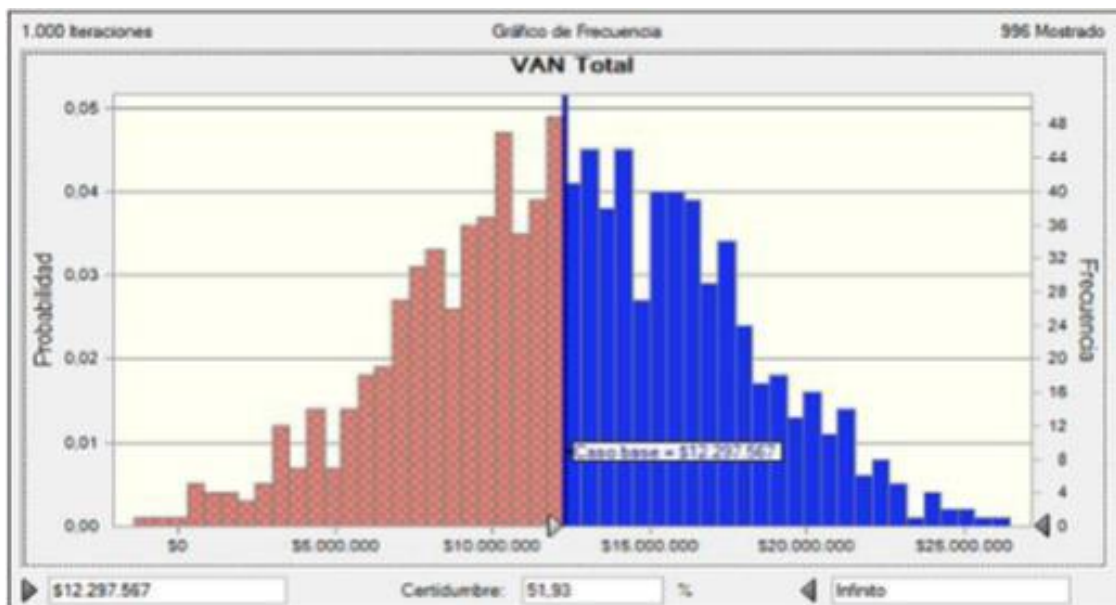
El Teorema Central del Límite (TCL) indica que la distribución de la media muestral de una variable aleatoria tiende a una Normal, cuando la muestra es suficientemente grande (superior a 30).

Como se trabaja con el promedio histórico del precio del diésel – con datos semanales de 5 años atrás – se cumple con las condiciones del TCL y, así, se asume que este parámetro variará según una distribución normal, con media igual a 660 USD/m³ y una desviación estándar de 149, usando obviamente sólo los valores positivos.

Se utilizó una varianza mayor dado que se quiere analizar la sensibilidad frente a cambios importantes (Ver Anexo L). El análisis de las repercusiones en el VAN se realizó con el programa Crystal Ball, simulando variaciones en el precio del petróleo diésel, usando la distribución antes descrita. Los resultados de dicho análisis se detallan a continuación, donde se muestran tablas con las medias, mínimo y máximo del VAN y su punto de inflexión con respecto al precio del diésel, y gráficos de frecuencias para el valor de la planta.

7.3.15. Caso Proyecto General

Figura 58. Variaciones VAN Proyecto General frente a cambios en el Precio del Diésel.



Nota. El Gráfico muestra las Variaciones VAN Proyecto General frente a cambios en el Precio del Diésel. Tomado de *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos* [Gráfico], por Escudero, F., 2011, (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>)

En el 99,04% de los casos simulados, el VAN del proyecto es positivo. Dado el bajo punto de inflexión que posee es prácticamente improbable que se presente este escenario. Convenientemente, la probabilidad de obtener un VAN superior al caso base, planteado en el capítulo 11.5, es del 51,93%.

Tabla 39. Resultados Simulación para el Proyecto General.

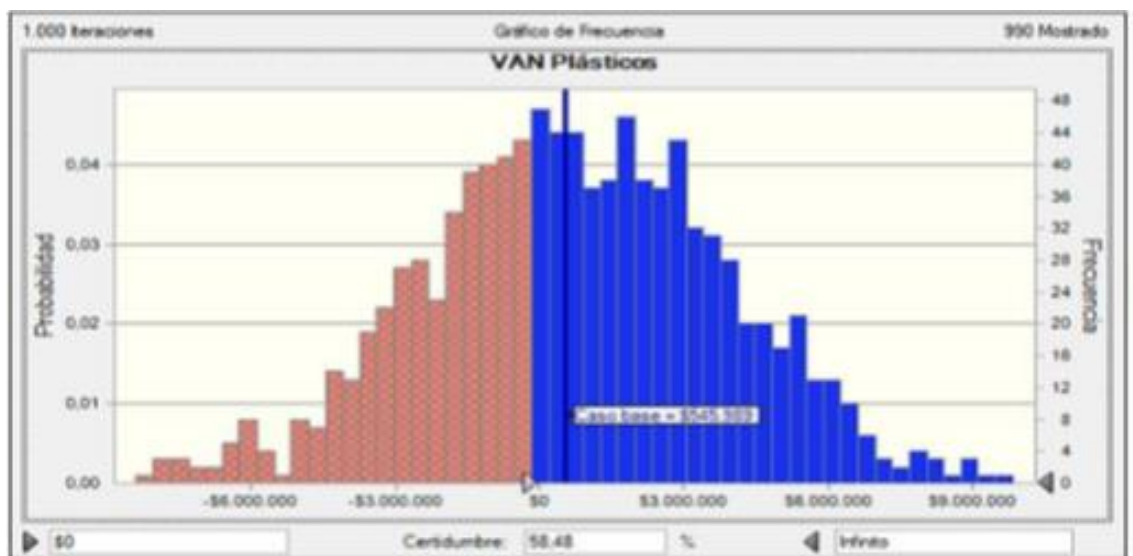
Indicadores	Resultados
Media	12.705.689 USD
Mínimo	- 3.733.149 USD
Máximo	27.811.662 USD
Punto Inflexión	298,54 USD/m3

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

La media encontrada es similar al caso base del proyecto. El VAN se mueve en un amplio rango, dada la alta varianza ocupada. Sin embargo, el precio para el cual el VAN se hace negativo es notablemente inferior al mínimo registrado en los últimos 5 años, por lo que es muy poco probable que el proyecto no sea rentable, además que lo más probable es que no se den este nivel de precios ya que la varianza del promedio es más pequeña. Se concluye, entonces, que, bajo las condiciones actuales para el precio del diésel, el proyecto general es rentable y, aunque es sensible frente a variaciones en el precio del diésel, prácticamente todos los valores estimados son positivos.

7.3.16. Caso Línea Única de Procesamiento de Plásticos.

Figura 59. Variaciones VAN Línea Plásticos frente a cambios en el Precio del Diésel.



Nota. El Gráfico muestra las Variaciones VAN Línea Plásticos frente a cambios en el Precio del Diésel. Tomado de *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos* [Gráfico], por Escudero, F., 2011, (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>)

En el caso en que sólo se trabaje con una línea de producción basada en el procesamiento de desechos plásticos, existe una alta probabilidad de que el VAN sea negativo, del 41,52%, por lo que, aun cuando se espera que éste sea positivo, es bastante riesgoso. Con una certidumbre del 51,67%, se espera que el VAN sea superior al caso base.

Tabla 40. Resultados Simulación para Línea de Plásticos.

Indicadores	Resultados
Media	726.125 USD
Mínimo	-9.846.637 USD
Máximo	10.865.743 USD
Punto Inflexión	635,88 USD/m3

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Aunque la varianza en este caso es ligeramente inferior al caso anterior, se puede llegar a un valor negativo considerable. El valor del precio del diésel para el cual el VAN se hace negativo es bastante alto comparado con el precio promedio usado (660 USD/m3), lo que hace que este caso sea muy sensible a tal variable, dando menor holgura y margen al proyecto. Sin embargo, el promedio del VAN es superior al caso base. Este proyecto es, entonces, más riesgoso, pero no así no rentable.

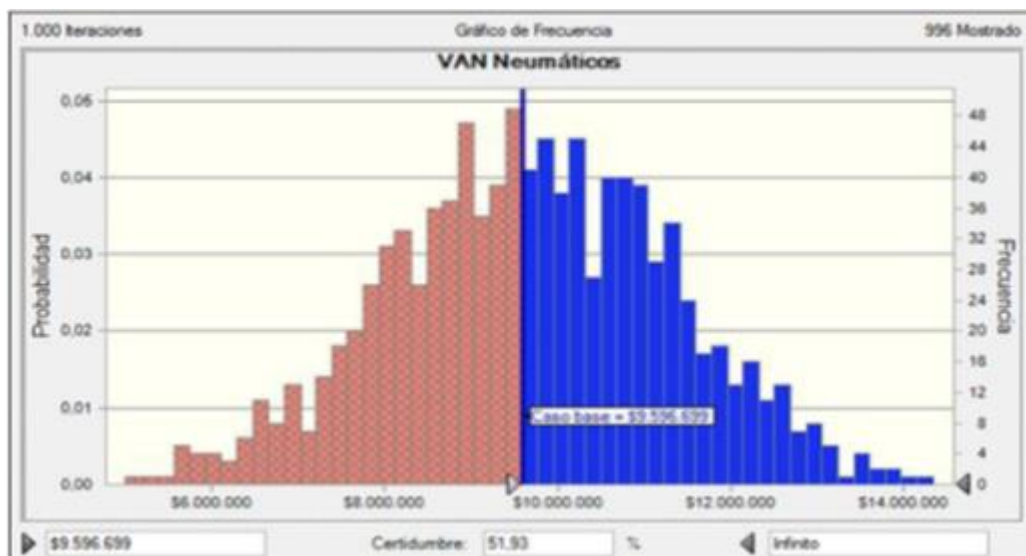
7.3.17. Caso Línea Única de Procesamiento de otros tipos de plásticos.

Tabla 41. Resultados Simulación de otros tipos de Línea de plásticos, PVC, PET, PE, PP

Indicadores	Resultados
Media	9.671.508 USD
Mínimo	3.012.123 USD
Máximo	14.476.694 USD
Punto Inflexión	-- USD/m3

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Figura 60. Variaciones VAN Línea plásticos frente a cambios en el Precio del Diésel.



Nota. El Gráfico muestra las Variaciones VAN Línea Plásticos frente a cambios en el Precio del Diésel. Tomado de *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos* [Gráfico], por Escudero, F., 2011, (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>)

En el 100% de los casos simulados, el VAN del proyecto es positivo y superior a 3 millones de dólares, y, en el mejor de los casos, el VAN supera los 14 millones. Con una certidumbre del 51,93%, se espera que éste sea superior al caso base, con un promedio de 9,7 millones de USD. Se puede asegurar que, dados los supuestos *ceteris paribus*, el proyecto es rentable y poco sensible a los movimientos del precio del diésel. Esto debido a que casi la mitad de los ingresos provienen de la venta de los subproductos, lo que permite amortiguar las posibles pérdidas producidas en una caída importante en la variable estudiada.

7.3.18. Precio del Plástico

El precio de los desechos plásticos se relaciona directamente con el precio de venta del plástico virgen. Del mismo modo, al ser un producto derivado directamente del petróleo, sus precios se correlacionan altamente con los de este último, ya que es su principal materia prima.

Así, como no se cuenta con muestras históricas del precio de los desechos plásticos, se asume que se distribuye como una Normal, al igual que el caso anteriormente

estudiado. Se obtuvieron precios máximos y mínimos de los últimos años de Polysmart, empresa dedicada al reciclaje de plásticos. Estos han variado desde los 80 a los 500 dólares por tonelada (dada la crisis, estos son bastante extremos). Se usó, entonces, una media de 250 USD/ton (caso base) y una desviación estándar de 85 que permite obtener un intervalo de confianza al 95% de entre 83,4 y 416,6 USD/ton.

