

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Comparación de catalizadores en pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) para la obtención de combustible líquido

Trabajo de graduación presentado por Mónica Haideé Morales Rojas en modalidad de tesis para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Comparación de catalizadores en pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) para la obtención de combustible líquido

Trabajo de graduación presentado por Mónica Haideé Morales Rojas en modalidad de tesis para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

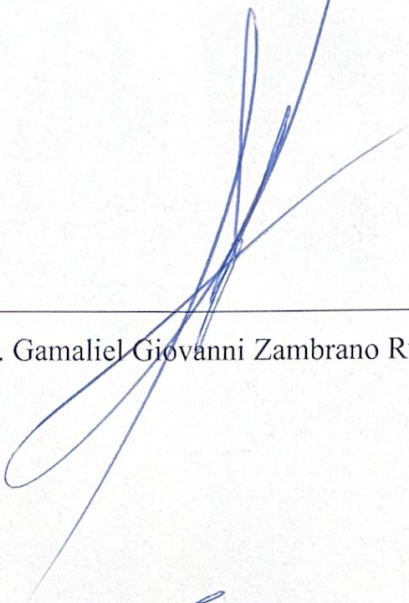
Guatemala

2025

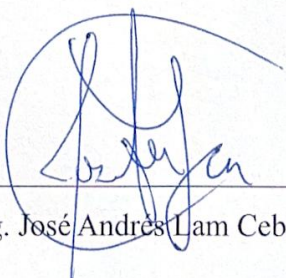
Vo. Bo

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González

Terna examinadora

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González

(f) 
Ing. José Andrés Lam Ceballos

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2025

PREFACIO

El presente trabajo de graduación surgió de la necesidad de encontrar soluciones eficientes y sostenibles para el manejo de residuos plásticos, en particular el polietileno de alta densidad (HDPE), cuyo impacto ambiental ha generado preocupación global. La pirólisis catalítica se ha propuesto como una alternativa viable para la conversión de estos residuos en productos de valor agregado, como combustibles líquidos. En este contexto, la comparación del rendimiento de diferentes catalizadores, como la zeolita ZSM-5 y el óxido de zinc, permite evaluar su efecto en el proceso y contribuir al desarrollo de tecnologías más sostenibles en el aprovechamiento de plásticos posconsumo.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, en especial a mi mamá, Leonor Rojas García, por su constante apoyo durante toda mi carrera universitaria, su ayuda incondicional, palabras de aliento y confianza en mí me permitieron superar cada desafío en este camino. A mis hermanos, Laura Fernanda y Juan David, ya que han estado presentes apoyándome en todo momento. A mis amigos y compañeros, gracias por estar siempre presentes y por motivarme a dar lo mejor de mí en cada etapa de este proyecto.

Por otra parte, extiendo mi gratitud a la Universidad del Valle de Guatemala, mi casa de estudios, por las enseñanzas adquiridas a lo largo de mi formación y por brindarme el espacio para crecer académica y profesionalmente. Agradezco especialmente a mi asesor de trabajo de graduación, el Ing. Luis Núñez, quien ha estado guiándome, brindándome consejo y apoyo a lo largo de toda mi investigación; también por acompañarme en cada paso del proceso, orientarme en todo momento y motivarme a seguir adelante hasta alcanzar los objetivos propuestos. Agradezco a mi director de carrera, Ing. Gamaliel Zambrano, por todo su apoyo y enseñanzas que me han permitido formarme de la mejor manera académicamente y profesionalmente durante estos últimos 5 años.

Además, quiero agradecer al Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC), de la empresa Cementos Progreso, por su valioso apoyo en la realización de los análisis termogravimétricos de mis muestras, cuya contribución fue fundamental para el desarrollo de esta investigación. También quiero agradecer a la Lic. Ana Luisa Mendizábal, por la ayuda brindada en los análisis de laboratorio correspondientes.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	JUSTIFICACIÓN.....	2
III.	OBJETIVOS.....	3
A.	Objetivo general	3
B.	Objetivos específicos.....	3
IV.	MARCO TEÓRICO	4
A.	Materiales plásticos	4
1.	Polímeros	4
2.	Plásticos.....	4
3.	Tipos de plásticos	5
4.	Polietileno.....	5
B.	Procesos de tratamiento del plástico.....	7
1.	Degradación.....	7
2.	Pirólisis	8
3.	Pirólisis catalítica.....	9
4.	Craqueo.....	9
C.	Productos de pirólisis	10
1.	Combustible.....	10
2.	Productos obtenidos de pirólisis.....	10
D.	Catalizadores	11
1.	Catalizadores de pirólisis.....	12
2.	Zeolitas	12
3.	Tasa de conversión.....	13
E.	Tipos de reactores	14
1.	Reactores de pirólisis.....	14
F.	Análisis fisicoquímicos	15
1.	Análisis termogravimétrico (TGA)	15
2.	Densidad	16
3.	Poder calorífico.....	16
4.	Cromatografía de gases masa (CG-MS).....	17

G.	Operaciones unitarias en proceso de pirólisis	19
1.	Molienda.....	19
2.	Secado.....	19
3.	Extrusión.....	20
4.	Reacción	20
5.	Condensación	21
6.	Tamizaje.....	21
7.	Tanques de almacenamiento	22
8.	Acero 304	22
H.	Cinética de pirólisis	22
1.	Modelo cinético de pirólisis	22
2.	Energía de activación.....	23
3.	Balance de masa	23
4.	Balance de energía.....	24
5.	Diagrama de flujo	24
V.	ANTECEDENTES	26
A.	Polietileno de alta densidad	26
B.	Pirólisis de polietileno de alta densidad	27
C.	Pirólisis en Guatemala	27
D.	Pirólisis catalítica.....	28
VI.	METODOLOGÍA.....	30
A.	Cálculo de tamaño de muestra.....	30
B.	Análisis termogravimétrico	30
1.	Procedimiento.....	30
C.	Corridas de pirólisis.....	31
1.	Procedimiento.....	32
D.	Densidad	34
1.	Procedimiento.....	34
E.	Poder calorífico.....	34
1.	Procedimiento.....	35
F.	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS).....	35
1.	Procedimiento.....	36

VII.	RESULTADOS	37
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
IX.	CONCLUSIONES	62
X.	RECOMENDACIONES	63
XI.	BIBLIOGRAFÍA	64
XII.	ANEXOS	70
A.	Datos originales	70
B.	Datos calculados	95
C.	Balances de masa y energía	130
D.	Ecuaciones	133
E.	Cálculos de muestra.....	137
F.	Análisis de error	147
G.	Figuras e imágenes de experimentación	151
H.	Glosario	165

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Temperaturas de degradación de las muestras de HDPE y de HDPE con 10 % (m/m) de óxido de zinc y zeolitas ZSM-5	38
Cuadro 2. Rendimientos de los productos obtenidos en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y zeolitas ZSM-5	39
Cuadro 3. Resultados cinéticos de los modelos parametrizados de las curvas de pirólisis.	41
Cuadro 4. Resultados de densidades del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y zeolitas ZSM-5	44
Cuadro 5. Resultados de poder calorífico del combustible líquido obtenido de la pirólisis de HDPE.....	44
Cuadro 6. Operaciones unitarias para el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad catalizada con óxido de zinc y Zeolitas ZSM-5	46
Cuadro 7. Datos originales de corrida 1 de pirólisis de HDPE	79
Cuadro 8. Datos originales de corrida 2 de pirólisis de HDPE	80
Cuadro 9. Datos originales de corrida 3 de pirólisis de HDPE	82
Cuadro 10. Datos originales de corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO	83
Cuadro 11. Datos originales de corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO	85
Cuadro 12. Datos originales de corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO	86
Cuadro 13. Datos originales de corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	88
Cuadro 14. Datos originales de corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	89
Cuadro 15. Datos originales de corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	91
Cuadro 16. Masa de los productos líquidos obtenidos de la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5 para cálculo de densidad	93
Cuadro 17. Poderes caloríficos de la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5.....	93
Cuadro 18. Resultados de poder calorífico de producto sólido de pirólisis de HDPE.....	94

Cuadro 19. Análisis estadístico de las temperaturas de degradación de las muestras de HDPE y de HDPE con 10 % (m/m) de óxido de zinc y zeolitas ZSM-5	95
Cuadro 20. Resultados de los productos obtenidos en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5	95
Cuadro 21. Rendimientos obtenidos en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5.....	96
Cuadro 22. Análisis estadístico de los rendimientos del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE	97
Cuadro 23. Análisis de varianza entre los rendimientos de producto líquido	97
Cuadro 24. Resultados promedio de rendimientos del producto sólido y gaseoso obtenido en la pirólisis de HDPE	98
Cuadro 25. Resultados cinéticos de los modelos parametrizados de la curvas de pirólisis	98
Cuadro 26. Parámetros de los modelos cinéticos obtenidos de la pirólisis de HDPE.....	99
Cuadro 27. Parámetros de los modelos cinéticos obtenidos de la pirólisis de HDPE catalizado con ZnO al 10 % (m/m).....	100
Cuadro 28. Parámetros de los modelos cinéticos obtenidos de la pirólisis de HDPE catalizado con zeolitas ZSM-5 al 10 % (m/m)	101
Cuadro 29. Densidades del producto líquido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5.....	102
Cuadro 30. Análisis estadístico de las densidades del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5	102
Cuadro 31. Análisis estadístico de los poderes caloríficos del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5.....	103
Cuadro 32. Análisis estadístico de poder calorífico de producto sólido de pirólisis de HDPE	103
Cuadro 33. Compuestos presentes en la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE	104
Cuadro 34. Compuestos presentes en la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE	107
Cuadro 35. Compuestos presentes en la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE	110

Cuadro 36. Compuestos presentes en la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO	113
Cuadro 37. Compuestos presentes en la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO	116
Cuadro 38. Compuestos presentes en la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO	119
Cuadro 39. Compuestos presentes en la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	122
Cuadro 40. Compuestos presentes en la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	124
Cuadro 41. Compuestos presentes en la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	126
Cuadro 42. Datos de placa de mufla	162
Cuadro 43. Datos de placa de calorímetro IKA C200	163
Cuadro 44. Datos de placa de balanza.....	163
Cuadro 45. Datos de placa de balanza semi analítica	164

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Polímeros y sus usos comunes	4
Figura 2. Estructura molecular del HDPE	6
Figura 3. Esquema del proceso de pirólisis	9
Figura 4. Estructura de zeolita ZSM-5	13
Figura 5. Diagrama de análisis termogravimétrico	16
Figura 6. Diagrama de cromatografía de gases masa (GC-MS).....	18
Figura 7. Esquema de extrusión	20
Figura 8. Esquema de balance de masa	24
Figura 9. Sistema de pirólisis armado a escala laboratorio	32
Figura 10. Análisis termogravimétrico de una muestra de polietileno de alta densidad (HDPE)	37
Figura 11. Análisis termogravimétrico de muestra de polietileno de alta densidad (HDPE) y óxido de zinc (10 % m/m)	37
Figura 12. Análisis termogravimétrico de muestra de polietileno de alta densidad (HDPE) y zeolitas ZSM-5 (10 % m/m)	38
Figura 13. Curva de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE)	39
Figura 14. Curva de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con óxido de zinc (10 % m/m)	40
Figura 15. Curva de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con zeolitas ZSM-5 (10 % m/m)	40
Figura 16. Curvas de la cinética obtenida para los datos de pirólisis de HDPE	41
Figura 17. Curvas de la cinética obtenida para los datos de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO al 10 % (m/m).....	42
Figura 18. Curvas de la cinética obtenida para los datos de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5 al 10 % (m/m)	43
Figura 19. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y zeolitas ZSM-5	45
Figura 20. Esquema de propuesta de operaciones unitarias para pirólisis de HDPE	47

Figura 21. Esquema de propuesta de operaciones unitarias para pirólisis de HDPE catalizada	48
Figura 22. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE	49
Figura 23. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO	50
Figura 24. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	51
Figura 25. Análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE)	70
Figura 26. Análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE)	71
Figura 27. Análisis termogravimétrico de la muestra 3 de polietileno de alta densidad (HDPE)	72
Figura 28. Análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE) y óxido de zinc	73
Figura 29. Análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE) y óxido de zinc	74
Figura 30. Análisis termogravimétrico de la muestra 3 de polietileno de alta densidad (HDPE) y óxido de zinc	75
Figura 31. Análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE) y zeolitas ZSM-5	76
Figura 32. Análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE) y zeolitas ZSM-5	77
Figura 33. Análisis termogravimétrico de la muestra 3 de polietileno de alta densidad (HDPE) y zeolitas ZSM-5	78
Figura 34. Cromatograma de la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE	104
Figura 35. Cromatograma de la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE	106
Figura 36. Cromatograma de la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE	109

Figura 37. Cromatograma de la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO.....	112
Figura 38. Cromatograma de la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO.....	115
Figura 39. Cromatograma de la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO.....	118
Figura 40. Cromatograma de la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	121
Figura 41. Cromatograma de la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	123
Figura 42. Cromatograma de la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	125
Figura 43. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE	127
Figura 44. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE catalizada con óxido de zinc.....	128
Figura 45. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5	129
Figura 46. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE)	130
Figura 47. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con ZnO	131
Figura 48. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con zeolitas ZSM-5.....	132
Figura 49. Código de la cinética promedio de los datos de pirólisis de HDPE utilizando el software Berkeley Madonna.....	139
Figura 50. Código de la cinética promedio de los datos de pirólisis de HDPE con ZnO al 10 % (m/m) utilizando el software Berkeley Madonna.....	141
Figura 51. Código de la cinética promedio de los datos de pirólisis de HDPE con ZSM-5 al 10 % (m/m) utilizando el software Berkeley Madonna.....	143
Figura 52. Certificado de análisis de reactivo óxido de zinc (1)	151

Figura 53. Certificado de análisis de reactivo óxido de zinc (2).....	152
Figura 54. Certificado de análisis de reactivo óxido de zinc (3).....	153
Figura 55. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (1).....	154
Figura 56. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (2).....	155
Figura 57. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (3).....	156
Figura 58. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (4).....	157
Figura 59. Muestras de botes de HDPE a emplear para la experimentación	158
Figura 60. Muestra de HDPE cortado a emplear para la experimentación	158
Figura 61. Muestra de char obtenido de pirólisis	159
Figura 62. Sistema de pirólisis	159
Figura 63. Producto líquido obtenido de pirólisis de HDPE	160
Figura 64. Producto líquido obtenido de pirólisis de HDPE con ZnO al 10 % m/m	160
Figura 65. Producto líquido obtenido de pirólisis de HDPE con zeolitas ZSM- 5 al 10 % m/m.....	161
Figura 66. Determinación de densidad de producto líquido de pirólisis.....	161
Figura 67. Determinación del poder calorífico en calorímetro IKA C200.....	162

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Tamaño de muestra para población infinita	133
Ecuación 2. Masa de producto líquido obtenido	133
Ecuación 3. Balance de masa del proceso de pirólisis.....	133
Ecuación 4. Rendimiento de los productos obtenidos	134
Ecuación 5. Cálculo de densidad	134
Ecuación 6. Cálculo de calor a partir de potencia	134
Ecuación 7. Cálculo de potencia a partir de entalpías	135
Ecuación 8. Modelo de la ecuación de Boltzmann para hornos mufla (empleando rampas de calentamiento)	135
Ecuación 9. Constante de descomposición de Arrhenius	136
Ecuación 10. Velocidad de reacción de pirólisis	136

RESUMEN

Este trabajo comprende los resultados, análisis y propuesta de operaciones unitarias para el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE), comparando los catalizadores óxido de zinc y zeolitas ZSM-5 para la obtención de combustible líquido. Para esto se inició determinando los intervalos de temperatura de degradación de la muestra de HDPE empleada por medio de análisis termogravimétricos (TGA), con los cuales se determinó una temperatura inicial del proceso de pirólisis del polímero sin catalizador de 390 °C, al igual que para las corridas con catalizador ZnO al 10 % m/m, mientras que empleando zeolitas ZSM-5 al 10 % m/m de 330 °C. Al llevar a cabo la pirólisis, cada experimento en triplicado, para un total de 9 corridas, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, se obtuvo el mayor rendimiento de producto líquido en los procesos de pirólisis catalizada con óxido de zinc (ZnO), alcanzando un 84.37 ± 0.34 % m/m, seguido por la pirólisis sin catalizador con 79.13 ± 0.61 % m/m, mientras que la catalizada con zeolita ZSM-5 de 76.30 ± 1.05 % m/m. Evidenciándose que existe diferencia estadísticamente significativa entre dichos resultados al realizar un análisis de varianza de los rendimientos de producto líquido (empleando un α de 0.05). Los combustibles líquidos obtenidos del proceso de pirólisis catalítica se encontraron cerca del intervalo de densidad de la gasolina comercial según la norma ASTM D4814 de entre 720 – 770 kg/m³. Al evaluar el poder calorífico de dicho producto se determinó que todos los ensayos obtuvieron valores superiores al intervalo establecido en la norma de entre 44,000 y 46,000 J/g, siendo el más elevado de 46790.67 ± 1.73 J/g para la muestra sin catalizador. Por medio de las cromatografías de gases masa (GC-MS), se compararon las distribuciones de compuestos según el número de carbonos y la mayor área bajo la curva de los picos, encontrándose en mayor proporción los compuestos C19 y C20 para la muestra sin catalizador, con ZnO se obtuvo una mayor área en la fracción C16 y C19, mientras que con Zeolitas ZSM-5 se detectaron en su mayoría hidrocarburos de menor peso molecular (C14–C16). Por último, se propusieron las operaciones unitarias necesarias para el proceso de pirólisis sin catalizador, que incluyen una unidad inicial de molienda, transporte de sólido, secado, reacción, condensación, transporte y almacenamiento de productos líquidos y gaseosos. Los procesos con catalizador incluyen además un proceso de mezclado/extrusión previo a la reacción y uno de tamizaje para separar el producto sólido del catalizador.