Este análisis se hizo gracias al programa Crystal Ball, simulando con los datos antes expuestos. Los resultados se exponen a continuación en forma de gráficos de frecuencia para el VAN y tablas donde se muestran los valores mínimos, máximos y el promedio del valor del proyecto, junto con el punto de inflexión para el cual éste se vuelve negativo.

7.3.19. Caso Proyecto General

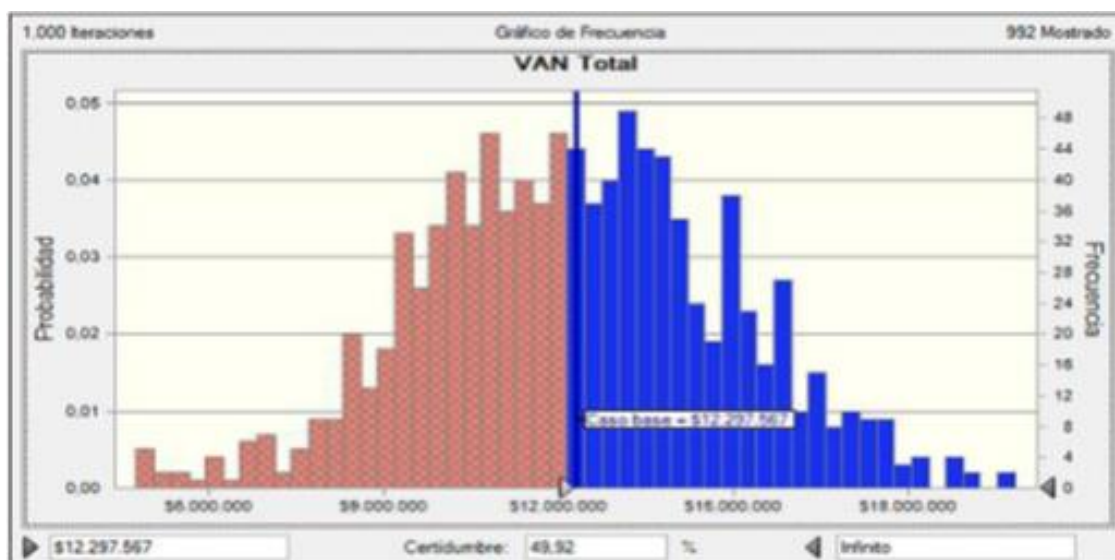
Tabla 42. Resultados Simulación para Proyecto General.

Indicadores	Resultados
Media	12.293.388 USD
Mínimo	3.482.084 USD
Máximo	20.425.466 USD
Punto Inflexión	620,67 USD/m ³

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

Existe una varianza considerable para el valor del proyecto, que fluctúa entre los 3,5 y los 20,4 millones de dólares. Sin embargo, aun cuando el proyecto es sensible frente a variaciones del precio del plástico, se espera que el VAN sea siempre positivo, por lo que no se ve afectada la rentabilidad. de losplasticos Esto se debe a que el precio para el cual el proyecto se vuelve negativo es excesivamente alto y es prácticamente improbable sensible a esta variable.

Figura 61. Variaciones VAN del Proyecto General frente a cambios en el Precio del Plástico.



Nota. El Gráfico Variaciones VAN del Proyecto General frente a cambios en el Precio del Plástico. Tomado de *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos* [Gráfico], por Escudero, F., 2011, (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>)

Consistentemente con lo anterior, se observa que el VAN del proyecto es siempre positivo, a pesar de los posibles aumentos en el precio de los desechos plásticos, y que, indistintamente, se pueden obtener valores superiores o inferiores al caso base. El proyecto es indiscutiblemente rentable, y no se ve afectada su factibilidad económica frente a fluctuaciones de esta variable. Esto puede deberse a que se amortigua cualquier caída en el margen del diésel proveniente de línea de plásticos con la de procesamiento de neumáticos que es altamente rentable, y con la venta de sus subproductos.

7.3.20. Caso Línea Única de Procesamiento de Plásticos

Tabla 43. Resultados Simulación para Línea de Plásticos.

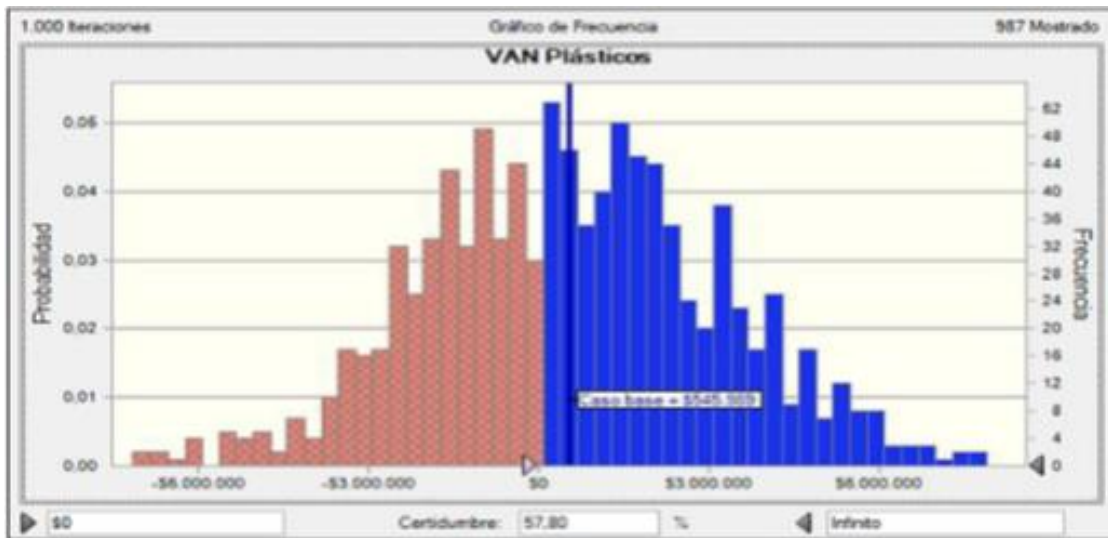
Indicadores	Resultados
Media	521.652 USD
Mínimo	-9.139.972 USD
Máximo	8.686.777 USD
Punto Inflexión	266,43 USD/m3

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

La varianza del VAN es alta. Sus valores fluctúan dentro de un rango bastante amplio, lo que demuestra que este caso es muy sensible frente a variaciones del precio del plástico, como es de esperar. No obstante, cabe destacar que las variaciones en precios promedio a lo largo del periodo de evaluación no deberían ser demasiado grandes.

Sin embargo, el precio para el cual el VAN se hace negativo es muy cercano 78 al precio promedio utilizado en el caso base, por lo que se tiene un bajo margen superior con respecto a esta variable, lo que hace que este caso sea sumamente riesgoso.

Figura 62. Variaciones VAN Línea Plásticos frente a cambios en el Precio del Plástico.



Nota. El Gráfico Variaciones VAN Línea Plásticos frente a cambios en el Precio del Plástico. Tomado de *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos* [Gráfico], por Escudero, F., 2011, (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>)

La probabilidad de que el VAN para la línea única de procesamiento de plásticos sea superior a cero es del 57,80%, y, en la mitad de las simulaciones, el proyecto tiene un valor superior al caso base. Aun cuando el proyecto usando sólo una línea de producción a partir de desechos plásticos es bastante sensible y riesgoso en función a esta variable, éste sigue siendo mayoritariamente rentable, pero con valores para el VAN y la TIR no muy elevados.

7.3.22. Caso Proyecto General

Tabla 44. Resultados para Proyecto General.

Indicadores	Resultados
VAN	10.641.199 USD
TIR	36,56%
PRC	3 años
Punto Inflexión	370,68 USD/m3

Nota. Desde *Evaluación de prefactibilidad de una planta de elaboración de diésel sintético a partir de desechos de plásticos y neumáticos*, por Escudero, J., 2011, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104209>

El VAN y la TIR son inferiores al caso base, sin embargo, su variación no es considerable, y el proyecto, con un valor por 10,6 millones de dólares y una tasa de retorno del 36,56%, sigue siendo altamente rentable. El periodo de recuperación del capital no se mueve de los 3 años. El precio para el cual el valor del proyecto se hace negativo es excesivamente elevado, superando incluso al valor de los desechos plásticos, por lo que es prácticamente improbable que el proyecto tenga VAN negativo por un alto costo de los plásticos. El proyecto es, entonces, poco sensible a esta variable.

CONCLUSIÓN

La producción de aceite de plástico reciclado (PPO) a partir de residuos plásticos mixtos mediante pirólisis es una tecnología atractiva en la actualidad. Esta tecnología puede resolver dos de los principales problemas críticos del mundo actual: la disminución de los combustibles fósiles y la gestión del creciente problema de los residuos plásticos. Esta revisión bibliográfica analiza los trabajos de investigación que utilizan aceite de plástico reciclado en motores diésel para analizar el rendimiento del motor, las emisiones y las características de combustión.

La mayoría de los estudios mencionados tratan sobre el uso de PPO directamente o solo después de la destilación para evaluar el rendimiento, las emisiones y las características de combustión de los motores diésel. Todos indican que los motores diésel pueden funcionar con PPO crudo sin necesidad de modificaciones. Sin embargo, la mayoría de los procesos de pirólisis para la producción de PPO se han llevado a cabo en reactores de laboratorio a pequeña escala o pequeños de forma industrial a diferencia del petróleo crudo y se han utilizado para probar motores diésel durante un período largo.

Por lo tanto, es necesario realizar más investigaciones para determinar el efecto del PPO en el rendimiento, a largo tiempo de cinco a diez años, las emisiones y las características de combustión de los motores diésel durante su uso a largo plazo.

La mayoría de los estudios publicados mencionan un aumento en el consumo específico de combustible (BSFC) al usar aceite de palma aceitera (PPO) en comparación con el diésel; sin embargo, algunos estudios observaron una reducción en el BSFC en comparación con el diésel (la mayor reducción documentada fue del 17,88 % al usar PPO (Janyalertadun et al., 2017)). Al usar mezclas de PPO y diésel, se observó que el BSFC aumentaba (el mayor aumento documentado fue del 17,14 % al usar mezclas de PPO y éster metílico de *Jatropha* (JME) en comparación con el diésel (Senthilkumar y Sankaranarayanan, 2016)) y disminuía, dependiendo de las proporciones de la mezcla.

No obstante, el aumento en el BSFC se ha observado principalmente al usar compuestos oxigenados con PPO. Por ejemplo, se observó un aumento del 9,06 % en el BSFC al usar un 10 % de éster metílico de diésel (DEE) mezclado con PPO (Devaraj et al., 2015b). Se observó que la eficiencia térmica de frenado disminuía principalmente con el uso de PPO, sus mezclas con diésel y con la adición de compuestos oxigenados (la mayor reducción, del 17,26 %, se observó al usar mezclas de PPO y diésel en comparación con el diésel comercial (Kumar et al., 2013)). Sin embargo, algunos estudios observaron un aumento de la eficiencia térmica de frenado en comparación con el diésel (15,7 % al usar una mezcla de PPO y biodiésel (Ramesha et al., 2015)).

De manera similar, se encontró que el consumo específico de combustible (BSEC), la presión máxima en el cilindro, el retardo de encendido y la tasa de liberación de calor aumentaban principalmente con el uso de PPO y sus mezclas con diésel, con pequeñas discrepancias. No obstante, no se encontraron suficientes datos de investigación para concluir sobre su comportamiento y tendencia.

En general, se ha documentado un aumento en la temperatura de los gases de escape con el uso de PPO, sus mezclas y con la adición de compuestos oxigenados.

La mayoría de los investigadores documentaron que las emisiones de NO_x eran mayores al usar PPO en comparación con el diésel comercial, registrándose un aumento máximo del 188,89 % al usar mezclas de PPO y diésel en lugar de diésel puro (Panda et al., 2016). Sin embargo, Damodharan et al. observaron una disminución de las emisiones de NO_x con el uso de PPO en comparación con el diésel de ultra bajo azufre (ULSD) (Damodharan et al., 2017). Se constató que la disminución máxima en las emisiones de NO_x fue del 63,02 % al usar emulsiones de PPO (Kumar y Sankaranarayanan, 2016).

La mayoría de los estudios, con excepción del de Janyalertadun et al. (basado en los artículos analizados en este trabajo), reportaron un aumento en las emisiones de CO. En dicho estudio, se observó una menor emisión de CO al utilizar PPO en todas las condiciones de carga, en comparación con el diésel (un 8,50 % menor a plena carga) (Janyalertadun et al., 2017).

En cuanto a las emisiones de CO₂, algunos investigadores observaron disminuciones (la mayor, del 47,47 %, con mezclas de PPO (Kumar et al., 2013)), mientras que otros documentaron aumentos al utilizar PPO en comparación con el diésel (el aumento máximo fue del 13,04 % (Devaraj et al., 2015a)).

No se identificó una tendencia específica en las emisiones de CO₂ para determinar su comportamiento. La mayoría de los artículos reportaron mayores emisiones de hidrocarburos no quemados (UHC) y humo con el uso de PPO, aunque existen algunas discrepancias que muestran menores emisiones en comparación con el diésel.

Se realizaron investigaciones utilizando mezclas de PPO y diésel en diferentes porcentajes, desde el 10 % hasta el 90 % en peso, para determinar el efecto de dichas mezclas en el rendimiento del motor, las emisiones y las características de combustión. En toda la bibliografía consultada en este artículo de revisión, se observó un aumento en las emisiones de CO al utilizar mezclas de PPO y diésel en comparación con el uso exclusivo de diésel. Se menciona que las emisiones de CO₂, UHC, humo y NO_x aumentan o disminuyen al utilizar mezclas de PPO y diésel.

Los investigadores han continuado buscando formas innovadoras de disminuir las emisiones y mejorar el rendimiento de los motores diésel al usar PPO. Estas búsquedas los han llevado a utilizar compuestos oxigenados con PPO, como el éter dietílico (DEE), el éster metílico de *Jatropha*, el biodiésel de algas B20 y emulsiones, entre otros. La adición de DEE al 5 % en peso aumentó las emisiones de CO, UHC y CO₂, aunque algunos investigadores observaron una disminución en las emisiones de humo y NO_x. Al aumentar la concentración de DEE al 10 % en peso, se observaron resultados similares, con la única diferencia de que, en comparación con el uso del 5 % en peso, también aumentó la emisión de humo. Sin embargo, Kaimal y Vijayabalan documentaron aumentos en las emisiones de CO, CO₂, humo, NO_x y UHC con el uso de 5 y 10 % en peso de DEE con PPO (Kaimal y Vijayabalan, 2016a).

El uso de éster metílico de *Jatropha* al 10 % en peso con PPO logró reducir las emisiones de CO, humo e hidrocarburos no quemados (HCV), aunque las emisiones de NOx aumentaron en comparación con el uso de diésel. El uso de biodiésel de algas B20 al 90 % en peso con un 10 % en peso de PPO también logró reducir las emisiones de CO e HCV, pero incrementó las emisiones de NOx y humo. Las emulsiones de PPO lograron reducir las emisiones de NOx, pero las emisiones de CO e HCV siguieron siendo superiores a las del diésel comercial.

Por lo tanto, se puede afirmar que el PPO tiene un potencial muy alto para sustituir al diésel comercial a través de una mayor investigación y la mejora de sus propiedades mediante diferentes procedimientos de postratamiento como la destilación, el hidrotratamiento, etc. Es de resaltar, que algunos autores señalan que el MFI está relacionado de manera inversa con el peso molecular del polímero, por lo que estos resultados indican que el PLA posee un peso molecular bajo en comparación con el PET y PP.

Esto puede estar relacionado a la naturaleza del PLA, el cual es un polímero biodegradable de fuentes naturales, mientras que el PET y PP, son polímeros derivados del petróleo y sus cadenas moleculares son de gran tamaño [Xue, Y.; Johnston, P.; Bai, X. Efecto del modo de contacto catalizador y la atmósfera gaseosa durante la pirólisis catalítica de plásticos de desecho. *Conversación de energía. Manag.* 2017, 142, 441–451.]. En tanto, que otros autores indican, que es una ventaja que un polímero posea un peso molecular bajo, ya que esto favorece el proceso de degradación que puede transformar a estos materiales en otros componentes de bajo pesos molecular, tales como: dióxido de carbono, humus, derivados de los ácidos carboxílicos, entre otros [Paula, T.P.; Marques, M.D.F.V.; Marques, M.R.D.C.; Oliveira, M.S.; Monteiro, S.N. Pirólisis térmica y catalítica de residuos plásticos urbanos: Zeolitas modificadas de mordenita y ZSM-5. *Química* 2022, 4, 297–315.].

Ahora bien, se puede observar que la incorporación del PLA al PP genera valores de MFI superiores que al del polímero sintético. Esta circunstancia se encuentra asociado a que las propiedades resultantes en las muestras son productos de ambos componentes en las mezclas, por lo tanto, al aumentar el porcentaje de PLA, el índice de fluidez se incrementa. Esta misma analogía puede aplicarse para el peso molecular en las mezclas, en donde la presencia del PLA reduce aparentemente esta propiedad, ocasionando que sea susceptibles a procesos de degradación que provocan el acortamiento en las cadenas poliméricas resultantes [Aishwarya, K.N.; Sindhu, N. Pirólisis asistida por microondas de residuos plásticos. *Procedia Technol.* 2016, 25, 990–997.].

En tanto, que al incorporar PLA al PET se observa similar comportamiento que en las mezclas PP/PLA, con excepción a las muestras con un 5 % de PLA, donde existe una discrepancia con lo antes mencionado, ya que se observa que el MFI es mayor en esta proporción en comparación a los otros porcentajes de PLA agregados, salvo al correspondiente con el 20 % de PLA.

La causa de esto, pudo ser ocasionada a la distribución de las partículas del PLA; y al someterla a altas temperaturas, se alcanzó la fundición de las zonas en la que se agrupó el PLA, con baja cantidad de PET, por lo que se obtuvo un mayor índice de fluidez [Marcilla, A.; Gómez-Siurana, A.; Berenguer, D. Estudio de la influencia de las características de diferentes sólidos ácidos en la pirólisis catalítica de distintos polímeros. *Aplaus. Catal. A Gen.* 2006, 301, 222–231.]. Los resultados obtenidos indican que existen diferencias significativas en los valores del índice de fluidez en las mezclas de PP/PLA y PET/PLA preparadas. Por lo, que se consideró las mezclas con 20 % de PLA para llevar a cabo los procesos de degradación [Zhang, Y.; Ji, G.; Chen, C.; Wang, Y.; Wang, W.; Li, A. Aceites líquidos producidos por pirólisis de residuos plásticos con portador de calor en horno rotatorio. *Proceso de combustible. Technol.* 2020, 206 y 106455.].

Durante el desarrollo de los procesos de degradación aplicados se observó que el PLA se fue opacando al paso de los días. Perdiendo su apariencia transparente inicial hasta alcanzar un aspecto blanquecino al final de ambos procesos. La opacidad del PLA puede ser por la formación de agujeros en la muestra durante la degradación o por la evolución en la cristalinidad de la matriz polimérica [Semilu Rosesar, J.; Andari Kristanto, G. Composición y caracterización de residuos sólidos domésticos en Indonesia Urban Kampong.]. Sin embargo, la apariencia física es similar en ambos procesos. Por lo que, a simple vista no se puede inferir que medio está degradando con mayor intensidad al PLA. En cuanto al PP y PET se observó que el aspecto físico de las muestras no varió durante ambos procesos. Por lo que, es anticipado señalar que las muestras no fueron degradadas.

En relación a las mezclas de PP/20 %PLA se observó en ambos procesos una menor opacidad que la observado en el PLA puro. En tanto que, para la mezcla PET/20 %PLA no se observó ningún cambio en su aspecto físico. En virtud de lo anterior, se establece que mediante observaciones macroscópicas no se puede evidenciar si las muestras son degradadas por los procesos en estudios.

Conclusión de la factibilidad de los procesos en la producción del aceite Nafta.

A través del presente trabajo de título se logró analizar la posibilidad de instalar una planta de obtención de diésel sintético a partir de desechos plásticos fuera de uso. La tecnología utilizada, llamada pirólisis al vacío, permite elaborar un diésel de segunda generación de similares características que el petróleo diésel que puede ser usado directamente en motores de encendido automático.

Esta tecnología se utiliza hoy en día para crear aceites hidrocarburos, dada la división de polímeros. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de tiempo y temperatura, y gracias a la utilización de ciertos aditivos y catalizadores, es posible obtener diésel sintético, un combustible semejante al diésel fósil. Este tipo de energético no existe aún en el mercado y no se ha creado a nivel industrial.

No obstante, se está trabajando en etapa de producción en laboratorios a mediana escala. Los estudios técnicos y de viabilidad química están a cargo del ingeniero químico ecuatoriano

Adolfo Brinkmann, quien se responsabiliza de estudiar y validar el proceso de producción, y las características del combustible resultante. Las especificaciones y pormenores de la tecnología, en conjunto con las condiciones físicas y algunos insumos son de carácter confidencial, por lo que no se ahondó en este ámbito.

La planta cuenta con 2 líneas diferentes para el procesamiento de desechos plásticos – a excepción del PET y el PVC Ambas líneas tienen una capacidad de procesar 10 toneladas cada una. La pirólisis consta de 6 etapas:

Trituración de los desechos: Se corta la materia prima en trozos de 5x5 cm. Se obtiene plástico y otros metales que no entran en el proceso.

- Licuefacción (sólo para el caso de plásticos): esta etapa permite limpiar estos desechos y separar material orgánico e inorgánico.
- Pirólisis: Dentro de la cámara de pirólisis, en condiciones específicas de tiempo, altas temperaturas y ausencia total de oxígeno, los insumos son transformados en gases y vapores. Gracias al procesamiento de plásticos, se recuperan 2,5 toneladas de petróleo nafta.
- Hidrolisis: Dentro de la cámara de hidrolisis, se procesa con Agua básica, ácida, con la cantidad de concentración para posteriormente pasarlo a un neutralizador. Para posteriormente pasar a la torre de destilación de pequeña escala.
- Quimiólisis: dentro de la cámara de quimiólisis a través de sustancias con la concentración adecuada para la degradación química adecuada. También se usa el mismo neutralizador o uno individual, para su mejor destilación.
- El petróleo nafta destilado se prepara para su almacenamiento en contenedores especiales para su posterior uso en motores ya sea generadores u el uso más conveniente.
- Condensación: Parte de los gases son reutilizados para seguir por el mismo proceso para calentar la cámara, y el resto son condensados y llevados a la próxima etapa.
- Rectificación: En esta fase, se separan los aceites obtenidos. El pesado es reutilizado como combustible, y el liviano, llamado diesel equivalente, corresponde al 85%.
- Este último cumple con la gran mayoría de las especificaciones y normas chilenas, sin embargo, su índice de etano y punto de inflamación son inferiores a lo estipulado.
- Refinamiento: Esta última etapa permite transformar este hidrocarburo, gracias a un aditivo, en un diesel de segunda generación de similares características del diesel fósil, que cumple con las normas y puede ser utilizado en motores. Por procesamiento de plásticos, se obtienen 8,5 m³ de diesel, y por otros tipos de plásticos, 4,3.