I. INTRODUCCIÓN

La acumulación de residuos plásticos, especialmente el polietileno de alta densidad (HDPE), constituye una problemática ambiental significativa debido a su baja biodegradabilidad. Estos materiales, al no descomponerse fácilmente, contaminan ecosistemas y contribuyen al calentamiento global (Guachamín & Castro, 2023). La gestión inadecuada de estos desechos afecta tanto a la vida silvestre como a la salud humana (Díaz, 2020). Se estima que al año en Guatemala se producen alrededor de 380,000 toneladas de desechos plásticos (estimándose unas 70,000 toneladas de HDPE) (Rodríguez, 2023).

Paralelamente, la dependencia mundial de combustibles fósiles plantea desafíos relacionados con su disponibilidad y el impacto ambiental de su extracción y uso. La búsqueda de fuentes alternativas de energía se ha intensificado, enfocándose en soluciones sostenibles que mitiguen estos problemas (Ramos & Pretell, 2021). En este contexto, la pirólisis emerge como una tecnología prometedora. Este proceso térmico descompone materiales en ausencia de oxígeno, transformando polímeros como el HDPE en hidrocarburos más simples. La pirólisis del HDPE puede producir combustibles líquidos con características similares a los convencionales, ofreciendo una doble ventaja: la reducción de residuos plásticos y la generación de energía (Ramos & Pretell, 2021).

Diversos estudios han explorado las variables que influyen en la eficiencia de la pirólisis del HDPE. Factores como la temperatura de operación, el tamaño de partícula y el tipo de reactor son determinantes en el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos (ya que dicho proceso se lleva a cabo empleando un reactor con alta demanda energética y un condensador). Por ejemplo, temperaturas alrededor de 550 °C y tamaños de partícula entre 4 y 6 mm han mostrado rendimientos líquidos del 88 % m/m (Ramos & Pretell, 2021). La selección de catalizadores para el proceso de pirólisis es importante, al permitir realizar el proceso a temperaturas más bajas, al disminuir la energía de activación. Lo cual representa un ahorro desde el punto de vista energético, ya que, por ser un proceso de rompimiento de cadenas de un polímero, requiere un aumento lento de temperatura cada cierto tiempo (en forma de gradas o rampas) (Guachamín & Castro, 2023).

II. JUSTIFICACIÓN

La demanda de plástico mundial está en aumento, debido a que poseen diversas aplicaciones, ya sea industriales o domésticas, al contar con propiedades como durabilidad, bajo costo, resistencia mecánica y por ser termoestables. Se estima que, de la totalidad de plásticos generados en el mundo, entre el 17 y 18 % corresponden a polietileno de alta densidad (HDPE) (PlasticsEurope, 2023). El tratamiento de este material conlleva un gran reto, ya que su proceso de degradación toma un largo período de tiempo en condiciones estables, y son muy resistentes químicamente. Lamentablemente, de los residuos de este polímero no hay información, pero se asume que sigue la misma tendencia mundial que se describe con respecto a la producción mencionada (alrededor de 70 millones de toneladas anuales).

Se han estudiado métodos para el tratamiento de estos desechos, destacando así, su aprovechamiento en la producción de energía. El proceso de pirólisis es un claro ejemplo de cómo se puede transformar residuos, para su conversión en combustibles, como hidrocarburos, de tipo sólido, líquido y gaseoso. Al emplear altas temperaturas, se espera la degradación de los polímeros de gran longitud presentes en los plásticos, dando lugar a cadenas cortas (Lopez, 2023). Según Zachrisson (2024), al llevar a cabo la pirólisis de HDPE se obtienen rendimientos de entre el 83 y 94 % de combustible líquido, demostrando que esta puede ser una solución al problema.

A pesar de que se han estudiado los procesos de pirólisis de HDPE en Guatemala, no hay aun información sobre el impacto que la adición de catalizadores puede tener en ese proceso, por lo que se desconoce de información que pueda usarse para concluir si el uso del catalizador se recomienda o no. Tomando en cuenta esto, el presente trabajo presenta una comparación del uso de la zeolitas ZSM-5 y óxido de zinc como catalizadores seleccionados en la pirólisis de HDPE con el proceso sin catalizador, a escala laboratorio. Empleando un análisis termogravimétrico, un reactor de escala laboratorio y cromatografía de gases masa (GC-MS) para cuantificar los productos. Esto pretende en un futuro dar paso a la evaluación de la utilidad desde el punto de vista económico-energético del uso de catalizadores en pirólisis de HDPE.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Comparar el rendimiento del producto líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad empleando como catalizadores óxido de zinc y zeolitas ZSM-5.

B. Objetivos específicos

- Hacer análisis termogravimétricos de muestras de polietileno de alta densidad para determinar la temperatura de degradación en el proceso de pirólisis.
- Llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a escala laboratorio utilizando óxido de zinc y zeolitas ZSM-5 como catalizadores, obteniendo datos de temperatura, tiempo y masa de productos para calcular los rendimientos del combustible líquido.
- Determinar el poder calorífico y las principales características fisicoquímicas del producto líquido obtenido, para comparar su potencial energético con combustibles comerciales.
- Proponer las operaciones unitarias para el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad sin catalizador y catalizado con óxido de zinc y zeolitas ZSM-5.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Materiales plásticos

1. Polímeros

Son macromoléculas o moléculas conformadas por muchas unidades repetidas de monómeros, de peso molecular alto. Pueden ser de origen natural y ser provenientes de plantas, animales o minerales (como la lana y el asbesto), pero también pueden crearse a partir de petroquímicos. Se clasifican en base a su tamaño de molécula o según su estructura química. Se suele llamar polímeros lineales a los que poseen pocas o nula cantidad de ramificaciones. Su composición química puede indicar a qué grupos químicos tiene presentes, o bien la manera en que fueron sintetizados. El estado físico de los polímeros usualmente es cristalino o desordenados por completo, al encontrarse en este último estado, se cuenta con material muy frágil, y al encontrarse cristalino tiende a tener más resistencia (Beltrán & Gomis, 2012).

Figura 1. Polímeros y sus usos comunes

Tipo de Polímero	Usos comunes
PET Tereftalato de Polietileno	Envases para alimentos como: aderezos, mermeladas, jaleas, refrescos, agua, etc.
HDPE Polietileno de alta densidad	Algunas bolsas de supermercado, bolsas para congelar, envases de leche, helado, jugos, champú, detergentes, químicos, cubetas, etc.
PVC Policloruro de vinilo	Envases para plomería, tuberías, mangueras, suelas para zapatos, cables, correos para reloj, etc.
LDPE Polietileno de baja densidad	Película de empaque, bolsas de basura, envases para laboratorio, etc.
PP Polipropileno	Bolsas para frituras, equipos de jardinería, cajas para alimentos, cintas para empaçar, envases para uso veterinario, etc.
PS Poliestireno	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, etc.

Fuente: (Seymour & Chrarles, 2021)

2. Plásticos

Son materiales sintéticos derivados principalmente del petróleo, compuestos por polímeros que se forman mediante la unión repetida de monómeros. Debido a su versatilidad, resistencia y bajo costo de producción, se utilizan ampliamente en sectores como el embalaje, la construcción, la industria automotriz y la electrónica. La estructura de los plásticos se puede modificar mediante aditivos para obtener propiedades específicas, lo que permite la creación de materiales con diversas características físicas y químicas. A pesar de sus beneficios, los plásticos también plantean importantes desafíos

ambientales debido a su persistencia en el ambiente, ya que pueden tardar siglos en degradarse (Thompson et al., 2009).

El impacto ambiental de los plásticos es una de las principales preocupaciones actuales, especialmente en lo que respecta a la contaminación marina y terrestre. Las partículas de plástico, al fragmentarse, se convierten en micro plásticos que son ingeridos por la fauna y entran en las cadenas alimentarias, con posibles efectos negativos en la salud humana y ecosistémica. Las investigaciones recientes se enfocan en el desarrollo de plásticos biodegradables y en la mejora de técnicas de reciclaje para reducir la acumulación de residuos plásticos (Geyer et al., 2017). Estos esfuerzos representan un avance hacia una economía circular en la que los materiales plásticos se mantengan en uso por más tiempo y su impacto ambiental se minimice.

3. Tipos de plásticos

Los residuos plásticos se dividen en dos categorías, los macro y micro plásticos. Los macro plásticos tienen una longitud mayor a 5mm y constituyen los fragmentos grandes de desechos plásticos, como restos de bolsas, redes de pesca, botellas, tapitas de botellas, etc. El micro plástico tiene, por definición, menos de 5mm de longitud, aunque puede estar en el orden de los micrómetros (milésima parte de un milímetro) y nanómetros (millonésima parte de un milímetro), y se forma a medida que los grandes fragmentos se desintegran por la acción mecánica de los vientos, el agua, los rayos UV, etc (Buteler, 2019).

4. Polietileno

Es un tipo de polímero derivado y compuesto de cadenas repetitivas de etileno, pertenece a la familia de los termoplásticos. Su molécula está compuesta por átomos de carbono e hidrógeno, cuyo comportamiento químico es similar al de las parafinas (Cardona et al., 2010). Cuenta con características de gran importancia como su lubricidad, resistencia al impacto y abrasión, y por ser químicamente inerte. Este material se sintetiza mediante la polimerización del etileno en presencia de un catalizador, formando cadenas de hidrocarburos largas y repetitivas que otorgan resistencia y flexibilidad. Existen diferentes tipos de polietileno, como el de alta densidad (HDPE) y el de baja densidad (LDPE), que varían en sus propiedades físicas y estructurales debido a diferencias en su grado de ramificación y organización molecular (Crawford & Throne, 2002).

Además, es un material reciclable que puede ser reprocesado en varias ocasiones sin perder sus propiedades esenciales, lo que impulsa su uso en prácticas de economía circular y en proyectos de sostenibilidad. A pesar de estos beneficios, el polietileno también plantea desafíos ambientales, ya que su descomposición en la naturaleza es lenta, generando preocupaciones por la acumulación de residuos plásticos en los ecosistemas (Andrady & Neal, 2009).

a. Polietileno de baja densidad

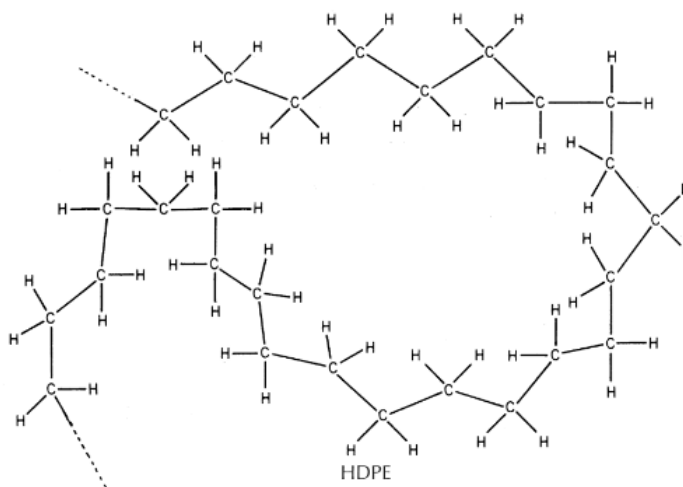
También conocido como LDPE, es un polímero ramificado, con cadenas de polietileno en forma compacta. Este se produce por medio de una polimerización vía radicales libres y a alta presión. Tiene un aspecto sólido ligeramente flexible (que depende de su grosor), además es ligero y buen aislante eléctrico. Posee una alta resistencia mecánica y química, su precio es bajo, lo cual lo hace de gran utilidad para emplearse como papel envolvente, bolsas plásticas, envases y para cubrir cables eléctricos. Se suele utilizar para la fabricación del polietileno reticulado (que es más rígido, termoestable y resistente a la tracción) aplicándose para aislar líneas eléctricas de baja y media tensión (Perdomo, 2002).

b. Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad (HDPE) es un polímero conformado por unidades repetidas de etileno. Se le llama de alta densidad debido a que es un polímero con una estructura lineal y con muy baja cantidad de ramificaciones, a diferencia del LDPE. La alta densidad que presenta es la razón por la que son de gran resistencia y dureza, y además también es termoplástico, ya que tiene una gran tolerancia a las altas temperaturas. Pero también es menos resistente al agrietamiento e impacto que el LDPE (Rowe & Sangam, 2002).

En la actualidad se utiliza mucho para la elaboración de envases plásticos desechables y para demás aplicaciones como juguetes, cascos y botellas. El HDPE se obtiene por medio de una reacción de adición, al sumar distintas unidades de etileno y sus moléculas apenas presentan ramificaciones (Perdomo, 2002).

Figura 2. Estructura molecular del HDPE



Fuente: (Seymour & Chrarles, 2021)

B. Procesos de tratamiento del plástico

1. Degradación

Es un proceso en el que se descomponen moléculas de gran longitud en otras más pequeñas, debido a la acción del calor, humedad, exposición al sol (rayos ultravioletas) o acelerado por manipulación del material al darle un uso frecuente (Buteler, 2019). La interacción de un material con su entorno se puede dar en cuatro diferentes formas (mecánica, química, biológica y electroquímica). En el caso de los polímeros la degradación los afecta de forma física, química o mecánica, limitando sus propiedades. Dependiendo de la resistencia de los enlaces químicos, se puede llegar a un punto en que sucedan cambios irreversibles, al limitar la energía vibracional que las moléculas pueden tener antes de romperse (Bustamante, 1994).

a. Reciclaje primario

También se conoce como reciclaje “in situ”, de ciclo cerrado o reprocesamiento. Este tipo de reciclaje se da al introducir nuevamente los residuos, recortes y trozos de origen postindustrial que se dan en la producción. Permite el aprovechamiento de residuos limpios, no usados y bien identificados, para su utilizados conjunta con la materia prima y sin afectar las propiedades del producto final (Campos, 2017).

b. Reciclaje secundario

Es el tipo de reciclaje mecánico que agrupa todos los procesos físicos de reciclaje, entre las variaciones que hay son: corte o molienda, limpieza, extrusión, enfriamiento y almacenaje. Se lleva a cabo a partir de residuos postindustriales que, con tratamientos térmicos se transforman en pellets que se vuelven a utilizar. La diferencia entre el primario y el secundario es que en estos casos no se tiene total certeza de la composición de los materiales, no se cuenta con limpieza en los mismos y usualmente se deben separar de otros polímeros (Campos, 2017). Este reciclaje se recomienda cuando el material se encuentra relativamente “libre de contaminantes”. Ya que dan lugar a nuevos objetivos de plástico reciclado como bolsas, tuberías, estructuras, bancos, entre otros.

c. Reciclaje terciario

El reciclaje terciario también se conoce como químico, ya que, a diferencia de los procesos físicos, involucra cambios en la estructura, dando lugar a nuevas moléculas que pueden ser similares o diferentes a los monómeros que les precedían. Estos compuestos se suelen utilizar como materia prima para la industria química, farmacéutica, de pinturas, solventes o de otro tipo como los combustibles. Las aplicaciones puntuales de este reciclaje son la pirólisis, gasificación (o despolimerización), entre otras (Campos, 2017).

d. Reciclaje cuaternario

Recupera directamente la capacidad calorífica de los polímeros, al liberar energía cuando se combustionan (al reaccionar con el oxígeno). Este calor generado se puede utilizar para calentar algún fluido de trabajo o para generar electricidad. En este reciclaje se generan gases como el dióxido de carbono, que contribuye con el calentamiento global, por lo que se necesitan instalaciones que controlen las emisiones que se generan (Campos, 2017).