En conclusión, la hidrólisis alcalina puede aplicarse al tratamiento de residuos de PET con alto contenido de impurezas. Se ha reportado que esta técnica es más económica que la metanólisis debido a sus menores costos de inversión y operación. Sin embargo, el proceso de acidificación necesario para separar el TPA y la separación de la solución catalítica del medio de reacción representan obstáculos que pueden limitar la implementación de la técnica a gran escala en el reciclaje químico de residuos de PET. Más importante aún, el catalizador utilizado en la hidrólisis alcalina se consume y puede no ser recuperable. Dado que la recuperabilidad y la reutilización del catalizador son cruciales para garantizar la sostenibilidad del reciclaje, esta podría ser una razón importante por la que se han realizado y publicado pocos estudios sobre hidrólisis alcalina en los últimos años, como se muestra en la Tabla 2.

Pusztaszeri patentó un método para hidrolizar de forma económica e industrial residuos de PET en una solución concentrada de ácido sulfúrico a temperatura ambiente y presión atmosférica. La hidrólisis completa del PET se logró en 30 minutos con una relación de volumen ácido/agua de al menos 6:1. Se consideraron cuatro tipos de residuos de PET como materia prima para la hidrólisis: películas con contenido de plata, películas convencionales, textiles y botellas. La invención se basa en una técnica para producir TPA con una pureza del 99 %.

Tras la hidrólisis, los sólidos en la solución se filtraron y se mezclaron con una solución alcalina para disolver el TPA producido. Una segunda filtración separó el TPA de las impurezas restantes, y este se precipitó ajustando el pH de la solución a un rango de 0 a 3. Los filtrados de la primera y la segunda filtración se neutralizaron y se desecharon.

Para la parte química del proceso de uso de degradación El uso de enzimas, en específico cutinasas, como herramienta de descontaminación de residuos plásticos es un área emergente en la que todavía queda mucho por explorar considerando como ya mencionamos que el proceso de degradación es complejo. Sin embargo, la gran cantidad de residuos de plásticos derivados de poliésteres como el PET que se generan al año a nivel mundial es alarmante, por lo que resulta apremiante atacar este problema. La biocatálisis y, en específico el uso de cutinasas, resulta ser una herramienta útil, por lo que se requiere la búsqueda de nuevas enzimas capaces de catalizar la hidrólisis de poliésteres contenidos en residuos plásticos; así como mejorar el proceso de degradación.

Todos estos productos obtenidos de los procesos en los cuales requiere otros componentes básicos como acidas, deben ser neutralizadas para evitar daño a la torre de destilación y los futuros motores donde se usarán para esto es el neutralizador de Ph que se usan para también su posterior almacenamiento del Aceite nafta.

La producción anual de diésel de segunda generación alcanza los 7.900 m3 anuales contando ambas líneas de producción, 1,2 y 1,5 toneladas y negro, respectivamente. 81 Este diésel sintético es más amigable con el medio ambiente ya que presenta niveles de azufre notablemente inferiores que el diésel fósil, lo que reduce las emisiones de GEI y material particulado, además, su fabricación ocupa poca energía y su reutilizan desechos inorgánicos de larga degradación.

El costo de producción promedio es de 330,95 USD, lo que representa menos del 58% del PPI actual, haciéndolo totalmente competitivo en el mercado.

Para analizar la factibilidad del proyecto, se estudió, en un primer momento, el mercado de las materias primas. Al año, se producen más de 47.500 toneladas de basura plástica en Chile, de los cuales el 55% no tiene un vertedero conocido. Cerca del 56,7% se generan en la zona centro del país (V a VI Región), con una tasa anual de crecimiento del 4,5%, por lo que se tiene 13.000 toneladas anualmente disponibles. La tendencia que tiene el mercado es que el transporte y recolección tenga costo nulo para quienes reciben y se reutilizan de los plásticos, y no se cobre por tal servicio. Estos se obtendrán de todo tipo de empresas que deban hacerse cargo de los plásticos que generan.

Para la obtención de desechos plásticos, se decidió trabajar con RSM ya que son una enorme fuente no explotada de materia prima y existe un fuerte incentivo por parte de las municipalidades para la creación de fuentes de valorización de la basura para lograr disminuir la disposición final y evitar impactos ambientales asociados. Sólo en la Región Metropolitana se generan cerca de 263.000 toneladas de desechos plásticos al año, de los cuales 85% pueden ser utilizados para la obtención de diesel sintético. Se trabajará en conjunto con un par de municipalidades que debe encargarse de recolectar, separar y abastecer la materia prima. Las comunas de La Florida, Las Condes, Maipú, Pudahuel, Puente Alto y San Bernardo son las que generan más desechos dentro de la región, superando las 100.000 toneladas cada una. El precio de mercado es de entre 200 y 300 USD/ton.

En un segundo plano, se estudió el mercado del diesel en Chile para buscar las industrias más atractivas para la venta del diesel sintético. Este combustible es el más utilizado, generando el 31% de la energía del país. Su consumo llegó a los 9,1 millones de metro cúbicos en 2009. Entre de los sectores potenciales, se decidió trabajar con Industrias, Comercio y Particulares, y Transporte Terrestre, debido a que presentan un alto consumo – 75% del diesel del país –, y se alinean con las metas medioambientales de la empresa, donde se busca fomentar su uso en usuarios finales, para disminuir la generación de GEI y material particulado. Se decidió trabajar también con clientes de la Región Metropolitana dada su cercanía con la materia prima, así, se ahorra un costo importante de transporte que puede superar los 2,85 USD/km. El consumo de estos sectores en la zona llega a los 1,3 millones de m³ al año, con una tasa de crecimiento del 6,5% anual. La planta de diésel sintético abarcaría el 1,43% de este mercado, lo que se traduce en 208 buses del Transantiago (3,25%) o 636 camiones (1,66%).

Se decidió localizar, entonces, la planta en la Región Metropolitana ya que la gran mayoría de los desechos, plásticos, se generan en esta zona. En la Región del Biobío se reciclan miles de toneladas de residuos, incluyendo plásticos, con cifras recientes (2020-2023) que muestran unas 1.800 toneladas de PET reciclado y más de 24 mil toneladas de residuos totales (vidrios, cartones, metales, plásticos) en ese periodo, destacando la necesidad de cumplir metas de reciclaje para plásticos bajo la Ley REP, aunque las cifras exactas de toneladas de plástico generadas y recicladas anualmente varían, con -

estimaciones que apuntan a una parte significativa de las más de 20 millones de toneladas de residuos que se producen en Chile anualmente.

Según estos datos la factibilidad de estas industrias en la octava región es positiva para dicho efecto se necesita una serie, de procesos como la disponibilidad municipal e regional de la obligación ya sea por ley o por formación cultural o educativa el almacenamiento, retiro y procesamiento de la materia prima.

Además, gran parte del mercado potencial se sitúa en esta región, por lo que se disminuyen los costos de transporte. Sin embargo, existen regulaciones del PRMS que impiden situar la planta en cualquier comuna, dejando al sector sur poniente como potenciales localidades.

Al finalizar los estudios de los diferentes mercados y normas involucrados, se procedió al análisis de factibilidad económica del proyecto. Se tiene costos totales anuales por 218.000 dólares, lo que lleva a un costo unitario promedio de 330,95 USD/m³. El precio del diesel se calculó constante para todo el periodo de evaluación con un promedio de 660 USD/m³, correspondiente al 90% del promedio del PPI más costos de oleoducto e impuesto específico, de los últimos 5 años, ya que esta variable presenta reversión a la media. Para el caso de los subproductos, el acero es vendido como chatarra a Gerdau Aza a un valor de 300 USD/ton y el negro de humo a un 25% del valor de importación, 825 USD/ton.

Con una inversión que asciende casi a los 4,3 millones de dólares, una tasa de descuento del 12% y un horizonte de evaluación de 10 años, se obtiene un VAN igual a 12,3 millones USD, una TIR de 41,4% y un periodo de recuperación del capital de 3 años. Lo que demuestra la factibilidad y la alta rentabilidad de la planta de obtención de diesel sintético.

Asimismo, se estudiaron los casos en los que sólo se trabaje con una línea de producción, a partir de plásticos de un solo uso. El proyectos tienen valores positivos, sin embargo, los indicadores de rentabilidad son extremadamente superiores en el último caso. La línea de plásticos tiene un VAN de 546.000 dólares y una TIR del 14%.

Con respecto a los productos derivados de los diferentes procesos de degradación del plástico, para el primero es combustible nafta, es C₅–C₂₀ (alcanos, alquenos, aromáticos), en la hidrolisis Ácido tereftálico, etilenglicol el segundo es materia prima química para otros procesos diferentes y productos de desechos se H₂, CH₄, C₂–C₄, CO, los cuales se pueden separar para tratarlos en diferentes estanques. El producto de gases de la hidrolisis es vapor de Agua, y gases preproducidos por la reacciones.

Al observar los cuadros comparativos de las Tablas 45, 46, 47 y 48, y considerando su aplicación práctica, se observa que la obtención del retorno es media para la pirólisis. Sin embargo, con una buena cotización económica, este retorno puede obtenerse en un periodo de dos años, determinado por el proyecto y limitado a dicha recuperación, dependiendo de la cantidad de producto procesado en la planta y de su tamaño de proceso.

Para la hidrólisis, la recuperación de la inversión puede ser más rápida, debido a que no necesita un gran tamaño industrial para alcanzar un periodo reducido de recuperación de la inversión. Charitopoulou, M. A., Stefanidis, S. D., Lappas, A. A., & Achilias, D. S. (2022). Catalytic pyrolysis of polymers with brominated flame-retardants originating in waste electric and electronic equipment (WEEE) using various catalysts. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 26, Artículo 100612. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235255412200016X>).

Además, los resultados de los porcentajes de rendimiento obtenidos para ambos procesos químicos corresponden a un 20 a 40 % en pirólisis y de 5 a 4 % en la hidrólisis. Los tratamientos químicos para los desechos son, en gran medida, necesarios en la pirólisis, donde pueden ser tratados mediante sistemas de almacenamiento y tratamiento de gases, como un scrubber u otro sistema adecuado para este proceso. Al analizar los datos del VAN y la TIR, se pueden comparar los resultados económicos obtenidos para ambos procesos.

En general, el petróleo obtenido mediante hidrólisis se parece más al diésel que el obtenido mediante pirólisis, aunque esto depende fuertemente de las condiciones del proceso. Para motores antiguos, la eficiencia del combustible depende de varios factores, incluyendo la calidad del combustible, las características de combustión y la forma en que interactúa con los sistemas de inyección y el diseño del motor.

Como conclusión final, considerando los datos obtenidos, la bibliografía consultada y la información técnica analizada, el proyecto es factible, pero se deben tomar en cuenta estos factores para asegurar un buen desempeño de la producción y obtener ganancias económicas que permitan aplicar estos procesos y disminuir entre un 80 % y un 95 % la cantidad de residuos plásticos.

Entonces, según los datos obtenidos en la parte económica, la hidrólisis puede ser una alternativa para un empresario que disponga de un mayor respaldo económico, mientras que la pirólisis puede ser una alternativa para una PYME que inicia el proceso, debido a sus menores costos de implementación.

Tabla 45. Aspectos Generales.

Criterio	Pirólisis	Hidrólisis
Tipo de procesos	Termoquímico	Químico
Presencia de oxígeno	no	no
Temperatura típica	350-700 °C	180-300°C
Presión	Atmosférica	10-100 bar
Tipo de alimentación	Plásticos Mixtos	Plásticos específicos
Nivel tecnológico	Alto (industrial)	Medio- Alto

Nota. Tabla generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

Tabla 46. Productos generados.

Aspecto	Pirolisis	Hidrolisis
Producto Principal	Aceite pirolítico	Monómeros
Productos secundarios	Gas + coque	Sales + agua
Tipos de productos	Combustible	Materia prima química
Selectividad	Baja-media	Alta
Grado de refinación	Requiere upgrading	Alta pureza

Nota. Tabla generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

Tabla 47. Composición de productos.

Producto	Pirólisis	Hidrólisis	Petróleo – Diésel (refinación)
Líquidos	C ₅ –C ₂₀ (alcanos, alquenos, aromáticos)	Ácido tereftálico, etilenglicol	Diésel, nafta, kerosene, fuel oil, GLP
Gases	H ₂ , CH ₄ , C ₂ –C ₄ , CO	Vapor de agua	CO ₂ , SO _x , NO _x , coque, lodos
Sólidos	Carbono, cenizas	Impurezas no hidrolítico	No Hay
Ingreso bruto	350–700 USD/t ganancias a 5 años	700–1.000 USD/t ganancias a 10 a 15 años	825 - 830 USD/t
Margen neto	200–400 USD/t 258602 clp los mil Litro.	400–700 USD/t 1140720 clp de nafta mil litros	830-1.309 USD/t 1176 mil litros a 970 clp el litro

Nota. Tabla generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

Tabla 48. Rendimiento típico.

Concepto	Pirólisis (USD/t)	Hidrólisis (USD/t)
----------	-------------------	--------------------

OPEX	75–150	150–250
Ingreso bruto	350–700	700–1.000
Ingreso bruto	350–700	700–1.000
Punto de equilibrio	Bajo–medio	Medio–alto

Nota. Tabla generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

Tabla 49. Comparación resumida de productos derivados del proceso.

Propiedad	Pirólisis	Hidrólisis	Petróleo natural
Punto ebullición (°C)	100–350	197–>300	30–350
Poder calorífico (MJ/kg)	42–46	14–20	42–46
Punto de inflamación (°C)	40–60	111	20–60
Densidad (g/cm ³)	0,85–0,95	1,1–1,5	0,82–0,95
Composición	Hidrocarburos C5–C30	Monómeros (EG, PTA)	Hidrocarburos C5–C35

Nota. Tabla generada por ChatGPT (OpenAI, 2026).

REFERENCIAS

- [1] M. del P. Cabildo Miranda, P. Cornago Ramirez, C. Escolastico Leon, S. Esteban Santos, C. Lopez Garcia, and D. Sanz del Castillo. Bases quimicas del medio ambiente. UNED, 2013.
- [2] V. Guanipa. Selección de materiales de ingeniería. Venezuela, 2011.
- [3] Lenin Casanova, Maibeth Jiménez, Víctor Zamora, and Jhonny Medina. Fabricación de bloques huecos de concretos con mezclas poliméricas a base de policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS) reciclado. *Ingeniería y Sociedad UC*, 12(1):23–30, 2017.
- [4] PlasticsEurope. Plásticos - situación en 2017. Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa. Informe Técnico, PlasticsEurope, 2018.
- [5] Magda Elva Perales Castro. *Modificación estructural del polietiléntereftalato con ácido poliláctico. Síntesis de polímeros biodegradables*. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012.
- [6] Liliana Serna, Aída Rodríguez de S., and Fred Albán. Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, 5(1):16–26, 2011.
- [7] Omar Maldonado and Yenifer Roche. Evaluación de la degradación hidrolítica y la biodegradación de mezclas binarias con ácido poliláctico (pla) y diferentes tipos de residuos plásticos. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2017.
- [8] COVENIN 1769-81, Frutas tomas de muestras. COVENIN, 1981.
- [9] Edgardo Figueira Maldonado. Degradación hidrolítica a diferentes pH de un material compuesto poli(ácido láctico)/quitosano. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2008.
- [10] ASTM D 1238 - 13(2013), Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer, 2013.
- [11] V. T. Santana, S. P. C. Goncalves, J. A. M. Agnelli, and S. M. Martins-Franchetti. Biodegradation of a polylactic acid/polyvinyl chloride blend in soil. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(1):536–540, 2012.
- [12] Elena Ramos Vásquez and Doris Zúñiga Dávila. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología aplicada*, 7(1-2):123–130, 2008.
- [13] Wilmar Andrés Botía Diaz. Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo. Trabajo Especial de Grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2015.

- [14] Sasha Solórzano O. Estudio de las propiedades mecánicas y reológicas de nanocompuestos de polipropileno y sus mezclas. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2007.
- [15] Ricardo Mendoza Quiroga and Jorge A. Medina Perilla. Propiedades adhesivas de mezclas de almidón de yuca termoplastificado y ácido poliláctico (tps/pla). *INGE CUC*, 7(1):217–228, 2011.
- [16] Gustavo Luengo Rico. Mezclas de polímeros. Estudio de su compatibilidad. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, España, 1993.
- [17] Marco A. Sabino, Dayanara Morales, Gladys Ronca, and José Luis Feijoo. Estudio de la degradación hidrolítica de un copolímero biodegradable. *Acta Científica Venezolana*, 54:18–27, 2003.
- [18] J. E. Rodríguez-Páez, C. Villaquirán, and J. Cobo. Estudio de la formación de los complejos intermedios durante la síntesis de alumina. *Materials Research*, 4(4):255–264, 2001.
- [19] Ana Karina Rodríguez Atencio. Estudio de la degradación de compuestos de poli(ácido láctico) con sulfato de calcio y quitosano. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2009.
- [20] Nohemí Magda Araque Pacheco. Estudio y caracterización de la degradación hidrolítica y en compostaje de PET virgen y reciclado. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2008.
- [21] Gendbien, A. L., Blackmore, K., Godley, A., Lewin, K., Whiting, K., & Davis, R. (July 2003). *Refuse Derived*.
- [22] *Fuel, Current Practice and Perspectives*. Final Report, Report No.:CO 5087-4 Contract No. 12429, WRc; IFEU; ECOTEC.
- [23] Abbas, A. S., & Shubar, S. D. (2008, March). Pyrolysis of High-density Polyethylene for the Production of Fuel-like Liquid Hydrocarbon. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 9(1), 23-29.
- [24] Ademiluyi, T., & Akpan, C. (2007, September). Preliminary evaluation of fuel oil produced from pyrolysis of low density polyethylene water- sachet wastes. (R. S.–H. Department of Chemical/Petrochemical Engineering, Ed.) *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, 11(3), 15 – 19.
- [25] Anonimo Cubano, A. (n.d.). *El Petroleo Crudo*. La Habana, Cuba.
- [26] Arabiourrutia, M., Elordi, G., Lopez, G., Borsella, E., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 230-237.
- [27] Brunet, Ernesto; Departamento de Química Organica; Universidad Autoonoma de Madrid. (n.d.).

[28] Viabilidad Económica: Convirtiendo botellas de plástico desechable de tereftalato de polietileno (PET) en combustible líquido por proceso de pirólisis. **José Adolfo Arízaga Mondragón**

[29] Formulación de alternativas para el manejo de residuos plásticos en el casco urbano del Municipio de Barbacoas-Nariño Diana Yuley Cortés Cortés.

[30] Planta de transformación de plásticos residuales en combustibles sintéticos. **Maria Elena Palma Moreno.**

[31] Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. *Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador* Servio Astudillo Pablo Arévalo Inés Malo Tania Naranjo Johana Espinoza.

[32] Introducción a la química de los polímeros

[21] <https://fch.cl/iniciativa/pacto-chileno-de-los-plasticos/>

<https://www.uam.es>. Retrieved 01 11, 2015, from

https://www.uam.es/departamentos/ciencias/qorg/docencia_red/qo/l2/radic.html

Pirólisis catalítica de residuos plásticos y efectos de simetría molecular: una reseña

BIBLIOGRAFÍA

1. Miandad, R.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Rehan, M.; Nizami, A.S. *Pirólisis catalítica de residuos plásticos: Una reseña. Proceso Saf. Entorno. Prot.* 2016, 102, 822–838. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>.
2. Ritchie, H.; Roser, M. OurWorldInData.org. Disponible en línea: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution> (consultado el 18 de diciembre de 2022). <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>.
3. Selpiana; Aprianti, T.; Rayosa, I.; Fuspitasarie, D. Poliestireno expandido y conversión de residuos plásticos multicapa en combustible líquido mediante el proceso de pirólisis. En las actas de la conferencia AIP; AIP Publishing LLC: Surakarta, Indonesia, 2018; p. 020151. [Google Scholar] [AIP Publishing Journal Portal](#). [CrossRef]
4. Ma, C.; Yu, J.; Wang, B.; Song, Z.; Xiang, J.; Hu, S.; Su, S.; Sun, L. Pirólisis catalítica de poliestireno de alto impacto retardado por llama sobre varios catalizadores de ácido sólido. *Proceso de combustible. Technol.* 2017, 155, 32–41. [Google Scholar] [ScienceDirect / Fuel Processing Technology](#). [CrossRef]
5. Rhodes, C.J. Contaminación por plásticos y posibles soluciones. *Ciencia. Progresión.* 2018, 101, 207–260. [Google Scholar] [SAGE Journals / Science Progress](#). [CrossRef] [PubMed]
6. Paula, T.P.; Marques, M.D.F.V.; Marques, M.R.D.C.; Oliveira, M.S.; Monteiro, S.N. Pirólisis térmica y catalítica de residuos plásticos urbanos: Zeolitas modificadas de mordenita y ZSM-5. *Química* 2022, 4, 297–315. [Google Scholar] [MDPI / Chemistry](#). [CrossRef]
7. Zhang, Y.; Ji, G.; Chen, C.; Wang, Y.; Wang, W.; Li, A. Aceites líquidos producidos por pirólisis de residuos plásticos con portador de calor en horno rotatorio. *Proceso de combustible. Technol.* 2020, 206 y 106455. [Google Scholar] [ScienceDirect / Fuel Processing Technology](#). [CrossRef]
8. Pinto, F.; Costa, P.; Gulyurtlu, I.; Cabrita, I. Pirólisis de residuos plásticos 2. Efecto del catalizador en el rendimiento del producto. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 1999, 51, 57–71. [Google Scholar] [ScienceDirect / Journal of Analytical and Applied Pyrolysis](#). [CrossRef]
9. Semilu Rosesar, J.; Andari Kristanto, G. Composición y caracterización de residuos sólidos domésticos en Indonesia Urban Kampong. En la serie de conferencias IOP: Ciencia e Ingeniería de Materiales, Actas de la Conferencia Internacional sobre Ingeniería Mecánica e Industrial Avanzada, Banten, Indonesia, 8–9 de julio de 2020; IOP Publishing: Bristol, Reino Unido, 2020; Volumen 909, p. 012077. [Google Scholar] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/909/1/012077/pdf>