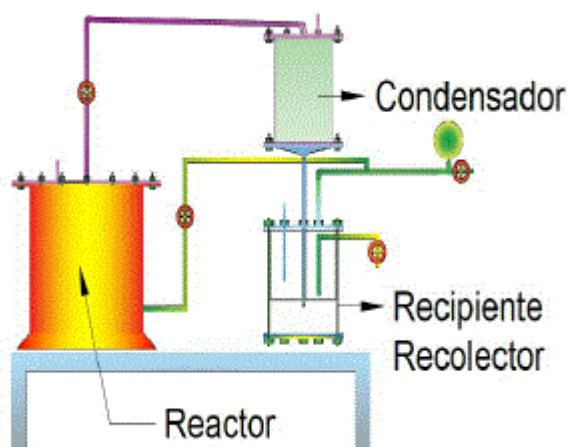
2. Pirólisis

Es un proceso termoquímico que rompe moléculas de gran longitud en hidrocarburos de cadenas cortas, se lleva a cabo a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno (Campos, 2017). La pirólisis de los polímeros consiste en dos procesos competitivos, los cuales son las reacciones de escisión y las de condensación. Las de escisión forman fragmentos de bajo peso molecular y gases (con temperaturas menores a 500 °C), mientras que las de condensación dan como resultado la formación de polímeros de carbono (sucediendo a temperaturas entre 600 y 1000 °C) (Bustamante, 1994). El proceso tiene tres etapas las cuales son: dosificación y alimentación, transformación de la masa, y por último la separación de los productos (coque, bioaceite y gas). Los parámetros variables en el proceso son las temperaturas máximas para alcanzar, las condiciones de la atmósfera de reacción, las rampas de temperatura, y el tiempo de permanencia de los productos en el reactor (Klug, 2012).

Operativamente la pirólisis se puede clasificar en tres grandes bloques: la convencional, instantánea y la rápida. En la pirólisis convencional (o lenta), la materia prima se calienta gradualmente a temperaturas entre 400 y 600 °C, lo que produce principalmente sólidos carbonosos como el biochar, debido al largo tiempo de residencia. Este tipo se usa frecuentemente para aplicaciones agrícolas y de mejora del suelo, ya que maximiza la producción de carbono sólido (Castells, 2005).

Por otra parte, la pirólisis rápida utiliza un rápido aumento de temperatura y un tiempo de residencia corto, a menudo bajo condiciones entre 450 y 550 °C. Esto permite la obtención de mayores cantidades de aceites de pirólisis, líquidos ricos en hidrocarburos que se emplean como combustibles o en la producción de químicos. Y en el caso de la pirólisis instantánea, con tiempos de residencia extremadamente cortos y altas temperaturas, favorece la generación de productos gaseosos y minimiza los residuos sólidos. Este tipo de pirólisis es clave en aplicaciones de valorización energética, donde se busca maximizar la conversión de residuos en gases combustibles (Castells, 2005).

Figura 3. Esquema del proceso de pirólisis



Fuente: (Rejas et al., 2015)

3. Pirólisis catalítica

Consiste en promover la degradación de los plásticos al utilizar un catalizador (normalmente sólido con propiedades ácidas). Este tipo de pirólisis brinda una serie de ventajas en el proceso entre las cuales son: emplear bajas temperaturas, reducir el tiempo de reacción, también presenta aumento en el rendimiento de los productos con mayor valor agregado como los combustibles líquidos. Además, aumenta la selectividad del proceso y hay inhibición de productos no deseados (Campos, 2017).

En la pirólisis catalítica, al emplear temperaturas menores que en la pirólisis tradicional, se tiene un ahorro en energía significativo (volviéndose atractivo económicamente). Los combustibles resultantes son similares a los obtenidos en la refinación de petróleos crudos y tienen un valor de mercado muy importante (Gutiérrez, 2015).

4. Craqueo

El craqueo es un proceso químico mediante el cual se descomponen moléculas grandes de hidrocarburos en compuestos más simples, aprovechando calor, presión o el uso de catalizadores. En su forma más antigua, el “craqueo térmico,” se aplican altas temperaturas y presión para romper las largas cadenas de hidrocarburos, una técnica que permite obtener productos más ligeros y útiles, como la gasolina y el diésel. Este proceso fue innovador en sus inicios, pero presenta limitaciones en el control de los productos obtenidos y en la calidad de estos (Klug, 2012).

Posteriormente, se desarrolló el craqueo catalítico, un método que utiliza un catalizador que acelera y orienta la reacción sin consumirse. Este catalizador, comúnmente una especie de arcilla en diversas presentaciones, como terrones o polvo superfino, facilita la ruptura de moléculas a menores temperaturas y con mayor eficiencia que el craqueo térmico. La adición del catalizador permite producir mayor cantidad de hidrocarburos

ligeros de alta calidad y con mejor control sobre el fraccionamiento de los compuestos, logrando una mayor eficiencia en la producción de combustibles y derivados del petróleo (Klug, 2012).

C. Productos de pirólisis

1. Combustible

Un combustible es cualquier material que, al modificar o transformar su estructura química, libera energía. Este proceso implica un cambio de energía potencial a una forma utilizable, conocida como energía química. Aunque la mayoría de los combustibles pueden oxidarse, se encuentran excepciones que funcionan bajo principios diferentes. Existen varios tipos de combustibles, en el caso de los sólidos, se encuentran materiales como el carbón, la madera y la turba. El carbón, por ejemplo, se emplea en calderas para generar calor, vapor o energía térmica en calefacción. La madera y la turba, tradicionalmente utilizadas en calefacción doméstica e industrial, también han sido combustibles de elección en la generación de energía, e incluso en antiguas locomotoras (Gutiérrez, 2015).

En cuanto a los combustibles fluidos, se distinguen los líquidos, como el gasóleo, el queroseno y la gasolina, y los gaseosos, como el gas natural y los gases licuados del petróleo (GLP), que incluyen el propano y el butano. Todos estos tipos de combustibles, desde la gasolina hasta el gas natural, encuentran uso principalmente en motores de combustión interna (Gutiérrez, 2015).

2. Productos obtenidos de pirólisis

A partir de la descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, se obtienen productos que se dividen principalmente en tres categorías: gases, líquidos y sólidos carbonosos. La composición y cantidad de estos dependen de la materia prima utilizada y de las condiciones de reacción, como la temperatura, el tiempo de residencia y, en algunos casos, la presencia de catalizadores. A temperaturas bajas, suelen formarse principalmente productos sólidos, mientras que temperaturas altas tienden a favorecer la formación de gases (Bridgwater, 2012).

a. Aceite de pirólisis

Esta fracción del producto es condensable, puede permanecer líquida a temperatura ambiente y está compuesta por gran variedad de hidrocarburos. En la mayoría de los casos es una mezcla de olefinas, fenoles y compuestos aromáticos que carecen de átomos de oxígeno como sustitutos, (como el benceno, naftaleno, antraceno, tolueno. Es por esto por lo que se puede emplear para la combustión en motores y en la generación de energía mecánica (Lehmann & Joseph, 2009).

b. Char

Normalmente es el producto conocido como ceniza o coque, que corresponde en su mayoría a compuestos inertes que dependen de la materia prima utilizada. Este

subproducto es principalmente carbono fijo, además de cenizas e impurezas inorgánicas. El char tiene varias aplicaciones: en la agricultura, puede usarse como biochar para mejorar la calidad del suelo, mientras que en la industria se emplea como adsorbente en la purificación de agua o gases. Sus propiedades dependen del tipo de material de partida y las condiciones de pirólisis, como temperatura y tiempo de residencia (Lehmann & Joseph, 2009).

c. Combustible gaseoso

Esta corriente de gas usualmente contiene hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y demás gases, dependiendo de las características del material y condiciones de operación. Son clasificados como gases de síntesis (no condensables), este gas se puede emplear para la generación de energía mecánica y térmica, o como materia prima para la síntesis de otros productos químicos (Amar et al., 2019).

D. Catalizadores

Los catalizadores son sustancias que se emplean en un proceso para aceleran la velocidad de una reacción química sin ser consumidos, lo cual los diferencia de los reactivos. Estos funcionan al reducir la energía de activación necesaria, lo que permite que las reacciones ocurran más rápido y a menores temperaturas. Un catalizador actúa modificando la ruta de reacción, generalmente a través de la formación de complejos intermedios que hacen el proceso más eficiente desde un punto de vista energético, como es común en sistemas industriales y biológicos (Vargas et al., 2013).

Existen dos tipos principales de catalizadores: homogéneos y heterogéneos. Los homogéneos están en la misma fase que los reactivos, como cuando un catalizador líquido se disuelve en la solución de reacción. Los heterogéneos, por otro lado, se encuentran en una fase distinta, como los metales sólidos que catalizan reacciones de gases. Esta diferenciación es clave en aplicaciones industriales, ya que permite la reutilización del catalizador y una separación más sencilla del producto final (Vargas et al., 2013).

Los catalizadores también presentan selectividad, lo que significa que pueden favorecer ciertas reacciones específicas, dejando intactas otras que ocurren simultáneamente en el mismo entorno. Esta propiedad es especialmente importante en la biocatálisis, donde las enzimas (catalizadores biológicos) facilitan reacciones altamente específicas esenciales para la vida, como la digestión y la síntesis de proteínas. Las enzimas actúan en el sitio activo de manera que estabilizan los intermediarios, reduciendo así la energía requerida y dirigiendo la reacción hacia un producto específico (Vargas et al., 2013).

1. Catalizadores de pirólisis

Aumentan la selectividad de ciertos productos valiosos en la industria, y también reducen la temperatura del proceso. Los más utilizados para pirólisis son los de craqueo catalítico (FCC), zeolitas y los hechos a base de sílice-alúmina. Su fuerza ácida y estructuras ordenadas permiten controlar la selectividad hacia los productos ligeros de hidrocarburos. Debido a que los plásticos poseen grandes estructuras moleculares, se dificulta la difusión a través del sistema micro poroso de las zeolitas, por lo que solo los centros activos situados en la superficie externa del catalizador son accesibles a las mismas, limitando la actividad en la reacción (Gutiérrez, 2015).

Se han llevado a cabo estudios también de materiales meso estructurados (tipo MCM-41 o SB-15), que presentan un sistema ordenado de canales meso porosos, consiguiendo altas conversiones y rendimientos a hidrocarburos líquidos. Estos presentan cierta selectividad para la obtención de isoparafinas y olefinas, pero no presentan gran rendimiento para los aromáticos. Además, también cuentan con la desventaja de poseer poca acidez, ya que sus paredes no tienen una estructura cristalina. Por otro lado, las zeolitas, al tener una elevada superficie externa, solventan los problemas en cuanto a la difusión (Gutiérrez, 2015).

2. Zeolitas

Son minerales aluminosilicatos cristalinos con poros abiertos y capacidades de intercambio iónico. En su estructura tridimensional poseen átomos de oxígeno unidos a los lados tetraédricos, y tienen cierta relación de óxido de silicio sobre óxido de aluminio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), la cual se encarga de determinar su reactividad (Campos, 2017).

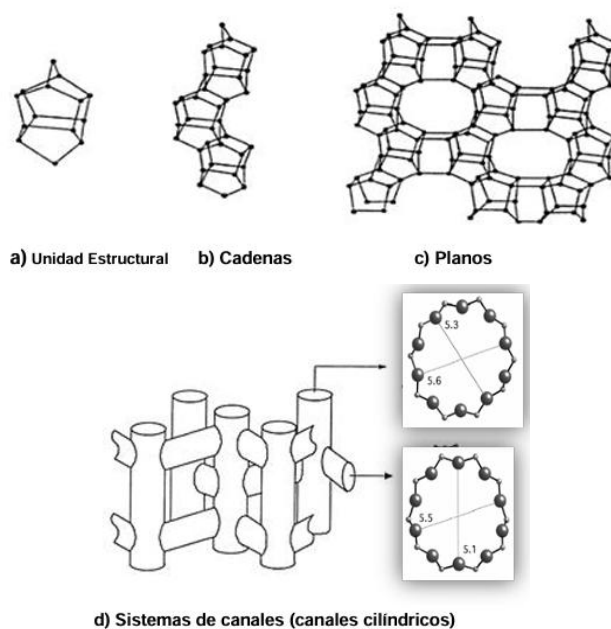
Son los catalizadores más empleados por su elevada acidez y selectividad de forma, se tienen estudios sobre las zeolitas Y, X, ZSM-5 o mordenita que han tenido un gran desempeño en estas aplicaciones. Más recientemente se han investigado otros tipos de zeolitas como las Beta y los galio silicatos, para la obtención de mezclas de hidrocarburos con selectividad a los aromáticos (Gutiérrez, 2015).

a. Zeolitas ZSM-5

Son materiales cristalinos micro porosos compuestos principalmente de óxidos de silicio y aluminio, que presentan una estructura tridimensional de canales y cavidades de tamaño molecular. Esta disposición les confiere una alta área superficial y propiedades catalíticas únicas, lo que las hace muy valiosas en la industria química y petroquímica. En la zeolita ZSM-5, la relación de silicio a aluminio puede ajustarse para modificar su acidez y capacidad catalítica, lo que permite su uso en procesos como el craqueo catalítico, la isomerización y la producción de combustibles y productos químicos de alto valor (Uzcátegui, 2010).

Además, su estructura porosa permite que solo moléculas de cierto tamaño y forma accedan a los sitios activos en su interior, lo que contribuye a la selectividad en las reacciones. Esto convierte a las zeolitas ZSM-5 en catalizadores eficaces para la pirólisis de plásticos y biomasa, mejorando el rendimiento y la calidad de los productos líquidos obtenidos en comparación con otros catalizadores. La versatilidad y eficiencia de la zeolita ZSM-5 en aplicaciones de conversión de hidrocarburos la han posicionado como uno de los catalizadores más importantes en la producción de combustibles y productos petroquímicos (Uzcátegui, 2010).

Figura 4. Estructura de zeolita ZSM-5



Fuente: (Uzcátegui, 2010)

3. Tasa de conversión

La tasa de conversión en el contexto de reacciones químicas se refiere a la fracción o porcentaje de reactivos que se transforman en productos en un determinado período de tiempo. Esta medida es fundamental en el análisis de la eficiencia y el rendimiento de un proceso químico, especialmente en reacciones catalíticas o de pirólisis, ya que permite evaluar cuánta cantidad del reactivo inicial se convierte en el producto deseado bajo condiciones específicas. Factores como la temperatura, presión y la presencia de catalizadores pueden influir en la tasa de conversión, optimizando el proceso para maximizar la producción y reducir los residuos no deseados (Fogler, 2016).

E. Tipos de reactores

1. Reactores de pirólisis

Los reactores en este tipo de procesos pueden operar en distintos rangos de temperatura y se encuentran en diversas configuraciones, como reactores de lecho fijo, de lecho fluidizado, y reactores tubulares, cada uno adaptado a diferentes tipos de materia prima y a los productos deseados. Los reactores de pirólisis son fundamentales en el aprovechamiento de residuos plásticos y biomasa, facilitando la transformación de estos en combustibles líquidos y otros productos de valor añadido mediante el uso de calor y, en ocasiones, catalizadores que optimizan la descomposición del material (Basak & Ghosal, 2010).

a. Reactor por lotes

Este tipo de reactor trabaja de forma discontinua por lo que se suele emplear para estudios cinéticos, al tener más control sobre las condiciones de operación. Es de los más comunes a escala laboratorio, el diseño es más sencillo y las variables son fáciles de establecer (Campos, 2017). En un reactor por lotes los reactivos se cargan al inicio del proceso y se retiran una vez completada la reacción. Este sistema es cerrado, lo que significa que no hay entrada ni salida de materiales durante la reacción, permitiendo un control preciso del tiempo de reacción y la temperatura. Se utiliza frecuentemente en procesos discontinuos donde se requieren tiempos de reacción específicos, como en la producción de productos farmacéuticos y en síntesis de compuestos de alta pureza (Fogler, 2016).