10. Li, P.; Wang, X.; Su, M.; Zou, X.; Duan, L.; Zhang, H. Características de la contaminación por plásticos en el medio ambiente: una revisión. *Mentira. Entorno. Contam. Toxicol.* 2021, 107, 577–584. [Google Scholar] en la revista *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* <https://link.springer.com/journal/128>.
11. Almeida, D.; Marques, M.D.F. Pirólisis térmica y catalítica de residuos plásticos. *Polímeros* 2016, 26, 44–51. [Google Scholar] <https://www.scielo.br/j/po/a/MyMxF6RjMbk78snK5CbWnXp/?lang=en> [CrossRef]
12. Abbas-Abadi, M.S.; Haghighi, M.N.; Yeganeh, H. El efecto de la temperatura, el catalizador, los diferentes gases portadores y el agitador sobre los hidrocarburos de transporte producidos por degradación LLDPE en un reactor agitado. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 2012, 95, 198–204. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-analytical-and-applied-pyrolysis> [CrossRef].
13. Kusenberg, M.; Eschenbacher, A.; Djokic, M.R.; Zayoud, A.; Ragaert, K.; De Meester, S.; Van Geem, K.M. Oportunidades y desafíos para la aplicación de aceites de pirólisis de residuos plásticos postconsumo como materias primas para crackers de vapor: ¿Descontaminar o no descontaminar? *Waste Manag.* 2022, 138, 83–115. [Google Scholar] <https://biblio.ugent.be/publication/8729817>. [CrossRef]
14. Xue, Y.; Johnston, P.; Bai, X. Efecto del modo de contacto catalizador y la atmósfera gaseosa durante la pirólisis catalítica de plásticos de desecho. *Conversación de energía. Manag.* 2017, 142, 441–451. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417302820>. [CrossRef]
15. Aishwarya, K.N.; Sindhu, N. Pirólisis asistida por microondas de residuos plásticos. *Procedia Technol.* 2016, 25, 990–997. [Google Scholar] https://www.researchgate.net/publication/308576886_Microwave_Assisted_Pyrolysis_of_Plastic_Waste. [CrossRef]
16. Marcilla, A.; Gómez-Siurana, A.; Berenguer, D. Estudio de la influencia de las características de diferentes sólidos ácidos en la pirólisis catalítica de distintos polímeros. *Aplaus. Catal. A Gen.* 2006, 301, 222–231. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>. [CrossRef]
17. Oyedun, A.O.; Gebreegziabher, T.; Ng, D.K.S.; Hui, C.W. Pirólisis de residuos mixtos de biomasa y plásticos—Un enfoque de modelización para reducir el consumo de energía. *Energía* 2014, 75, 127–135. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>. [CrossRef]
18. Fivga, A.; Dimitriou, I. Pirólisis de residuos plásticos para la producción de sustituto de combustible pesado: una evaluación tecnoeconómica. *Energía* 2018, 149, 865–874. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302377X>. [CrossRef]

19. Anuar Sharuddin, S.D.; Abnisa, F.; Wan Daud, W.M.A.; Aroua, M.K. Una reseña sobre la pirólisis de residuos plásticos. *Conversación de energía. Manag.* 2016, 115, 308–326. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890416300619>. [CrossRef]
20. Swamardika, I.B.A.; Winaya, I.N.S.; Hartati, R.S. Utilización de residuos plásticos usando pirólisis en lecho fijo. En la serie de conferencias IOP: Ciencia e Ingeniería de Materiales, Actas de la Conferencia Internacional sobre Diseño, Energía, Materiales y Manufactura, Bali, Indonesia, 24–25 de octubre de 2018; IOP Publishing: Bristol, Reino Unido, 2020; Volumen 539, p. 012021. [Google Scholar] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/539/1/012021>. [CrossRef]
21. Abdy, C.; Zhang, Y.; Wang, J.; Yang, Y.; Artamendi, I.; Allen, B. Pirólisis de residuos plásticos de poliolefina y posibles aplicaciones en la construcción de carreteras asfálticas: una revisión técnica. *Res. Conservar. Reciclar.* 2022, 180, 106213. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922000611>. [CrossRef]
22. Oliveux, G.; Dandy, L.O.; Leeke, G.A. Estado actual del reciclaje de polímeros reforzados con fibra: Revisión de tecnologías, reutilización y propiedades resultantes. *Ciencias Progresivas* 2015, 72, 61–99. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642515000316>. [CrossRef]
23. Maqsood, T.; Dai, J.; Zhang, Y.; Guang, M.; Li, B. Pirólisis de especies plásticas: Revisión de recursos y productos. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 2021, 159, 105295. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237021002813>. [CrossRef]
24. Mirkarimi, S.M.R.; Bensaid, S.; Chiaramonti, D. Conversión de residuos mixtos de plástico en combustible para motores diésel mediante proceso de pirólisis: una revisión. *Appl. Energy* 2022, 327, 120040. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261922012971>. [CrossRef]
25. Panda, también conocido como Singh, R.K.; Mishra, D.K. Termólisis de plásticos de desecho a combustible líquido Un método adecuado para la gestión de residuos plásticos y la fabricación de productos de valor añadido: Una perspectiva mundial. *Renueva. Sostener. Energy Rev.* 2010, 14, 233–248. [Google Scholar] https://www.researchgate.net/publication/227421226_Thermolysis_of_waste_plastics_to_liquid_fuel_A_suitable_method_for_plastic_waste_management_and_manufacture_of_value_added_products--A_world_prospective. [CrossRef]
26. Gvero, P.; Mujanić, I.; Papuga, S.; Vasković, S.; Anatunović, R. Revisión de combustibles sintéticos y producción de nuevos materiales basada en tecnologías de pirólisis. En los avances en aplicaciones de biomateriales industriales; Pellicer, E., Nikolic, D., Sort, J., Baró, M., Zivic, F., Grujovic, N., Grujic, R., Pelemis, S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Suiza, 2017; pp. 65–85. Disponible en línea: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-62767-0_4. (consultado el 18 de diciembre de 2022).

27. Kaminsky, W.; Zorriquet, I.J.N. Pirólisis catalítica y térmica de poliolefinas. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 2007, 79, 368–374. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237006001550>.
28. Buekens, A. Introducción al reciclaje de materias primas de plásticos. En *reciclaje de materias primas y pirólisis de plásticos de desecho*; Scheirs, J., Kaminsky, W., Eds.; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, Reino Unido, 2006; pp. 1–41. Disponible en línea: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0470021543.ch1>. (consultado el 4 de octubre de 2022).
29. Gvero, P.; Papuga, S.; Mujanic, I.; Vaskovic, S. Pirólisis como proceso clave en la combustión de biomasa y la conversión termoquímica. *Term. Sci.* 2016, 20, 1209–1222. [Google Scholar] [CrossRef]
30. Kalargaris, I.; Tian, G.; Gu, S. Combustión, rendimiento y análisis de emisiones de un motor diésel DI usando aceite plástico de pirólisis. *Proceso de combustible. Technol.* 2017, 157, 108–115. [Google Scholar] [CrossRef]
31. Kyaw, K.T.; Hmwe, C.S.S. Efecto de varios catalizadores en el proceso de pirólisis de combustible de residuos plásticos mixtos. *Int. J. Ing. Abogado Technol.* 2015, 8, 794–802. [Google Scholar] <https://www.proquest.com/openview/5244b40561785593e77c906355ca14f9/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=1486350>.
32. Dewangga, P.B.; Rochmadi; Purnomo, C.W. Pirólisis de residuos plásticos de poliestireno usando catalizador de bentonita. En *la Serie de Conferencias IOP: Ciencias de la Tierra y Medioambientales, Actas del 1er Seminario Internacional sobre Recursos Naturales y Gestión Ambiental 2019*, Bogor, Indonesia, 15 de agosto de 2019; Centro Internacional de Convenciones IPB (IICC): Bogor, Indonesia, 2019; Volumen 399, p. 012110. [Google Scholar] [CrossRef]
33. Hoang, A.T.; Ong, H.C.; Fattah, I.M.R.; Chong, C.T.; Cheng, C.K.; Sakthivel, R.; Bien, Y.S. Progreso en la pirólisis de biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles hacia la sostenibilidad ambiental. *Proceso de combustible. Technol.* 2021, 223, 106997. [Google Scholar] [CrossRef]
34. Gebre, S.H.; Sendeku, M.G.; Bahri, M. Tendencias recientes en la pirólisis de plásticos de desecho no degradables. *Chemistryopen* 2021, 10, 1202–1226. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
35. Papuga, S.; Gvero, P.; Vukic, L. Influencia de temperatura y tiempo en la pirólisis de plásticos residuales en el reactor de lecho fijo. *Term. Sci.* 2016, 20, 731–741. [Google Scholar] [CrossRef]
36. Anene, A.; Fredriksen, S.; Sætre; Tokheim, L.A. Estudio experimental de pirólisis térmica y catalítica de componentes de residuos plásticos. *Sostenibilidad* 2018, 10, 3979. [Google Scholar] <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/11/3979> [CrossRef]
37. Quesada, L.; Calero de Hoces, M.; Martín-Lara, M.A.; Luzón, G.; Blázquez, G. Rendimiento de diferentes catalizadores para el agrietamiento in situ de ceras oleosas

obtenidos por la pirólisis de residuos de película de polietileno. *Sostenibilidad* 2020, 12, 5482. [Google Scholar] [CrossRef]

38. Hazrat, M.A.; Rasul, M.G.; Khan, M.M.K.; Azad, A.K.; Bhuiya, M.M.K. Utilización de residuos poliméricos como recursos de combustible para el transporte: un desarrollo reciente. *Procedimientos energéticos* 2014, 61, 1681–1685. [Google Scholar] [CrossRef]

39. Panda, A.K. Degradación termocatalítica de diferentes plásticos para lanzarlos en combustible líquido usando catalizador de bentonita cálcica. *Int. J. Ind. Química*. 2018, 9, 167–176. [Google Scholar] [CrossRef]

40. Fadillah, G.; Fátima, I.; Sahrani, I.; Musawwa, M.M.; Mahlia, T.M.I.; Muraza, O. Avances recientes en catalizadores de bajo coste para la pirólisis de residuos plásticos en combustibles. *Catalizadores* 2021, 11, 837. [Google Scholar] [CrossRef]

41. Kremer, I.; Tomić, T.; Katančić, Z.; Erceg, M.; Papuga, S.; Vuković, J.P.; Schneider, D.R. Pirólisis catalítica de mezclas plásticas de residuos mecánicamente no reciclables: cinética y pirólisis en reactores a escala de laboratorio. *J. Entorno. Manag.* 2021, 296, 113145. [Google Scholar] [CrossRef]

42. Zhou, N.; Dai, L.; Lyu, Y.; Wang, Y.; Li, H.; Cobb, K.; Chen, P.; Lei, H.; Ruan, R. Un catalizador estructurado de espuma ZSM-5/SiC para el reciclaje químico de plásticos de desecho mediante pirólisis catalítica. *Eng. Químico J.* 2022, 440, 135836. [Google Scholar]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894722013365>.

43. Li, P.; Faramarzi, A.; Zhang, S.; Wang, Y.; Hu, X.; Gholizadeh, M. Progreso en pirólisis catalítica de residuos sólidos municipales. *Conversación de energía. Manag.* 2020, 226, 113525. [Google Scholar] [CrossRef]

44. Iribarren, D.; Dufour, J.; Serrano, D.P. Evaluación preliminar de la valoración de residuos plásticos mediante pirólisis secuencial y reforma catalítica. *J. Mater. Ciclo desperdicia de Manag.* 2012, 14, 301–307. [Google Scholar] [CrossRef]

45. Al-Salem, S.M. Materia prima y operación óptima para la conversión de plásticos a combustible en pirólisis. *De plásticos a energía*; Elsevier: Ámsterdam, Países Bajos, 2019; pp. 117–146. Disponible en línea: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128131404000054> (consultado el 4 de octubre de 2022).

46. Soni, V.K.; Singh, G.; Vijayan, B.K.; Chopra, A.; Kapur, G.S.; Ramakumar, S.S.V. Reciclaje termoquímico de plásticos residuales por pirólisis: una revisión. *Combustibles energéticos* 2021, 35, 12763–12808. [Google Scholar] [CrossRef]

47. Yan, G.; Jing, X.; Wen, H.; Xiang, S. Craqueo térmico de plásticos vírgenes y de residuos de PP y LDPE en un reactor semilotado bajo presión atmosférica. *Combustibles energéticos* 2015, 29, 2289–2298. [Google Scholar] [CrossRef]

48. Adrados, A.; de Marco, I.; Caballero, B.M.; López, A.; Laresgoiti, M.F.; Torres, A. Pirólisis de residuos de envases plásticos: Comparación de residuos plásticos de instalaciones de recuperación de materiales con residuos plásticos simulados. *Waste Manag.* 2012, 32, 826–832. [Google Scholar] [CrossRef]
49. Esposito, L.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Valoración del residuo plástico de una planta de tratamiento de WEEE mediante pirólisis. *Waste Manag.* 2020, 112, 1–10. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
50. Demirbas, A. Pirólisis de residuos plásticos municipales para la recuperación de hidrocarburos de gama de gasolina. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 2004, 72, 97–102. [Google Scholar] [CrossRef]
51. Sivagami, K.; Divyapriya, G.; Selvaraj, R.; Madhiyazhagan, P.; Sriram, N.; Nambi, I. Pirólisis catalítica de plásticos de residuos basados en poliolefinas y envases multicapa: un estudio piloto. *Proceso Saf. Entorno. Prot.* 2021, 149, 497–506. [Google Scholar] [CrossRef]
52. Cafiero, L.; Castoldi, E.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Identificación y caracterización de plásticos a partir de pequeños electrodomésticos y análisis cinético de su pirólisis térmicamente activada. *Polym. Degradar. Apuñala.* 2014, 109, 307–318. [Google Scholar] [CrossRef]
53. Cafiero, L.; Fabbri, D.; Trinca, E.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Caracterización térmica y espectroscópica (TG/DSC-FTIR) de plásticos mixtos para recuperación de materiales y energía bajo condiciones pirolíticas. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2015, 121, 1111–1119. [Google Scholar] [CrossRef]
54. Budsareechai, S.; Hunt, A.J.; Ngernyen, Y. Pirólisis catalítica de residuos plásticos para la producción de combustibles líquidos para motores. *RSC Adv.* 2019, 9, 5844–5857. [Google Scholar] <https://pubs.rsc.org/ra/article/9/10/5844/621139/Catalytic-pyrolysis-of-plastic-waste-for-the> [CrossRef]
55. Ratnasari, D.K.; Nahil, M.A.; Williams, P.T. Pirólisis catalítica de plásticos de desecho utilizando catálisis escalonada para la producción de aceites hidrocarburos para gama de gasolina. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 2017, 124, 631–637. [Google Scholar] [CrossRef]
56. Kunwar, B.; Cheng, H.N.; Chandrashekar, S.R.; Sharma, B.K. Plásticos a combustible: Una reseña. *Renueva. Sostener. Energy Rev.* 2016, 54, 421–428. [Google Scholar] [CrossRef]
57. Martín, A.J.; Mondelli, C.; Jaydev, S.D.; Pérez-Ramírez, J. El procesamiento catalítico de residuos plásticos en aumento. *Chem* 2021, 7, 1487–1533. [Google Scholar] [CrossRef]
58. Anantharaman, A.P.; Pillai, N.S. Catalizador heterogéneo para la pirólisis y producción de biodiésel. En *Biocombustibles Líquidos*, 1ª ed.; Shadangi, K.P., Ed.; Wiley: Nueva York, NY, EE. UU., 2021; pp. 77–118. Disponible en línea:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119793038.ch3>. (consultado el 30 de septiembre de 2022).

59. Yansaneh, O.Y.; Zein, S.H. Últimos avances en catálisis pirolítica de plásticos de desechos. *Procesos* 2022, 10, 683. [Google Scholar] [CrossRef]

60. Al-Salem, S.M.; Antelava, A.; Constantinou, A.; Manos, G.; Dutta, A. Una revisión sobre la pirólisis térmica y catalítica de residuos sólidos plásticos (PSW). *J. Entorno. Manag.* 2017, 197, 177–198. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

61. Armenise, S.; SyieLuing, W.; Ramírez-Velásquez, J.M.; Launay, F.; Wuebben, D.; Ngadi, N.; Rams, J.; Muñoz, M. Reciclaje de residuos plásticos mediante pirólisis: Una encuesta bibliométrica y revisión bibliográfica. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 2021, 158, 105265. [Google Scholar] [CrossRef]

62. Daligaux, V.; Richard, R.; Manero, M.H. Desactivación y regeneración de catalizadores de zeolita utilizados en la pirólisis de residuos plásticos—Revisión de procesos y análisis. *Catalizadores* 2021, 11, 770. [Google Scholar] [CrossRef]

63. Uthpalani, P.G.I.; Premachandra, J.K.; De Silva, D.S.M.; Weerasinghe, V.P.A. Pirólisis como método de valor añadido para la gestión de residuos plásticos: una revisión sobre la conversión de residuos LDPE y HDPE en combustible; Research Square: Durham, NC, EE. UU., 2022; Disponible en línea: <https://www.researchsquare.com/article/rs-1693804/v1> (consultado el 4 de octubre de 2022).

64. Siddiqui, M.Z.; Park, Y.K.; Kang, Y.; Watanabe, A.; Kim, S.; Kim, Y.M. Uso eficaz del laminado aluminio-plástico como materia prima para la pirólisis catalítica frente a catalizadores micro y mesoporosos. *J. Limpia. Prod.* 2019, 229, 1093–1101. [Google Scholar]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619315057>. [CrossRef]

65. Mark, L.O.; Cendejas, M.C.; Hermans, yo. El uso de catálisis heterogénea en la valoración química de residuos plásticos. *Química Sus. Química.* 2020, 13, 5808–5836. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

66. Raveh-Amit, H.; Lemont, F.; Bar-Nes, G.; Klein-BenDavid, O.; Banano, N.; Gelfer, S.; Charvin, P.; Bin Rozaini, T.; Sedan, J.; Rousset, F. Pirólisis catalítica de polietileno de alta densidad: eficiencia de descomposición y cinética. *Catalizadores* 2022, 12, 140. [Google Scholar] [CrossRef]

67. Cai, N.; Li, X.; Xia, S.; Sun, L.; Hu, J.; Bartocci, P.; Fantozzi, F.; Williams, P.T.; Yang, H.; Chen, H. Pirólisis-catálisis de diferentes plásticos de desecho sobre Fe/Al₂O₃ catalizador: hidrógeno de alto valor, combustibles líquidos, nanotubos de carbono y posibles mecanismos de reacción. *Conversación de energía. Manag.* 2021, 229, 113794. [Google Scholar] [CrossRef]

68. Colantonio, S.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; Ippolito, Nuevo México; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Pirólisis térmica y catalítica de una mezcla sintética representativa de

- residuos plásticos de envases. Frente. Ciencias Químicas, Ingeniería. 2020, 14, 288–303. [Google Scholar]<https://link.springer.com/article/10.1007/s11705-019-1875-3>. [CrossRef]
69. Vouvoudi, E.C.; Achilias, D.S. Degradación pirolítica de polímeros comunes presentes en materiales de envasado. J. Therm. Anal. Calorim. 2019, 138, 2683–2689. [Google Scholar] [ResearchGate](researchgate.net ResearchGate Profile [CrossRef].
70. Santella, C.; Cafiero, L.; De Angelis, D.; La Marca, F.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Pirólisis térmica y catalítica de una mezcla de plásticos procedentes de pequeños residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE). Waste Manag. 2016, 54, 143–152. [Google Scholar] [CrossRef]
71. Kremer, I.; Tomić, T.; Katančić, Z.; Erceg, M.; Papuga, S.; Vuković, J.P.; Schneider, D.R. Pirólisis catalítica y estudio cinético de plásticos de residuos del mundo real: tipos de plásticos de resina multicapa y mezclada. Technol limpio. Entorno. Política 2022, 24, 677–693. [Google Scholar] [CrossRef]
72. Tuffi, R.; D'Abramo, S.; Cafiero, L.M.; Trinca, E.; Vecchio Cipriotti, S. Comportamiento térmico y cinética de degradación pirolítica de mezclas poliméricas a partir de plásticos de envases de desecho. Expreso Polym. Lett. 2018, 12, 82–99. [Google Scholar] [CrossRef]
73. Araújo, S.A.; Araujo, A.S.; Fernandes, N.S.; Fernandes, V.J.; Ionashiro, M. Efecto del catalizador MCM-41 sobre la cinética de la descomposición térmica del poli(tereftalato de etileno). J. Therm. Anal. Calorim. 2010, 99, 465–469. [Google Scholar] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02196-8>. [CrossRef]
74. Park, J.W.; Kim, J.H.; Seo, G. El efecto de la forma de los poros en el rendimiento catalítico de las zeolitas en la degradación en fase líquida del HDPE. Polym. Degradar. Apuñala. 2002, 76, 495–501. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391002000599>. [CrossRef]
75. Borsella, E.; Aguado, R.; De Stefanis, A.; Olazar, M. Comparación del rendimiento catalítico de una montmorillonita con columnas de hierro y alúmina y zeolita HZSM-5 en un reactor de lecho con alvo. J. Anal. Appl. Pirólisis 2018, 130, 320–331. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237017305673>. [CrossRef]
76. Garforth, A.A. Producción de hidrocarburos por degradación catalítica de polietileno de alta densidad en un reactor de lecho fluidizado de laboratorio. Aplaus. Catal. A Gen. 1998, 169, 331–342. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337311001433>. [CrossRef]
77. López, A.; de Marco, I.; Caballero, B.M.; Laresgoiti, M.F.; Adrados, A.; Aranzabal, A. Pirólisis catalítica de residuos plásticos con dos tipos diferentes de catalizadores: ZSM-5 zeolita y Red Mud. Aplaus. Catal. B Entorno. 2011, 104, 211–219. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337311001433>. [CrossRef]

78. Lee, S.Y.; Yoon, J.H.; Kim, J.R.; Park, D.W. Degradación catalítica del poliestireno sobre la zeolita natural de clinoptilolita. *Polym. Degradar. Estable.* 2001, 74, 297–305. [Google Scholar] [CrossRef]
79. Hwang, E.Y.; Choi, J.K.; Kim, D.H.; Park, D.W.; Woo, H.C. Degradación catalítica de polipropileno I. Cribado de catalizadores. *Coreano, J. Chem. Eng.* 1998, 15, 434–438. [Google Scholar] [CrossRef]
80. Maryudi; Salamah, S.; Aktawan, A. Distribución de productos de pirólisis de residuos de espuma de poliestireno utilizando catalizador de zeolita natural y níquel/sílice. En la serie de conferencias IOP: Ciencias de la Tierra y Medioambientales, Actas de la Conferencia Internacional sobre Tecnología Industrial para el Desarrollo Sostenible (ICon-ITSD) 2017, Makassar, Indonesia, 25–26 de octubre de 2017; IOP Publishing: Bristol, Reino Unido, 2017; Volumen 175, p. 012012. [Google Scholar] [CrossRef]
81. Erawati, E.; Hamid, H.; Ilma, A.A. Proceso de pirólisis de residuos mixtos de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con zeolita natural como catalizador. *Molekul* 2018, 13, 106. [Google Scholar] [CrossRef]
82. Moorthy Rajendran, K.; Chintala, V.; Sharma, A.; Pal, S.; Pandey, J.K.; Ghodke, P. Revisión de materiales catalizadores en la obtención de combustibles hidrocarburos líquidos a partir de residuos plásticos mixtos municipales (MMPW). *Importa. Hoy Commun.* 2020, 24, 100982. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492819311080>. [CrossRef]
83. Li, K.; Lei, J.; Yuan, G.; Weerachanchai, P.; Wang, J.Y.; Zhao, J.; Arcillas con pilares Yang, Y. Fe-, Ti-, Zr- y Al para pirólisis catalítica eficiente de plásticos mixtos. *Eng. Químico J.* 2017, 317, 800–809. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894717302759>. [CrossRef]
84. Auxilio, A.R.; Choo, W.L.; Kohli, I.; Chakravartula Srivatsa, S.; Bhattacharya, S. Un estudio experimental sobre la pirólisis termocatalítica de residuos plásticos utilizando un pirolizador continuo. *Waste Manag.* 2017, 67, 143–154. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17303136>. [CrossRef] [PubMed]
85. Nguyen, L.T.T.; Poinern, G.E.J.; Le, H.T.; Nguyen, T.A.; Tran, C.M.; Jiang, Z. Un LaFeO₃ catalizador de minerales naturales de arcilla apoyado para la pirólisis eficiente de material plástico polipropileno. *Asia-Pac. J. Eng. Químico* 2021, 16, e2695. [Google Scholar] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/apj.2695>. [CrossRef]
86. Maafa, I. Pirólisis de residuos de poliestireno: una reseña. *Polímeros* 2021, 13, 225. [Google Scholar] <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/2/225>. [CrossRef] [PubMed]
87. Miandad, R.; Rehan, M.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Khan, H.; Ismail, I.M.I.; Dhavamani, J.; Gardy, J.; Hassanpour, A.; Nizami, A.-S. Pirólisis catalítica de residuos plásticos: avanzando hacia biorrefinerías basadas en pirólisis. *Al frente. Reserva*

de energía. 2019, 7, 27. <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2019.00027/>.