En un reactor por lotes, los parámetros de reacción, como la presión y el calor, pueden modificarse a lo largo del proceso para optimizar la conversión de los reactivos en productos. Este tipo de reactor es adecuado para la experimentación y el desarrollo de procesos, debido a su flexibilidad en el ajuste de condiciones. Además, facilita la manipulación de pequeñas cantidades de material, lo que lo hace ideal en operaciones de laboratorio y para productos que requieren procesamiento en cantidades controladas (Smith, 2019).

b. Reactor semicontinuo

Un reactor semicontinuo es un tipo de reactor químico que combina características de los reactores por lotes y continuos. En este sistema, uno o más reactivos se introducen continuamente durante el proceso, mientras que otros reactivos pueden estar presentes desde el inicio en un volumen fijo, como en un reactor por lotes. Este enfoque permite controlar mejor la concentración de reactivos en el tiempo y facilita reacciones que requieren la adición gradual de ciertos compuestos para evitar problemas como el sobrecalentamiento o la acumulación de productos indeseados (Levenspiel, 1999).

Este tipo de reactor es ideal para reacciones que requieren una dosificación cuidadosa, como las reacciones exotérmicas o aquellas que producen productos intermedios reactivos. Al permitir la introducción controlada de reactivos, los reactores semicontinuos aumentan la seguridad y eficiencia del proceso. Son comúnmente utilizados en la industria farmacéutica, en la producción de polímeros y en procesos donde se busca evitar altas concentraciones de reactivos que puedan reducir la selectividad o el rendimiento de la reacción (Smith, 2019).

c. Reactor continuo

Es un tipo de reactor químico en el que los reactivos se introducen y los productos se retiran constantemente a lo largo del proceso. Este flujo continuo permite mantener una producción constante, lo que lo hace ideal para aplicaciones industriales de gran escala, como la refinación de petróleo y la producción de productos químicos a gran volumen. A diferencia de los reactores por lotes, los reactores continuos operan en estado estacionario, donde las concentraciones de reactivos y productos pueden mantenerse constantes para optimizar la eficiencia y el control de la reacción (Fogler, 2016).

Este tipo de reactor es altamente eficiente para reacciones que requieren largos tiempos de residencia y permiten obtener productos de forma constante sin necesidad de pausas entre los lotes de producción. Los reactores continuos también facilitan la gestión del calor en procesos altamente exotérmicos y se emplean en una variedad de industrias, incluyendo la producción de alimentos y combustibles, gracias a su capacidad para mejorar la economía de escala (Levenspiel, 1999).

F. Análisis fisicoquímicos

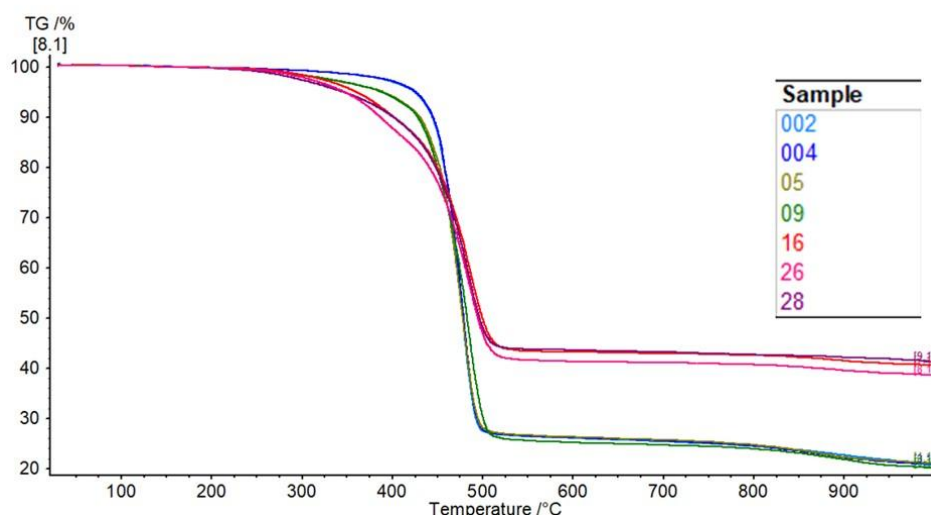
1. Análisis termogravimétrico (TGA)

Es un estudio que permite la medición en continuo de la variación de la masa de una muestra de material en función de la temperatura, que puede incrementarse de manera constante o incluir escalones de tratamientos isotérmicos. Estos análisis se llevan a cabo a escala laboratorio con la utilización de equipos especializados (Gómez et al., 2008). En esta técnica, una muestra es calentada o enfriada a una velocidad constante mientras se registra su peso en función de la temperatura. Esto permite observar procesos como la descomposición, la volatilización y las reacciones de oxidación o reducción, ofreciendo información sobre la estabilidad térmica y la composición de la muestra (Skoog et al., 2007).

Esta técnica es ampliamente empleada en la caracterización de materiales en campos como la química, los polímeros y la industria de alimentos, ya que permite

identificar la temperatura de degradación y la cantidad de material volátil presente. El análisis TGA es especialmente útil en la investigación de materiales poliméricos, biomasa y productos farmacéuticos, proporcionando datos sobre su comportamiento térmico y facilitando el desarrollo de materiales más estables o con propiedades específicas (Gabbott, 2008).

Figura 5. Diagrama de análisis termogravimétrico



Fuente: (Infinitia, 2025)

El análisis termogravimétrico anterior muestra como el porcentaje másico de la muestra evaluada disminuye a medida que la temperatura va aumentando, hasta llegar a un valor casi constante donde se tiene un cambio de masa de casi cero.

2. Densidad

Es el valor que indica de manera general la relación entre la masa y el volumen de una muestra. La densidad depende de la estructura atómica de la sustancia y de factores externos, como la temperatura y la presión, que pueden afectar el volumen y, en consecuencia, la densidad (Young & Freedman, 2011). La densidad es fundamental para entender cómo un objeto se comporta en distintos medios, por ejemplo, en relación con la flotación en fluidos. Además, varía según factores externos como la temperatura y la presión, que pueden afectar el volumen y, por ende, la densidad del material.

3. Poder calorífico

Es un parámetro que indica el potencial calorífico que tiene un material a la hora de llevar a cabo una combustión en condiciones establecidas. A través de la transformación de energía durante la combustión se incrementa la temperatura del calorímetro con relación a la temperatura inicial y se mide el incremento de temperatura (Gómez et al., 2008). Esta propiedad indica la cantidad de energía que se libera cuando una sustancia se

quema por completo. Expresado en unidades de energía por cantidad de material (como MJ/kg), el poder calorífico puede ser alto o bajo dependiendo de si se considera el vapor de agua generado en la combustión como líquido o gas. Este valor es crucial para evaluar la eficiencia de combustibles en aplicaciones industriales y energéticas, ya que determina la cantidad de energía disponible por unidad de masa o volumen del combustible (Smith, 2019).

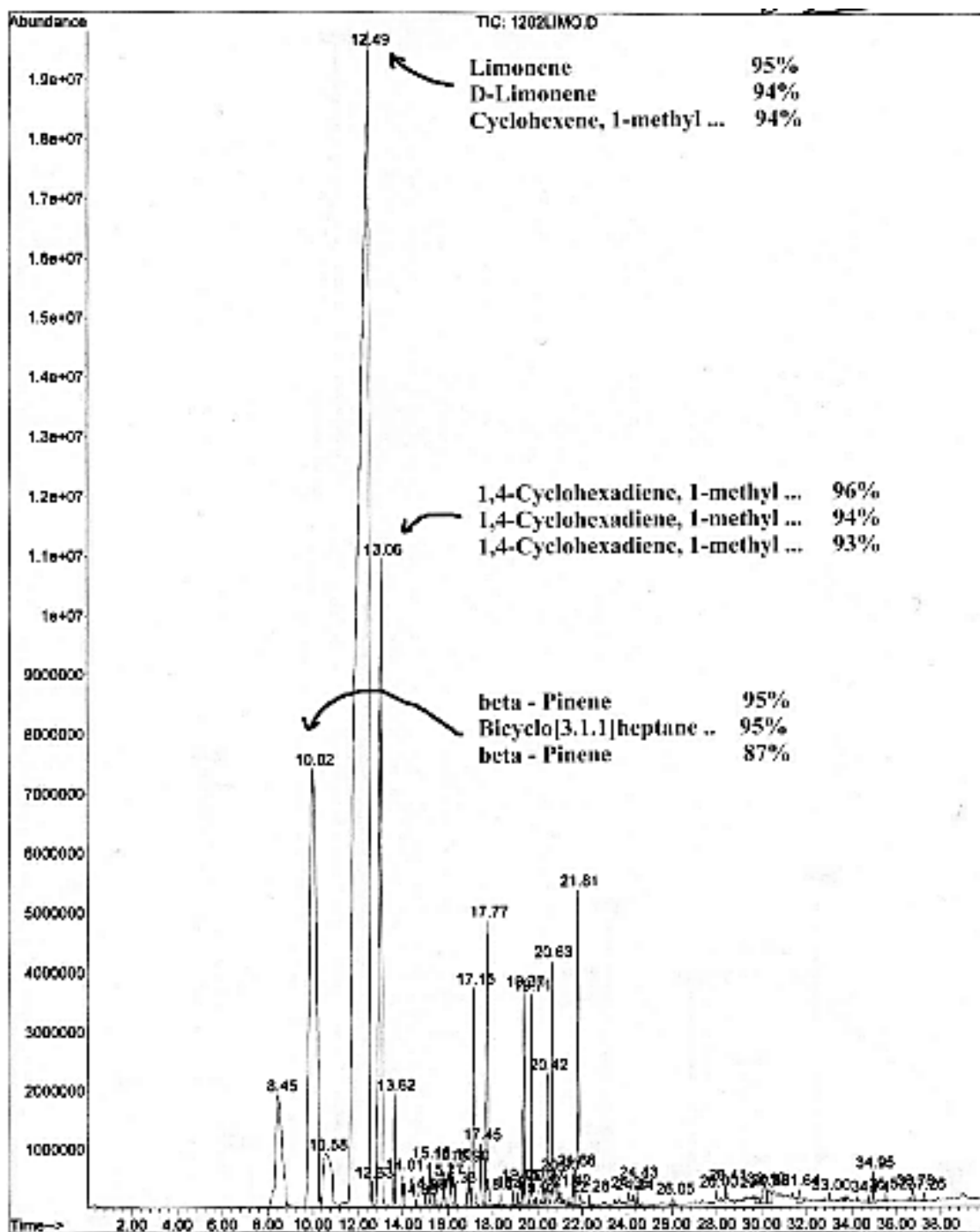
El poder calorífico es especialmente relevante en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, permitiendo su comparación y selección en términos de eficiencia energética y emisiones. Por ejemplo, combustibles con alto poder calorífico como el gas natural o el diésel son preferidos en la industria por su capacidad de generar grandes cantidades de energía en volúmenes relativamente pequeños, optimizando así la eficiencia en el transporte y uso del combustible (Kreith & Goswami, 2007).

4. Cromatografía de gases masa (CG-MS)

La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS, por sus siglas en inglés) es una técnica analítica avanzada que combina dos métodos: la cromatografía de gases, que separa los compuestos en una mezcla, y la espectrometría de masas, que identifica y cuantifica estos compuestos según su masa y carga. En este proceso, la muestra es vaporizada e inyectada en una columna de cromatografía de gases, donde los componentes son separados en función de su volatilidad. Luego, cada componente pasa al detector de espectrometría de masas, que proporciona un espectro de fragmentación específico para cada molécula, facilitando su identificación. Además, también permite analizar compuestos orgánicos en mezclas multicomponente, ofreciendo un análisis cualitativo y cuantitativo preciso que es fundamental para la caracterización de muestras complejas (McLafferty & Tureček, 1993).

Cada uno de los picos corresponde a un componente distinto. Cuanto más a la derecha se encuentre el pico en el cromatograma, mayor es el tiempo que necesita para atravesar la columna. Cuanto mayor es su altura y su área (estas dos magnitudes suelen ser proporcionales) mayor es la abundancia de los iones que genera ese componente al fraccionarse. Esto no implica que cuando un pico sea mayor que otro la abundancia del compuesto al que se refiere sea mayor, ya que es posible que una sustancia de lugar a un gran número de fragmentos mientras que otra se rompa en pocos. Aunque puede tomarse como una magnitud indicativa de la concentración de un compuesto en una mezcla (Requena et al., s. f.).

Figura 6. Diagrama de cromatografía de gases masa (GC-MS)



Fuente: (Requema et al., s. f.)

En la figura se muestra el TIC del aceite esencial del limón. En el eje horizontal se representa el tiempo en minutos y en el vertical la intensidad de los iones, en unidades arbitrarias.

G. Operaciones unitarias en proceso de pirólisis

1. Molienda

La molienda es una operación unitaria fundamental en los procesos industriales que busca reducir el tamaño de las partículas sólidas para facilitar su manipulación, reacción o transformación. Este proceso se logra mediante la aplicación de fuerzas mecánicas como impacto, compresión o cizalladura, utilizando diferentes tipos de molinos según el tipo de material y el tamaño deseado. En el caso específico del tratamiento de residuos plásticos, la molienda permite acondicionar el material a tamaños de partícula más pequeños y uniformes, lo que favorece procesos posteriores como la pirólisis, al aumentar el área superficial y, por tanto, la eficiencia de la transferencia de calor durante la reacción térmica (Geankoplis, 2003).

Existen distintos tipos de equipos para llevar a cabo la molienda, entre los que destacan los molinos de cuchillas, molinos de bolas, de martillos y de rodillos. En el tratamiento de plásticos, el molino de cuchillas es comúnmente utilizado debido a su capacidad de cortar y fragmentar materiales duros y fibrosos sin fundirlos, lo cual es crucial en polímeros termoplásticos. Además, controlar variables como la velocidad de rotación, el tiempo de operación y la temperatura es esencial para evitar la degradación térmica del polímero durante el proceso (Rosen, 2012). Una adecuada molienda no solo mejora la homogeneidad del sistema, sino que también influye en la calidad del producto final obtenido tras la pirólisis.

2. Secado

El secado es una operación unitaria que consiste en la eliminación parcial o total del contenido de humedad de un sólido mediante la aplicación de calor. El secado puede clasificarse en métodos por conducción, convección, radiación o microondas, dependiendo del mecanismo de transferencia de calor empleado. Los equipos más utilizados para materiales sólidos o granulares incluyen secadores de bandeja, secadores rotatorios, lecho fluidizado y de túnel (Geankoplis, 2003).

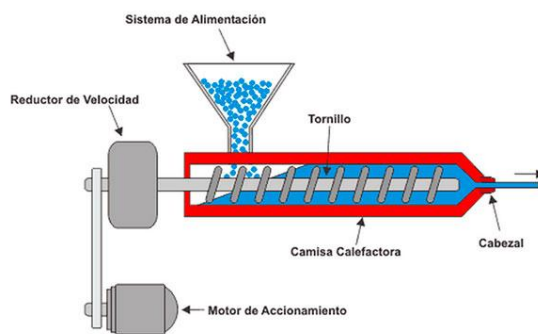
En el contexto del tratamiento de residuos plásticos, el secado previo es fundamental para asegurar una operación eficiente en procesos térmicos, evitando reacciones no deseadas por la presencia de humedad, como la formación de vapor que puede generar presión adicional dentro del reactor. El material seco mejora la estabilidad térmica durante la pirólisis, permitiendo una mejor conversión a productos líquidos y gaseosos. En estos casos, los secadores más comunes son de tipo lecho fijo con circulación de aire caliente, debido a su bajo consumo energético y su eficiencia para materiales termoplásticos triturados (Treybal, 1980).

3. Extrusión

La extrusión es un proceso ampliamente utilizado en la industria de los polímeros para formar materiales termoplásticos a través de un orificio o matriz bajo condiciones de alta temperatura y presión. Este método no solo permite la formación de formas continuas como filamentos o láminas, sino que también es eficaz para realizar mezclas íntimas entre diferentes componentes, como cargas, aditivos o catalizadores. En el contexto de la pirólisis catalítica de polímeros como el HDPE, la extrusión puede facilitar la incorporación uniforme del catalizador en la matriz polimérica antes de someterla al proceso térmico, asegurando una mejor dispersión y mayor contacto entre fases, lo que puede influir significativamente en la eficiencia del proceso (Fogler, 2016).

Además, la extrusión también cumple la función de transporte del material en estado fundido. Esto es posible gracias al tornillo sinfín del extrusor, el cual empuja progresivamente el polímero a lo largo del barril, promoviendo al mismo tiempo el calentamiento, mezclado y presurización del sistema. Este mecanismo es esencial en operaciones continuas y semibatch, donde se requiere un flujo constante y homogéneo del material hacia una unidad de procesamiento posterior, como una cámara de reacción o un sistema de enfriamiento (Green & Southard, 2019),.

Figura 7. Esquema de extrusión



Fuente: (Aristegui, s. f.)

4. Reacción

Una reacción química es un proceso fundamental mediante el cual una o más sustancias, denominadas reactivos, se transforman en otras sustancias, conocidas como productos, a través de la ruptura y formación de enlaces químicos (Levenspiel, 1999). Este fenómeno implica cambios en la composición molecular y suele ir acompañado de variaciones energéticas, como la liberación o absorción de calor. Comprender la naturaleza y cinética de las reacciones es esencial para diseñar y optimizar procesos químicos industriales.

Las reacciones químicas pueden clasificarse según su mecanismo, orden y velocidad. El orden de reacción es una característica cinética que indica la dependencia de la velocidad con respecto a la concentración de los reactivos (Fogler, 2016). Por ejemplo, en una reacción de primer orden, la velocidad es directamente proporcional a la concentración de un solo reactivo, mientras que, en reacciones de orden superior, la relación es más compleja. Este concepto es importante para el modelado matemático y la simulación de reactores químicos.

5. Condensación

La condensación es un proceso físico fundamental en la ingeniería química que consiste en la transformación de una sustancia del estado gaseoso al estado líquido, generalmente mediante la reducción de temperatura o el aumento de presión (Smith et al., 2005). Este fenómeno es esencial en numerosos procesos industriales, tales como la destilación, la refrigeración, y el diseño de intercambiadores de calor, donde la transferencia eficiente de masa y calor es crítica para la operación óptima.

Desde el punto de vista termodinámico, la condensación ocurre cuando un vapor se enfría hasta alcanzar su temperatura de saturación o punto de rocío, momento en el cual comienza a formarse la fase líquida (Geankoplis, 2003). Este proceso implica la liberación de calor latente de condensación, el cual debe ser manejado adecuadamente para mantener el equilibrio térmico y asegurar la estabilidad del sistema. La tasa de condensación depende de factores como la temperatura del vapor, la superficie de condensación, la presión y las propiedades del fluido.

6. Tamizaje

El tamizaje o cribado es una operación unitaria mecánica utilizada para la separación de partículas sólidas según su tamaño. Este proceso es fundamental cuando se desea garantizar la uniformidad granulométrica de una muestra, como en el caso de mezclas entre un polímero como HDPE y un catalizador sólido. En el contexto del acondicionamiento de mezclas para pirólisis, el tamizaje permite asegurar que tanto el catalizador como el polímero tengan tamaños compatibles, lo que favorece una mejor dispersión y una mayor área de contacto entre ambos componentes. Esto se traduce en una reacción más eficiente, al facilitar la transferencia de calor y masa durante el proceso pirolítico (Geankoplis, 2003).

Los tamices pueden ser utilizados en seco o en húmedo, y su diseño depende del tamaño de partícula deseado y del caudal a procesar. Para catalizadores en polvo y polímeros triturados, el tamizaje seco suele ser suficiente, empleando mallas con aberturas normalizadas. El control del tamaño de partícula es especialmente importante cuando se trabaja con catalizadores heterogéneos, ya que distribuciones muy amplias pueden generar problemas como canales preferenciales, puntos fríos o baja eficiencia catalítica en la pirólisis (McCabe et al., 2005). Además, mantener una distribución estrecha de partículas

mejora la reproducibilidad del proceso y facilita la caracterización posterior de los productos.

7. Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son recipientes diseñados para contener líquidos, gases o materiales sólidos a presión atmosférica o controlada, durante procesos industriales o en etapas posteriores a la producción. Su diseño varía según el tipo de producto a almacenar, pudiendo ser cilíndricos horizontales o verticales, subterráneos o sobre superficie, y fabricados de materiales como acero al carbono, acero inoxidable o plásticos de alta resistencia. En aplicaciones químicas, se consideran factores como la compatibilidad química del contenido, temperatura de operación, presión interna, y medidas de seguridad como venteos o sistemas de control de emisiones (Towler & Sinnott, 2013).

En el caso del almacenamiento de productos líquidos derivados de la pirólisis de plásticos, como los combustibles líquidos generados del HDPE, se requieren tanques metálicos cerrados, preferiblemente de acero inoxidable, para evitar la degradación del contenido y garantizar seguridad frente a vapores inflamables. Además, deben contar con válvulas de purga, indicadores de nivel, y estar ubicados en áreas ventiladas. Para productos gaseosos, se utilizan cilindros presurizados certificados, y para residuos sólidos, tolvas o silos cerrados. La selección y dimensionamiento depende del rendimiento esperado de cada fase del proceso (Coulson et al., 1999).

8. Acero 304

El acero inoxidable 304 es una aleación ampliamente utilizada en la industria química y de procesos debido a su excelente resistencia a la corrosión, durabilidad mecánica y buena soldabilidad. Su composición típica incluye aproximadamente 18 % de cromo y 8 % de níquel, lo que le confiere una protección pasiva frente a la oxidación en ambientes húmedos o con exposición moderada a agentes químicos. Además, tiene buena resistencia a temperaturas elevadas, siendo capaz de operar de manera continua hasta aproximadamente 870 °C y de forma intermitente hasta 925 °C, lo que lo hace adecuado para equipos que trabajan con procesos térmicos como hornos, reactores o condensadores (Callister & Rethwisch, 2011).

H. Cinética de pirólisis

1. Modelo cinético de pirólisis

La pirólisis de polímeros como el polietileno de alta densidad (HDPE) es un proceso termoquímico complejo que involucra múltiples reacciones simultáneas y consecutivas. Para su estudio, se recurre frecuentemente a modelos cinéticos que permiten describir la velocidad de degradación térmica del polímero en función de variables como la temperatura, el tiempo y la conversión. En general, el comportamiento de degradación

térmica del HDPE se aproxima mediante modelos cinéticos de orden n , siendo el modelo más común el de primer orden, que asume que la velocidad de reacción depende linealmente de la cantidad de material restante por descomponer (Aguado et al., 2008).

Se utiliza la ecuación de Arrhenius $k = Ae^{(-E_a/RT)}$ que incluye la constante de frecuencia A y la energía de activación E_a , valores que son característicos del sistema y determinan la sensibilidad de la reacción a los cambios de temperatura. Esta temperatura, en experimentos con muflas, puede obtenerse a través de una ecuación modificada de Boltzmann previamente establecida. Finalmente, R representa la constante universal de los gases ideales, con un valor de $8.314 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$, que relaciona la energía térmica con el comportamiento cinético del sistema. La ecuación de velocidad de degradación térmica es: $r_w = k(W-W_f)^n$ depende de la temperatura y otros parámetros fundamentales del sistema. En este contexto, W representa la masa instantánea del residuo dentro del reactor en un momento dado, mientras que W_f corresponde a la masa final del producto sólido al finalizar la pirólisis (Zachrisson, 2024). El término r_w define la velocidad de cambio de la masa del reactor en función del tiempo, es decir, la velocidad a la que ocurre el proceso de descomposición térmica. El parámetro n indica el orden de reacción, que puede variar según el mecanismo involucrado.

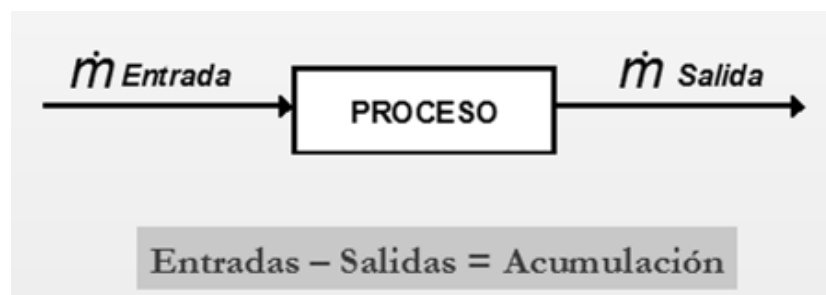
2. Energía de activación

La energía de activación se define como la cantidad mínima de energía requerida para que una reacción química comience a ocurrir. Este valor es crucial en la cinética química, al determina la velocidad de reacción, debido a que las moléculas deben alcanzar un umbral energético específico para superar la barrera de energía y reordenarse en productos. Cuanto menor sea la energía de activación, más rápidamente se producirá la reacción bajo las mismas condiciones, ya que una mayor cantidad de moléculas tendrá la energía suficiente para reaccionar. En el contexto de procesos catalíticos, como la pirólisis, los catalizadores reducen esta energía de activación, facilitando la descomposición del material en productos más simples al ofrecer una vía de menor energía para la reacción (Atkins & de Paula, 2010).

3. Balance de masa

El balance de masa es un principio fundamental de la ingeniería química y de procesos, que se basa en la ley de conservación de la materia. Esta ley establece que la masa no se crea ni se destruye en un sistema cerrado, por lo tanto, cualquier cambio en la cantidad de masa dentro de un sistema debe ser igual a la masa que entra menos la masa que sale.

Figura 8. Esquema de balance de masa



Fuente: (Fogler, 2016)

Para procesos donde no hay generación ni consumo de masa (como en operaciones físicas), la ecuación se reduce a un equilibrio entre entrada, salida y acumulación. El balance de masa es esencial para el diseño, control y análisis de procesos químicos y bioquímicos, ya que permite cuantificar las corrientes de materia en cada etapa de una planta o experimento. Por ejemplo, en un proceso de pirólisis, se pueden hacer balances de masa para determinar cuánto del material alimentado se convierte en gases, líquidos o residuos sólidos. Este tipo de análisis es la base para escalar procesos y optimizar rendimientos. Además, su aplicación puede ser tanto en estado estacionario como en estado transitorio, dependiendo de si las condiciones cambian con el tiempo o no (Fogler, 2016).

4. Balance de energía

El balance de energía es una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos que permite cuantificar el flujo y transformación de energía en un sistema. Su fundamento se basa en la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma de una forma a otra. En términos generales, el balance de energía se puede expresar como: Energía de entrada + Energía generada – Energía de salida – Energía consumida = Acumulación de energía en el sistema.

En sistemas cerrados sin reacción química, esta ecuación se aplica considerando el calor, el trabajo mecánico y la energía interna del sistema. El análisis de balance energético es crucial para estimar el consumo de energía del proceso, diseñar equipos térmicos, y evaluar la eficiencia energética global del sistema (Çengel & Boles, 2015).

5. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo es una representación gráfica secuencial que describe los pasos, operaciones y equipos involucrados en un proceso industrial. Su principal objetivo es facilitar la visualización del proceso, identificar las etapas clave, y servir como herramienta base para el diseño, simulación, control y análisis de plantas químicas. Existen varios niveles de complejidad en los diagramas de flujo, desde los más simples como el diagrama de bloques, hasta los más detallados como los diagramas de flujo de

procesos (PFD) y los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) (Green & Southard, 2019).

Un buen diagrama de flujo no solo comunica el proceso, sino que también ayuda a detectar cuellos de botella, pérdidas térmicas, y oportunidades de mejora en la eficiencia o la seguridad del sistema (Green & Southard, 2019). Además, el uso del diagrama de flujo es fundamental para la planificación de operaciones unitarias, la realización de balances de masa y energía, y la preparación de escalados a nivel piloto o industrial. La claridad en su elaboración, junto con símbolos estandarizados, permite que el diagrama sea comprensible por cualquier ingeniero o técnico involucrado en el proyecto.

V. ANTECEDENTES

A. Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad (HDPE) es uno de los plásticos más producidos a nivel mundial debido a su bajo costo, alta resistencia química y versatilidad en aplicaciones, principalmente en envases, botellas y tuberías. En 2022, la producción mundial de plásticos alcanzó aproximadamente 400 millones de toneladas métricas, y se estima que el HDPE representó una fracción significativa de esta cifra. Sin embargo, esta alta demanda ha llevado a una acumulación masiva de residuos, ya que el HDPE es resistente a la degradación natural y su reciclaje mecánico presenta limitaciones debido a la pérdida de propiedades del polímero tras varios ciclos de reprocesado (Hopewell et al., 2009).

Se estima que a nivel mundial se generan millones de toneladas de residuos plásticos cada año. Según datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), más del 75 % del plástico producido desde la década de 1950 se ha convertido en residuo, y solo una pequeña parte se recicla o incinera de manera controlada, mientras que la mayoría termina en vertederos o en el ambiente, generando serios impactos ecológicos y sociales (UNEP, 2018).

En Guatemala, la generación de residuos sólidos domiciliarios alcanzó aproximadamente 2.57 millones de toneladas en 2019, según estimaciones del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2021). De este total, se calcula que alrededor del 17 % corresponde a productos de caucho y plástico, lo que equivale a aproximadamente 437,000 toneladas anuales. Se estima que el HDPE representa entre el 12 y el 20 % de los residuos plásticos, correspondiente a la generación de entre 52,000 y 87,000 toneladas de residuos de HDPE al año.

La acumulación de HDPE en los ecosistemas terrestres y acuáticos contribuye a la contaminación ambiental de largo plazo, dado que este polímero puede tardar siglos en degradarse completamente. Además, los métodos convencionales de manejo, como la disposición en vertederos o la incineración sin control de emisiones, no representan una solución sostenible. Por ello, se hace urgente el desarrollo de alternativas tecnológicas como la valorización energética y química de estos residuos para mitigar su acumulación (Gutiérrez, 2015).

B. Pirólisis de polietileno de alta densidad

La pirólisis del polietileno de alta densidad (HDPE) es un proceso termoquímico que permite descomponer el polímero a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, produciendo principalmente combustibles líquidos, gases y residuos carbonosos. Este método se posiciona como una alternativa eficaz frente al reciclaje mecánico, especialmente para plásticos altamente contaminados o degradados, que no pueden reincorporarse a cadenas productivas tradicionales (Grover & Santamaría, 2023). Además, representa una vía sustentable para mitigar la acumulación de residuos plásticos y convertirlos en productos de valor energético.

Los productos obtenidos de la pirólisis de HDPE varían significativamente según las condiciones operativas. Estudios muestran que a temperaturas cercanas a los 500–550 °C, es posible alcanzar rendimientos líquidos de hasta 88 %, con composiciones que incluyen fracciones de gasolina, diésel y keroseno (Ramos & Pretell, 2021). Estos rendimientos son especialmente atractivos en contextos donde se busca sustituir parcialmente los combustibles fósiles por alternativas derivadas de residuos. Asimismo, el tipo de reactor y el tiempo de residencia influyen notablemente en la calidad del producto líquido, permitiendo ajustar la distribución de hidrocarburos obtenidos (Guachamín & Castro, 2023).

Por otro lado, los productos líquidos derivados de la pirólisis también han mostrado potencial para aplicaciones más allá del combustible, como en la mejora de asfaltos. Algunos estudios han explorado su uso como modificadores en mezclas asfálticas, donde mejoran las propiedades reológicas del pavimento, extendiendo su vida útil y resistencia (Plastic, 2022). Esta versatilidad en las aplicaciones industriales subraya la importancia del proceso de pirólisis como una solución técnica, económica y ambientalmente viable para el tratamiento de residuos plásticos como el HDPE.

C. Pirólisis en Guatemala

En Guatemala, la pirólisis de residuos plásticos ha surgido como una alternativa prometedora ante la creciente acumulación de materiales no biodegradables, especialmente los derivados del polietileno. Este proceso termoquímico, realizado en ausencia de oxígeno, permite descomponer polímeros como el HDPE en fracciones más pequeñas que pueden convertirse en productos con valor agregado, como combustibles líquidos, gases combustibles y carbón sólido (Zachrisson, 2024). Esta técnica representa una vía eficiente para mitigar la contaminación ambiental y, al mismo tiempo, aprovechar energéticamente los residuos.

Una de las investigaciones más relevantes en el país es la tesis desarrollada por Zachrisson (2024) en la Universidad del Valle de Guatemala, en la cual se evaluó el efecto de distintas rampas de temperatura sobre la eficiencia energética del combustible líquido obtenido mediante pirólisis de HDPE. Se determinó que la temperatura de reacción influye notablemente en el rendimiento del producto líquido, así como en su poder calorífico, siendo una variable crítica en la optimización del proceso. Esta investigación constituye una base importante para comprender los parámetros que pueden ser ajustados a nivel de laboratorio y eventualmente escalados a procesos industriales.

Otro trabajo académico notable es el de Illescas (2024), quien también en la Universidad del Valle de Guatemala analizó el potencial de valorización de mascarillas quirúrgicas desechables mediante pirólisis. A través de su estudio se evidenció la factibilidad de obtener productos líquidos y sólidos de valor energético a partir de residuos sanitarios, los cuales han incrementado de manera considerable en el contexto post-pandemia. Esta aplicación abre nuevas posibilidades para tratar residuos plásticos no convencionales, que usualmente no entran en esquemas de reciclaje mecánico tradicionales.

A nivel industrial, destaca la instalación reciente de una planta de pirólisis por parte del Beston Group en Guatemala. Esta planta, con capacidad para procesar hasta 10 toneladas por lote, está equipada con hornos de acero inoxidable. Según el reporte técnico de la compañía, este proyecto ha logrado recuperar materiales útiles a partir de plásticos, neumáticos y lodos oleosos, al mismo tiempo que reduce las emisiones asociadas a la incineración de residuos (Beston Group, 2025). La planta representa un paso concreto hacia la implementación de soluciones sostenibles a nivel industrial en el país.

D. Pirólisis catalítica

El proceso termoquímico de pirólisis de residuos plásticos en presencia de catalizadores promueve la formación de productos valiosos como combustibles líquidos y gases, así como también la reducción de temperatura de operación. Esto no solo disminuye el consumo energético, sino que también mejora la calidad y rendimiento de los productos obtenidos. Muchos de los catalizadores utilizados son de origen ácido como zeolitas, óxidos metálicos, o tierras ácidas. Se sigue estudiando las relaciones catalizador/polímero a emplear dependiendo también del tipo de reactor y la velocidad de calentamiento.

Pero diversos estudios han demostrado que el tipo de catalizador tiene un impacto directo en las propiedades del combustible líquido obtenido, como las de estructura micro porosa favorecen la formación de hidrocarburos aromáticos debido a su acidez y forma de poro, mientras que los óxidos metálicos promueven el craqueo suave y formación de alcanos y alquenos (Miandad et al., 2019). Esto ha llevado a una expansión de investigaciones en esta área, particularmente en países industrializados, aunque su aplicación a escala piloto y comercial en países en desarrollo aún es limitada, representando una oportunidad de innovación tecnológica en gestión de residuos.

VI. METODOLOGÍA

A. Cálculo de tamaño de muestra

- Determinar los parámetros de margen de error, confiabilidad, desviación estándar poblacional y tamaño de la muestra.
Confiabilidad del 95 %
Error del 5 %
Valor de $Z_{\alpha/2} = 1.96$ (con confianza del 95 %)
Desviación estándar poblacional estimada de 4.0 %
- Aplicar la fórmula de tamaño de muestra para población infinita (ver ecuación 1 en Anexos)
- Determinar el tamaño de la muestra (ver cálculo 1 en Anexos): Resultado 3 muestras.

B. Análisis termogravimétrico

- **Equipo**
 - Mettler Toledo TGA 1 STAR System
 - 1 balanza semi analítica Ohaus, modelo PX623/E rango de 0.001-620 g e incertidumbre de ± 0.001 g.
- **Cristalería**
 - 3 frascos de vidrio de 350 mL
- **Reactivos**
 - Óxido de zinc 99.9 % de pureza
 - Polvo de zeolitas (ZSM-5) 99.9 % de pureza
 - Muestra de polietileno de alta densidad
- **Materiales**
 - Un raspador de cocina

1. Procedimiento

a. Preparación de muestras

- Tomar una muestra de 4 gramos de polietileno de alta densidad, y hacer pasar por el raspador para reducir el tamaño de partícula (molerlo).
- Utilizar una balanza semi analítica para medir 1.8 gramos de polietileno de alta densidad molido y colocarse en un frasco de vidrio pequeño y agregar 0.2 gramos de óxido de zinc (concentración de catalizador al 10 % m/m).
- Utilizar una balanza semi analítica para medir 1.8 gramos de polietileno de alta densidad molido y colocarse en un frasco de vidrio pequeño y agregar 0.2 gramos de zeolitas ZSM-5 (concentración de catalizador al 10 % m/m).

- Tapar los dos frascos de vidrio y agitarlos para homogeneizarlas.
- Utilizar una balanza semi analítica para medir 2 gramos de polietileno de alta densidad y colocar en un frasco de vidrio pequeño.

b. Análisis de muestras

- Encender el equipo TGA Mettler Toledo STAR System y ajustar los parámetros iniciales de velocidad de calentamiento, atmósfera y rango de temperatura.
- Tomar el peso de 0.1 g la muestra de HDPE y colocar en el crisol.
- Ingresar el crisol en el porta muestras del equipo e iniciar la corrida del análisis (en el software del equipo).
- Al finalizar la corrida obtener las curvas TGA que genera el equipo.
- Realizar el mismo procedimiento 3 veces para cada una de las muestras (HDPE, HDPE + Zeolitas ZSM-5 y HDPE + ZnO).
- Retirar el crisol y limpiarlo cuidadosamente.
- Apagar el equipo.

C. Corridas de pirólisis

• Equipo

- 1 balanza Ohaus, modelo V31XH2 rango de 0.1-2000 g e incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 reactor de pirólisis de lecho fijo de 100 g.
- 1 horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, rango de temperatura de 25-1200 °C.
- 1 bomba de agua de pecera de 120 W.
- 1 termómetro de vidrio.

• Cristalería

- 1 sistema de condensación de vidrio.
- 1 beaker de 500 mL
- 3 beaker de 250 mL
- 4 frascos de vidrio

• Reactivos

- 50 g de HDPE (en pellets)
- 50 mL de acetona
- Zeolitas ZSM-5 99.9 % de pureza
- Óxido de zinc 99.9 % de pureza

• Materiales

- 1 tijera
- 1 cubeta plástica de 20 L.
- 2 mangueras de plástico.

- 2 pedazos de cañuela.
- 1 sistema de chimenea de acero inoxidable del reactor de pirólisis.
- 1 espátula de metal
- 1 sistema de soporte universal.
- Pinzas para soporte.

1. Procedimiento

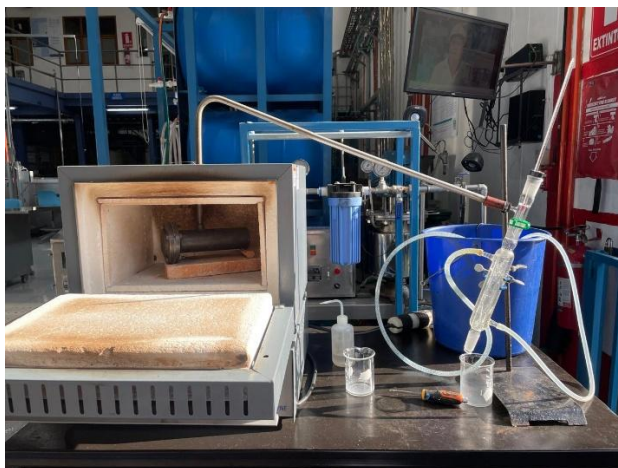
a. Preparación de la muestra

- Con las tijeras se recorta la parte lisa de las botellas de plástico de HDPE (de 1 mm de grosor), tratando de formar pequeños trozos cuadrados de 1.5cm x 1.5 cm (pellets).
- Empleando una balanza, se coloca un beaker de 500 mL para medir su masa y luego se pesa la cantidad de HDPE a pirolizar (unos 50 g). En el caso de las corridas con catalizador, pesar 45 g de muestra de HDPE.
- En el caso de las corridas con catalizador, medir la masa de un beaker de 250 mL y pesar 5 g la muestra de catalizador a utilizar (óxido de zinc o zeolitas ZSM-5).
- Abrir el reactor de pirólisis e introducir la muestra de HDPE a utilizarse (en pellets), y el catalizador previamente pesado (si es el caso).
- Cerrar el reactor colocando un empaque de grafito como sellante y colocando las tuercas de este.
- Homogeneizar la muestra agitando.
- Tomar el peso de 3 frascos de vidrio vacíos, limpios y secos.

b. Montaje del equipo y sistema de pirólisis

- Colocar el reactor de pirólisis dentro de la mufla (ver Figura 9).

Figura 9. Sistema de pirólisis armado a escala laboratorio



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

El sistema mostrado, se armó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

- Enroscar el sistema de chimenea dentro del reactor de pirólisis (ya dentro de la mufla), al hacerse pasar por un agujero en la parte superior de la mufla.
- Colocar los pedazos de cañuela como aislantes en el sistema de chimenea.
- Armar el sistema de condensación con el condensador en vertical, con la ayuda de un soporte universal y pinzas.
- Llenar la cubeta con agua.
- Colocar la bomba de pesera dentro de la cubeta, e insertar una manguera.
- El otro extremo de la manguera acoplarlo en el condensador, y colocar la otra manguera en la parte de arriba del condensador (con salida a la cubeta) asegurándose que haya un flujo de agua recirculando.
- Colocar un beaker de 250 mL en la salida del condensador para recuperar el producto condensado.
- Acoplar la salida de la chimenea con el sistema de condensación, ajustando la correa.

c. Pirólisis

- Encender la bomba de agua de pecera y la mufla (con el botón de encendido en el panel de control).
- Ajustar una temperatura objetivo de 150 °C.
- Al llegar a los 150 °C, esperar que el sistema estabilice por 10 minutos.
- Aumentar una temperatura de 50 °C cada 20 minutos, hasta llegar a 400 °C.
- Iniciar la rampa de temperatura de 8 °C cada 30 minutos.
- Medir la temperatura de la chimenea a la salida de la mufla y la entrada del condensador.
- Medir la temperatura del agua de enfriamiento en la entrada y salida con el termómetro, cuando se está recolectando el combustible líquido.
- Recuperar los productos a medida que se va aumentando la temperatura.
- Al terminar de recuperar el producto, apagar la mufla, la bomba y detener la condensación.
- Desmontar el sistema de condensación, desconectando las mangueras, removiendo el agua de la cubeta.
- Limpiar con agua y acetona el condensador quitando remanentes del producto.
- Esperar que se enfríe el sistema y desarmar el reactor con el sistema de chimenea.
- Realizar el mismo procedimiento 3 veces para cada una de las muestras (HDPE, HDPE + Zeolitas ZSM-5 y HDPE + ZnO).

d. Cuantificación de productos

- Determinar el peso de los productos obtenidos, empleando la masa de los recipientes vacíos (para los productos líquidos).
- El producto sólido se debe remover con una espátula para recolectar en un frasco de vidrio y pesarse.
- Realizar un balance de masa por diferencia para obtener la masa de gas obtenido.

D. Densidad

- **Equipo**
 - 1 balanza semi analítica Ohaus, modelo PX623/E rango de 0.001-2000 g e incertidumbre de ± 0.001 g.
- **Cristalería**
 - 1 probeta de 10 mL.
- **Reactivos**
 - Producto líquido obtenido de pirólisis.

1. Procedimiento

- Medir el peso de una probeta de 10 mL vacía, limpia y seca en una balanza semi analítica.
- Agregar el combustible líquido obtenido, a manera de llenar el volumen de la probeta (10 mL).
- Medir el peso de la probeta con la masa de combustible líquido con la balanza semianalítica.
- Hacer una diferencia entre la masa de la probeta con el líquido a estudiar y con la probeta vacía.
- Aplicar la fórmula de densidad, utilizando 10 mL de volumen y la masa del combustible.
- Realizar el mismo procedimiento 3 veces para cada una de las muestras (HDPE, HDPE + Zeolitas ZSM-5 y HDPE + ZnO).

E. Poder calorífico

- **Equipo**
 - Calorímetro IKA 200C
 - 1 balanza semi analítica Ohaus, modelo PX623/E rango de 0.001-2000 g e incertidumbre de ± 0.001 g.
- **Reactivos**
 - Ácido benzoico 99.9 % pureza
 - Muestra de producto líquido de pirólisis
 - Muestra de producto sólido de pirólisis
 - 2 litros de agua

- Oxígeno

1. Procedimiento

- Preparar el calorímetro IKA 200C para determinar el poder calorífico de la muestra.
- Colocar una fibra de algodón en el centro del alambre de ignición y sujetarla con un trozo de hilo.
- Pesar 0.1g de ácido benzoico para calibrar el sistema en el crisol de cuarzo de la bomba.
- Colocar la fibra de algodón con una pinza para que se mantenga contacto con el material a medir.
- Colocar la tapa del recipiente de disgregación y apretar correctamente la tuerca de racor.
- Suministrar oxígeno durante 10 segundos.
- Colocar el adaptador de encendido sobre la tapa del recipiente de disgregación.
- Colocar el recipiente de disgregación dentro del calorímetro, asegurándose que quede entre los 3 pernos de alojamiento.
- Llenar el depósito con 2 litros de agua, en medio del límite inferior y superior.
- Cerrar la caldera interna del calorímetro.
- Ingresar en el menú de la pantalla del calorímetro la opción de medición y colocar el peso de la muestra.
- Determinar el poder calorífico del ácido benzoico, comparándolo con el valor teórico.
- Una vez calibrado, pesar 0.1g de líquido combustible obtenido en el crisol de la bomba, cerrar y configurar el equipo.
- Tomar la lectura del poder calorífico.
- Realizar el mismo procedimiento 3 veces para cada una de las muestras (HDPE, HDPE + Zeolitas ZSM-5 y HDPE + ZnO) y para las 3 muestras de producto sólido de pirólisis de HDPE.

F. Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

- **Equipo**
 - Columna HP5
 - Columna DB-Wax
 - Software ChemStation
- **Cristalería**
 - 9 tubos de ensayo
 - 1 pipeta graduada de 5 mL

- **Reactivos**
 - Muestra de combustible líquido de pirólisis
- **Materiales**
 - 1 pipeteador de 10 mL

1. Procedimiento

a. Preparación

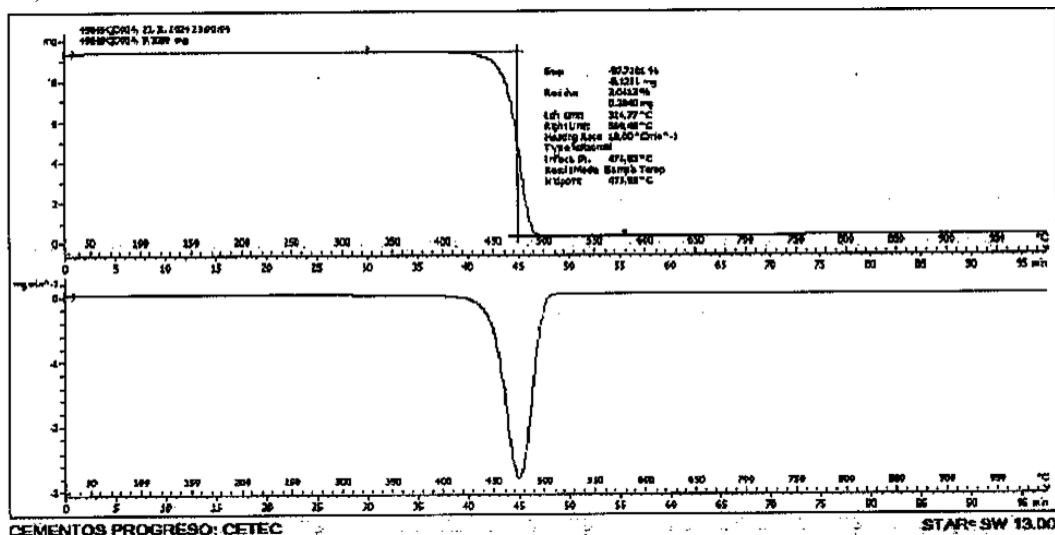
- Tomar 5 mL de cada una de las 9 muestra de combustible líquido de pirólisis y verter en los 9 tubos de ensayo empleando una pipeta y un pipeteador.
- Enviar a análisis en el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

b. Análisis GC-MS

- Analizar la muestra de producto líquido con una columna HP5 al calentar por 60 °C por 2 minutos; luego a una tasa de 3 °C/min hasta 250 °C por 5 minutos usando un flujo de 1 mL/min.
- Analizar los cromatogramas con el informe del equipo.
- Realizar un análisis de los compuestos obtenidos en el informe, depurando ciertos compuestos (filtrando de mayor a menor área de retención en los cromatogramas hasta llegar a 80 %) y comparando con la base de datos del software ChemStation, según la cantidad de carbonos en los compuestos.
- Realizar el mismo procedimiento 3 veces para cada una de las muestras (HDPE, HDPE + Zeolitas ZSM-5 y HDPE + ZnO).

VII. RESULTADOS

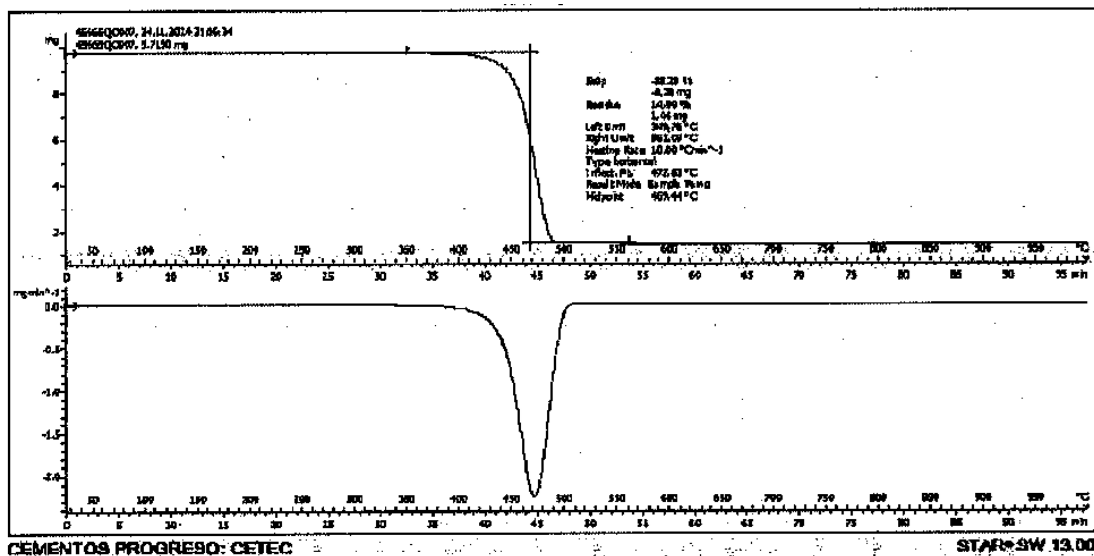
Figura 10. Análisis termogravimétrico de una muestra de polietileno de alta densidad (HDPE)



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 10 se observa el análisis termogravimétrico de una muestra de HDPE, se obtuvo con el apoyo del Centro de Tecnología de Cementos Progreso S. A. CETEC, extraído de: Figura 25, Figura 26 y Figura 27 (ver Anexos página 70).

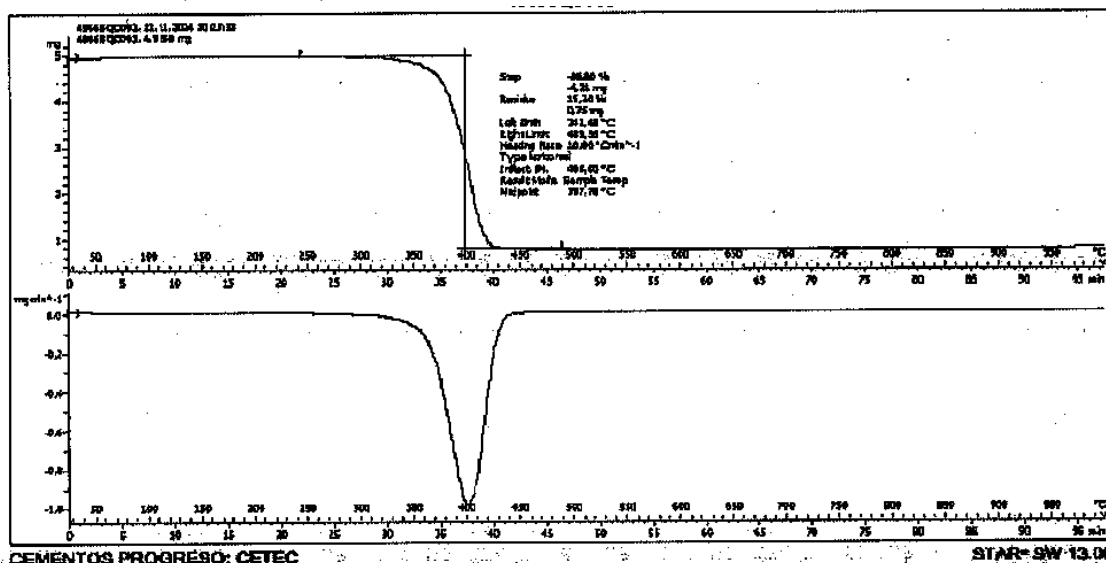
Figura 11. Análisis termogravimétrico de muestra de polietileno de alta densidad (HDPE) y óxido de zinc (10 % m/m)



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 11 se observa el análisis termogravimétrico de una muestra de HDPE con óxido de zinc (10 % m/m), se obtuvo con el apoyo del Centro de Tecnología de Cementos Progreso S. A. CETEC, extraído de: Figura 28, Figura 29 y Figura 30 (ver Anexos página 73).

Figura 12. Análisis termogravimétrico de muestra de polietileno de alta densidad (HDPE) y zeolitas ZSM-5 (10 % m/m)



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 12 se observa el análisis termogravimétrico de una muestra de HDPE con zeolitas ZSM-5 (10 % m/m), se obtuvo con el apoyo del Centro de Tecnología de Cementos Progreso S. A. CETEC, extraído de: la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 (ver Anexos página 76).

Cuadro 1. Temperaturas de degradación de las muestras de HDPE y de HDPE con 10 % (m/m) de óxido de zinc y zeolitas ZSM-5

Muestra	Temperatura inicial de degradación (°C)	Temperatura final de degradación (°C)
HDPE	396.67 ± 32.15	488.33 ± 7.64
HDPE + ZnO	405.00 ± 13.23	488.33 ± 2.89
HDPE + ZSM-5	308.33 ± 33.29	460.00 ± 32.79

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 1 se observan las temperaturas iniciales y finales de degradación en los análisis termogravimétricos realizados a las muestras de HDPE, de HDPE con 10 % (m/m) de ZnO y zeolitas ZSM-5. La estadística completa de los datos se encuentra en el Cuadro 19 (ver Anexos página 95).

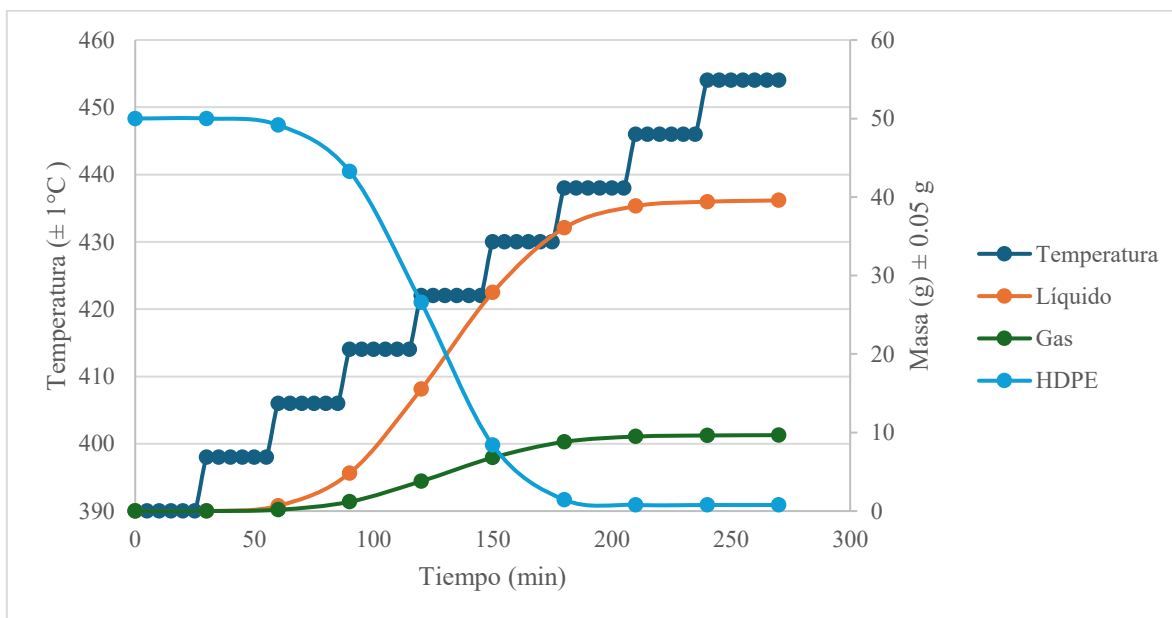
Cuadro 2. Rendimientos de los productos obtenidos en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y zeolitas ZSM-5

Pirólisis	Rendimiento producto líquido (%)	Rendimiento producto gaseoso (%)	Rendimiento producto sólido (%)
HDPE	79.13 ± 0.61	19.33 ± 1.01	1.53 ± 0.46
HDPE + ZnO	84.37 ± 0.34	14.32 ± 0.27	1.31 ± 0.60
HDPE + Zeolitas ZSM-5	76.30 ± 1.05	19.48 ± 1.05	4.22 ± 0.44

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 2 se observan los rendimientos de producto líquido, gaseoso y sólido de los procesos de pirólisis, obteniéndose por medio de balance de masa. La estadística completa de los datos se encuentra en el Cuadro 22 (ver Anexos página 97).

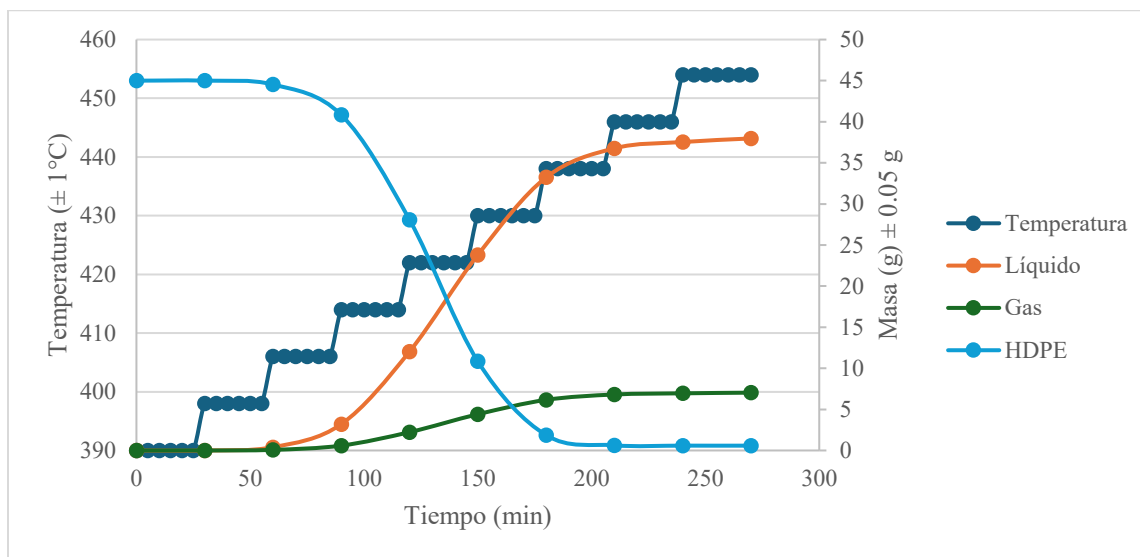
Figura 13. Curva de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE)



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 13 se observan los resultados experimentales de temperatura, tiempo, producto líquido y gaseoso obtenido de pirólisis de HDPE. Los datos se encuentran en: Cuadro 7, Cuadro 8 y Cuadro 9 (ver Anexos página 79).

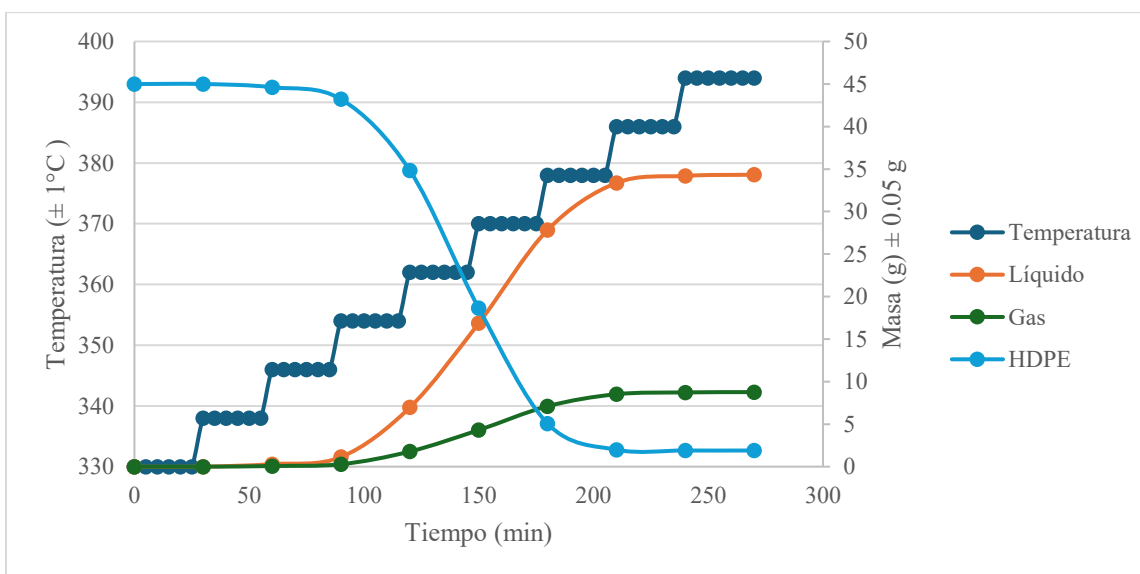
Figura 14. Curva de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con óxido de zinc (10 % m/m)



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 14 se observan los resultados experimentales de temperatura, tiempo, producto líquido y gaseoso obtenido de pirólisis de HDPE con ZnO al 10% (m/m). Los datos se encuentran en Cuadro 10, Cuadro 11 y Cuadro 12 (ver Anexos página 83).

Figura 15. Curva de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con zeolitas ZSM-5 (10 % m/m)



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 15 se observan los resultados experimentales de temperatura, tiempo, producto líquido y gaseoso obtenido de pirólisis de HDPE con zeolitas ZSM-5 al 10 % (m/m). Los datos se encuentran en Cuadro 13, Cuadro 14 y Cuadro 15 (ver Anexos página 88).

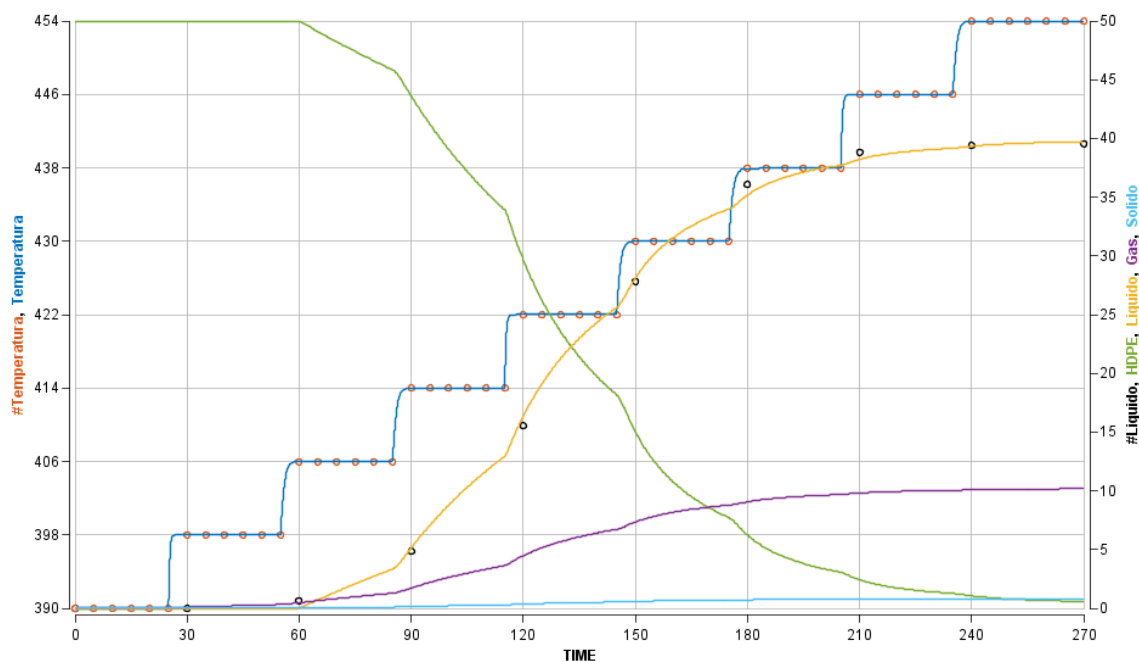
Cuadro 3. Resultados cinéticos de los modelos parametrizados de las curvas de pirólisis

Proceso	HDPE	HDPE + ZnO	HDPE + ZSM-5
Energía de activación (Ea) (J/mol)	230148.19 ± 1777.04	230877.1 ± 928.90	199716.36 ± 2749.00
Constante de frecuencia (A)	$1.69\text{E}+25 \pm 1.30\text{E}+23$	$1.70\text{E}+25 \pm 6.84\text{E}+22$	$1.71\text{E}+25 \pm 2.36\text{E}+23$
Orden de reacción (n)	2.1488 ± 0.0166	2.1389 ± 0.0087	2.1516 ± 0.0296
Peso de sólido final (Wf)	0.2077 ± 0.0016	0.2000 ± 0.0008	0.5000 ± 0.0069

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 3 se observan los resultados cinéticos obtenidos de los modelos cinéticos parametrizados realizados en el software Berkeley Madonna para los datos obtenidos de la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y con Zeolitas ZSM-5.

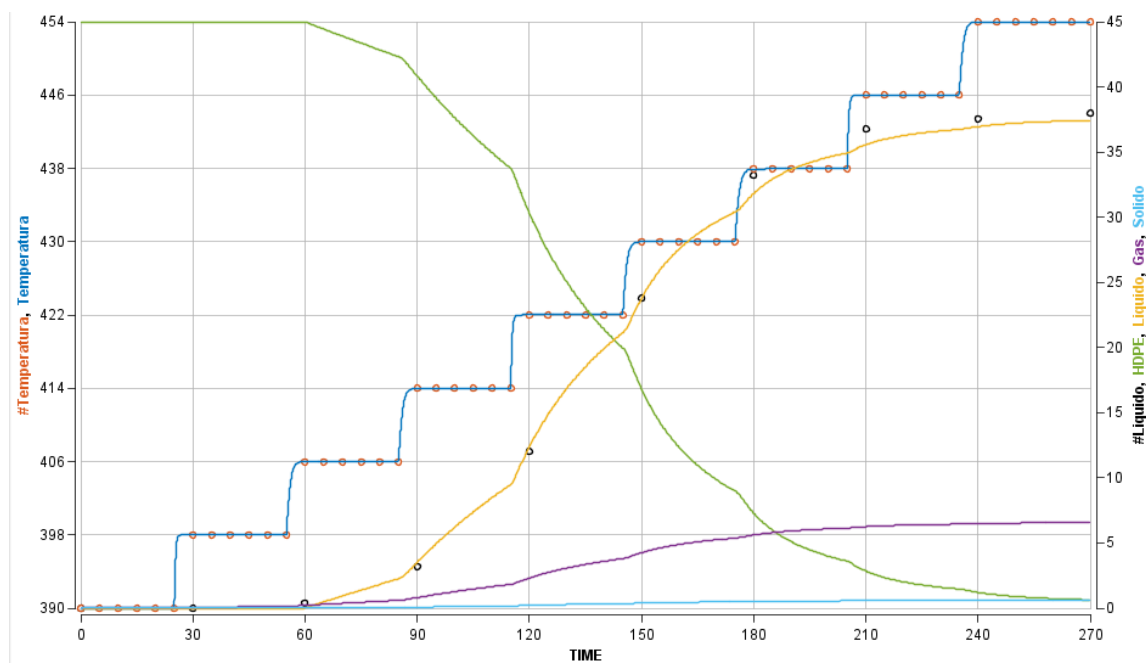
Figura 16. Curvas de la cinética obtenida para los datos de pirólisis de HDPE



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 16 se observan las curvas obtenidas de la cinética determinada para los datos de pirólisis de HDPE. Esta figura se obtuvo a partir del software Berkeley Madonna y cuenta con un R^2 de 0.9990.

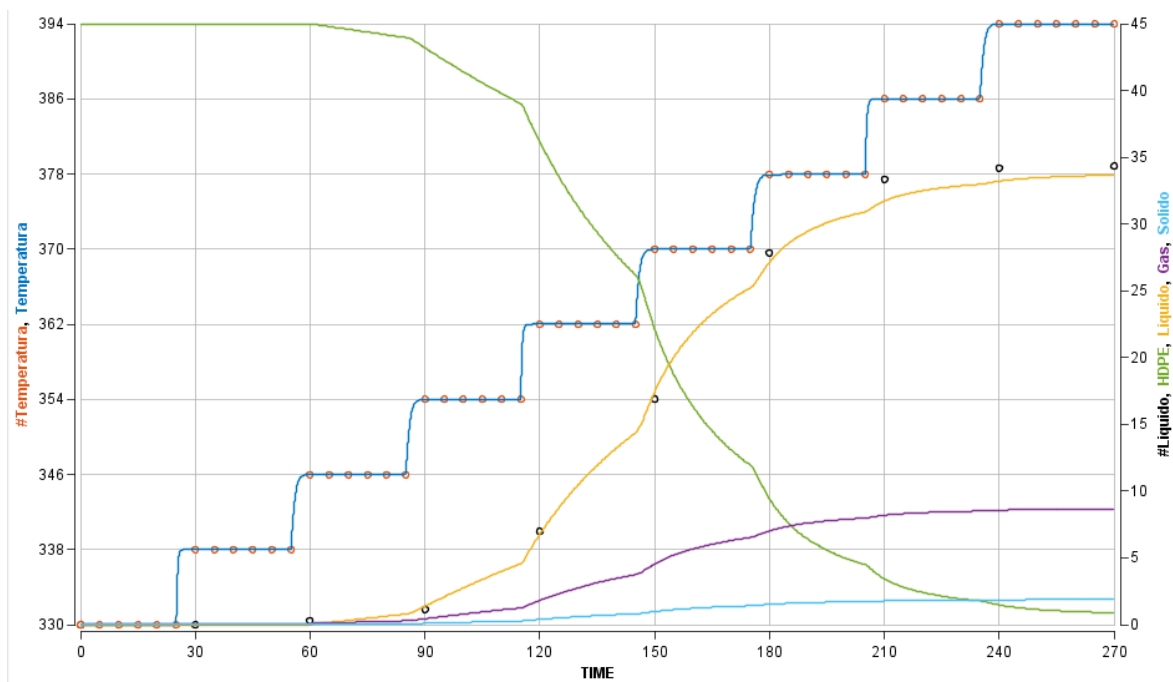
Figura 17. Curvas de la cinética obtenida para los datos de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO al 10 % (m/m)



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 17 se observan las curvas obtenidas de la cinética determinada para los datos de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO al 10 % (m/m). Esta figura se obtuvo a partir del software Berkeley Madonna y cuenta con un R^2 de 0.9981.

Figura 18. Curvas de la cinética obtenida para los datos de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5 al 10 % (m/m)



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 18 se observan las curvas obtenidas de la cinética determinada para los datos de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5 al 10 % (m/m). Esta figura se obtuvo a partir del software Berkeley Madonna y cuenta con un R^2 de 0.9973.

Cuadro 4. Resultados de densidades del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y zeolitas ZSM-5

Pirólisis	Densidad (kg/m³)	Densidad gasolina comercial (kg/m³)	Densidad diésel comercial (kg/m³)
HDPE	779.97 ± 8.28	710 - 770	820 - 845
HDPE + ZnO	769.70 ± 6.86		
HDPE + Zeolitas ZSM-5	755.83 ± 3.97		

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 4 se observan los resultados de densidad de las muestras de combustible líquido obtenido de pirolisis. La estadística completa se encuentra en el Cuadro 30 (ver Anexos página 102). Los valores de combustibles comerciales fueron obtenidos de las especificaciones ASTM D4814, y el estándar europeo EN 590.

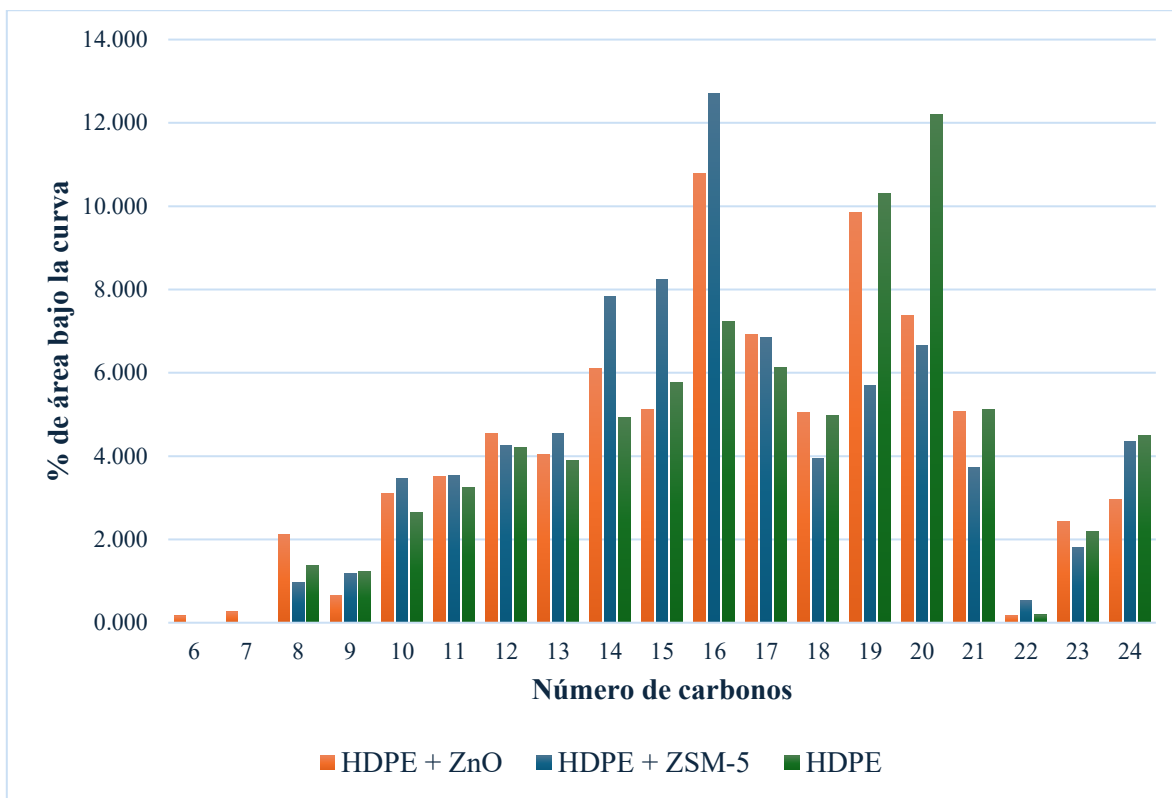
Cuadro 5. Resultados de poder calorífico del combustible líquido obtenido de la pirólisis de HDPE

Pirólisis	Poder calorífico (J/g)	Poder calorífico gasolina comercial (J/g)	Poder calorífico diésel comercial (J/g)
HDPE	46790.67 ± 1.73	44000 - 46000	43000 - 44000
HDPE + ZnO	46550.00 ± 1.73		
HDPE + Zeolitas ZSM-5	46030.00 ± 1.73		

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 5 se observan los poderes caloríficos de las muestras de combustible líquido, la estadística completa se encuentra en el Cuadro 31 (ver Anexos página 103). Los valores de poder calorífico de combustibles comerciales fueron obtenidos de las especificaciones ASTM D4814, y el estándar europeo EN 590.

Figura 19. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y zeolitas ZSM-5



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 19 se observa la distribución de compuestos de los productos líquidos obtenidos de pirólisis en base al porcentaje de área bajo la curva que representan según la cantidad de carbonos de los componentes. Las distribuciones se encuentran en Figura 43, Figura 44 y Figura 45 (ver Anexos página 127).

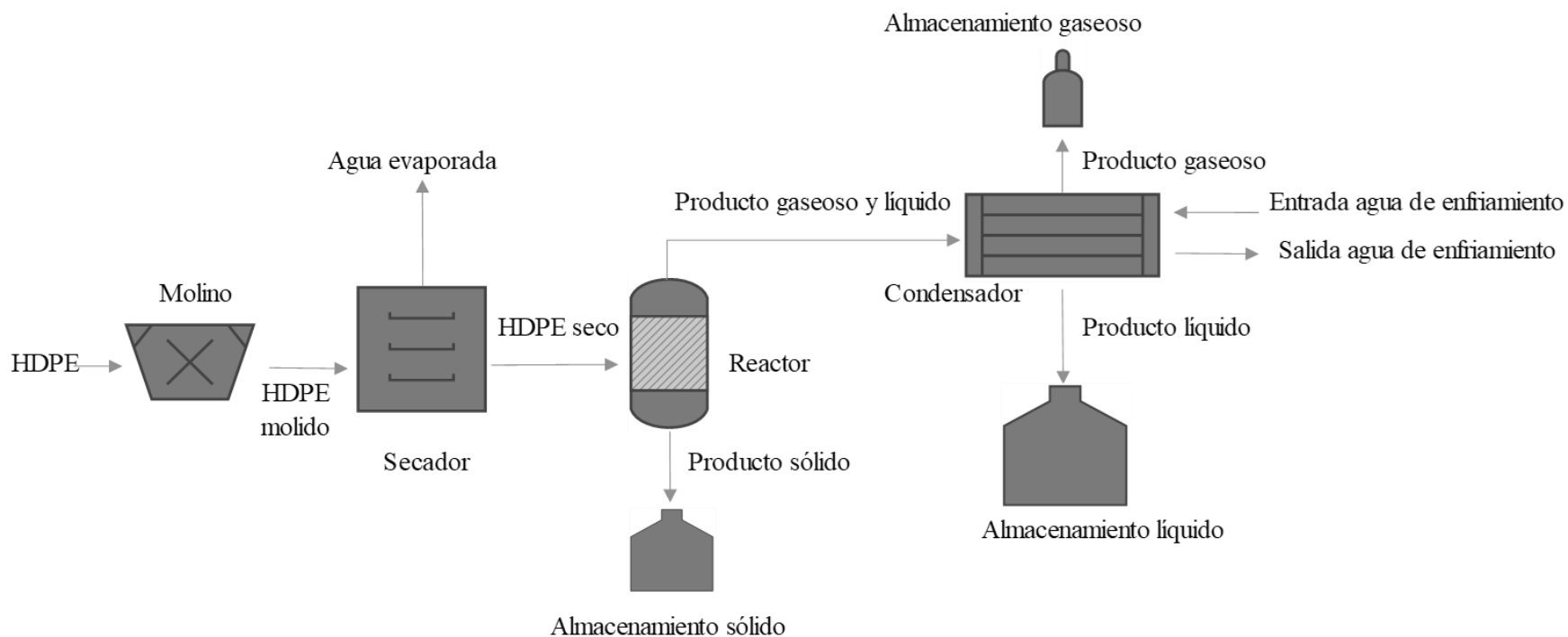
Cuadro 6. Operaciones unitarias para el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad catalizada con óxido de zinc y Zeolitas ZSM-5

Proceso	HDPE sin catalizador	HDPE con ZnO	HDPE con zeolitas ZSM-5	Principio de dimensionamiento
Operaciones unitarias	Molienda			Tamaño de partícula inicial y final, propiedades del material
	Transporte de sólido			Propiedades del material y distancia de transporte.
	Secado			Humedad inicial del polímero y coeficientes de transferencia de calor
	Transporte de sólido			Propiedades del material y distancia de transporte.
	-	Mezclado/extrusora		Propiedades fisicoquímicas del catalizador y el material, propiedades térmicas del material.
	Reacción			Cinética de reacción y propiedades de transferencia de calor
	-	Tamizaje		Tamaño de partícula del producto sólido y catalizador
	Condensación			Condiciones térmicas del producto de pirólisis
	Transporte			Propiedades del producto líquido y gaseoso de pirólisis y distancia de transporte.
	Almacenamiento			Propiedades fisicoquímicas de los productos sólidos, líquidos y gaseosos

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 6 se observa la propuesta de las operaciones unitarias planteadas para los procesos de pirólisis de HDPE, HDPE catalizada con ZnO y HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5.