88. Cocchi, M.; Angelis, D.D.; Mazzeo, L.; Nardozi, P.; Piemonte, V.; Tuffi, R.; Cipriotti, S.V. Pirólisis catalítica de un residuo plástico residual utilizando zeolitas producidas por ceniza volante de carbón. *Catalizadores* 2020, 10, 1113. [Google Scholar] [CrossRef]

89. Dai, L.; Zhou, N.; Lv, Y.; Cobb, K.; Cheng, Y.; Wang, Y.; Liu, Y.; Chen, P.; Zou, R.; Lei, H.; y demás. Pirólisis-catálisis para la conversión de poliolefinas de desecho en nafta de baja aromático. *Conversación de energía. Manag.* 2021, 245, 114578. [Google Scholar] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421007548>. [CrossRef]

90. Utami, M.; Wijaya, K.; Trisunaryanti, W. La circonia sulfatada promovió la PT como catalizador para el hidrocracking de residuos plásticos de LDPE en combustibles líquidos. *Mater. Química, Física.* 2018, 213, 548–555. [Google Scholar] [CrossRef]

91. Ahmad, I.; Khan, M.I.; Khan, H.; Ishaq, M.; Tariq, R.; Gul, K.; Ahmad, W. Estudio de pirólisis de polipropileno y polietileno en productos aceitosos de alta calidad. *Int. J. Green Energy* 2015, 12, 663–671. [Google Scholar] [CrossRef]

92. Muhammad, C.; Onwudili, J.A.; Williams, P.T. Degradación térmica de plásticos de residuos reales y plásticos mixtos simulados en un reactor de pirólisis-catálisis de dos etapas para producción de combustible. *Combustibles energéticos* 2015, 29, 2601–2609. [Google Scholar] [CrossRef]

93. Obeid, F.; Zeaiter, J.; Al-Muhtaseb, A.H.; Bouhadir, K. Pirólisis termocatalítica de botellas de polietileno de residuos en un reactor de lecho compacto con diferentes materiales y catalizadores. *Conversación de energía. Manag.* 2014, 85, 1–6. [Google Scholar] [CrossRef]

94. Saeau, K.; Phusunti, N.; Phetwarotai, W.; Assabumrungrat, S.; Cheirsilp, B. Pirólisis catalítica de residuos plásticos de origen petrolífero y biodegradables para obtener productos químicos de alto valor. *Waste Manag.* 2021, 127, 101–111. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

95. Gulab, H.; Jan, M.R.; Shah, J.; Manos, G. Pirólisis catalítica plástica a combustibles como método terciario de reciclaje de polímeros: efecto de las condiciones del proceso. *J. Medio Ambiente Ciencias de la Salud Parte A* 2010, 45, 908–915. [Google Scholar] [CrossRef] https://www.researchgate.net/publication/43343898_Plastic_catalytic_pyrolysis_is_to_fuels_as_tertiary_polymer_recycling_method_Effect_of_process_conditions.

96. Susastriawan, A.A.P.; Purnomo; Sandria, A. Estudio experimental de la influencia del tamaño de la zeolita en la pirólisis a baja temperatura de residuos plásticos de polietileno de baja densidad. *Term. Sci. Eng. Prog.* 2020, 17, 100497. [Google Scholar] [CrossRef]

97. Aisien, E.T.; Otuya, I.C.; Aisien, F.A. Pirólisis térmica y catalítica de plástico polipropileno de desecho usando catalizador FCC gastado. *Entorno. Technol. Innov.* 2021, 22, 101455. [Google Scholar] [CrossRef]

98. Onwudili, J.A.; Muhammad, C.; Williams, P.T. Influencia de la temperatura del lecho catalizador y propiedades de los catalizadores de zeolita en la pirólisis-catálisis de una muestra simulada de plásticos mixtos para la producción de combustibles y productos químicos mejorados. *J. Energy Inst.* 2019, 92, 1337–1347. [Google Scholar] [CrossRef]
99. Serinyel, Z.; Dayma, G.; Glasziou, V.; Lailliau, M.; Dagaut, P. Un estudio de pirólisis sobre éteres simétricos C4–C8. *Proc. Comb. Inst.* 2021, 38, 329–336. [Google Scholar] [CrossRef]
100. Kirss, R.U.; Brown, D.W.; Higa, K.T.; Gedridge, R.W. Vías de pirólisis de compuestos organotelurio(II) simétricos e asimétricos. *Organometálicos* 1991, 10, 3589–3596. [Google Scholar] [CrossRef]
101. Erceg, M.; Krešić, I.; Vrandečić, N.S.; Jakić, M. Diferentes enfoques para el análisis cinético de la degradación térmica del óxido de poli(etileno). *J. Therm. Anal. Calorim.* 2018, 131, 325–334. [Google Scholar] [CrossRef]
102. Eimontas, J.; Striūgas, N.; Abdelnaby, M.A.; Yousef, S. Comportamiento cinético catalítico de la pirólisis y análisis TG-FTIR-GC-MS de plásticos metalizados de envases alimentarios con diferentes concentraciones de catalizador ZSM-5 zeolita. *Polímeros* 2021, 13, 702. [Google Scholar] <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/5/702> [CrossRef] [PubMed]
103. Tian, L.; Shen, B.; Xu, H.; Li, F.; Wang, Y.; Singh, S. Comportamiento térmico de la pirólisis de té de desecho mediante análisis TG-FTIR. *Energía* 2016, 103, 533–542. [Google Scholar] [CrossRef]
104. Tsagkalias, I.S.; Vlachou, A.; Verros, G.D.; Achilias, D.S. Efecto del óxido de grafeno o óxido de grafeno funcionalizado en la cinética de copolimerización del estireno/n-butil metacrilato. *Polímeros* 2019, 11, 999. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
105. Haas, C.H.; Ring, M.A. Reacción del radical sililo y silileno con acetileno y aplicación de simetría orbital a la pirólisis de silano y disilano. *Inorg. Química* 1975, 14, 2253–2256. [Google Scholar] [CrossRef]
106. Bagri, R.; Williams, P.T. Pirólisis catalítica del polietileno. *J. Anal. Appl. Pirólisis* 2002, 63, 29–41. [Google Scholar] [CrossRef]
107. Dwivedi, P.; Mishra, P.K.; Mondal, M.K.; Srivastava, N. Pirólisis de residuos poliméricos no biodegradables para recuperación de energía. *Heliyon* 2019, 5, e02198. [Google Scholar] [CrossRef]
108. López, G.; Artetxe, M.; Amutio, M.; Bilbao, J.; Olazar, M. Rutas termoquímicas para la valoración de plásticos poliolefinicos de desecho para producir combustibles y productos químicos. Una reseña. *Renueva. Sostener. Energy Rev.* 2007, 73, 346–368. [Google Scholar] [CrossRef]

109. Tomić, T.; Kremer, I.; Vecchio Cipriotti, S.; Schneider, D.R. Eficiencia de la cadena de recuperación de residuos municipales de envases y idoneidad de fracciones residuales separadas para su uso en la producción de combustibles alternativos. *J. Entorno. Manag.* 2022, 322, 116056. [Google Scholar] [CrossRef]
110. Caldeira, vicepresidente; Santos, A.G.D.; Oliveira, D.S.; Lima, R.B.; Souza, L.D.; Pergher, S.B.C. Craqueo catalítico de polietileno mediante análisis termogravimétrico: Efectos de las propiedades zeolíticas y el proceso de homogeneización. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017, 130, 1939–1951. [Google Scholar] [CrossRef]
111. Kremer, I.; Tomić, T.; Katančić, Z.; Hrnjak-Murgić, Z.; Erceg, M.; Cipriotti, S.V.; Schneider, D.R. Efecto del catalizador de zeolita en la cinética de pirólisis de envases de alimentos de plástico multicapa. *Simetría* 2022, 14, 1362. [Google Scholar] [CrossRef]
112. Zhang, Z.; Gora-Marek, K.; Watson, J.S.; Tian, J.; Ryder, M.R.; Tarach, K.A.; López-Pérez, L.; Martínez-Triguero, J.; Melián-Cabrera, I. Recuperación de plásticos residuales utilizando reactores nanoescala selectivos en forma como catalizadores. *Nat. Sustain.* 2019, 2, 39–42. [Google Scholar] [CrossRef]
113. Aguado, J.; Serrano, director de fotografía; Escola, J.M. Combustibles a partir de plásticos residuales mediante procesos térmicos y catalíticos: una revisión. *Resolución Independiente de Ingeniería Química* 2008, 47, 7982–7992. [Google Scholar] [CrossRef]
114. Rezaei, P.D.; Oh, D.; Hong, Y.; Kim, Y.M.; Jae, J.; Jung, Carolina del Sur; Jeon, J.-K.; Park, Y.-K. Co-pirólisis catalítica in situ de álamo amarillo y polietileno de alta densidad sobre catalizadores mesoporosos. *Conversación de energía. Manag.* 2017, 151, 116–122. [Google Scholar] [CrossRef]
115. Santos, B.P.S.; Almeida, D.; Marques, M.D.F.V.; Henriques, C.A. Materia prima petroquímica a partir de pirólisis de polietileno y polipropileno de desecho utilizando diferentes catalizadores. *Combustible* 2018, 215, 515–521. [Google Scholar] [CrossRef]
116. Constantinescu, M.; Bucura, F.; Ionete, E.I.; Ion-Ebrasu, D.; Sandru, C.; Zaharioiu, A.; Marin, F.; Miricioiu, M.; Niculescu, V.; Oancea, S.; y demás. Del plástico al combustible: nuevos retos. *Importa. Plast.* 2019, 56, 721–729. [Google Scholar] [CrossRef]
117. Aubert, M.; Nicolas, R.C.; Pawelec, W.; Wilén, C.-E.; Michael Roth, M.; Pfaendner, R. Azoalcanes—Retardantes de llama novedosos y su relación estructura—propiedad. *Polím. Abogado Technol.* 2011, 22, 1529–1538. [Google Scholar] [CrossRef]
118. Charitopoulou, M.A.; Stefanidis, S.D.; Lappas, A.A.; Achilias, D.S. Pirólisis catalítica de polímeros con retardantes de llama bromados originados en equipos eléctricos y electrónicos de residuos (WEEE) utilizando diversos catalizadores. *Sostenida. Química y Farmacia.* 2022, 26, 100612. [Google Scholar] [CrossRef] .

119. Beccagutti, B.; Cafiero, L.; Pietrantonio, M.; Pucciarmati, S.; Tuffi, R.; Vecchio Cipriotti, S. Caracterización de algunos plásticos reales mezclados de WEEE: Un enfoque en la determinación de cloro y bromo mediante diferentes métodos analíticos. *Sostenibilidad* 2016, 8, 1107. [Google Scholar] [CrossRef]

Datos económicos:

1. Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment for Pyrolysis of Mixed Waste Plastics
2. Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste.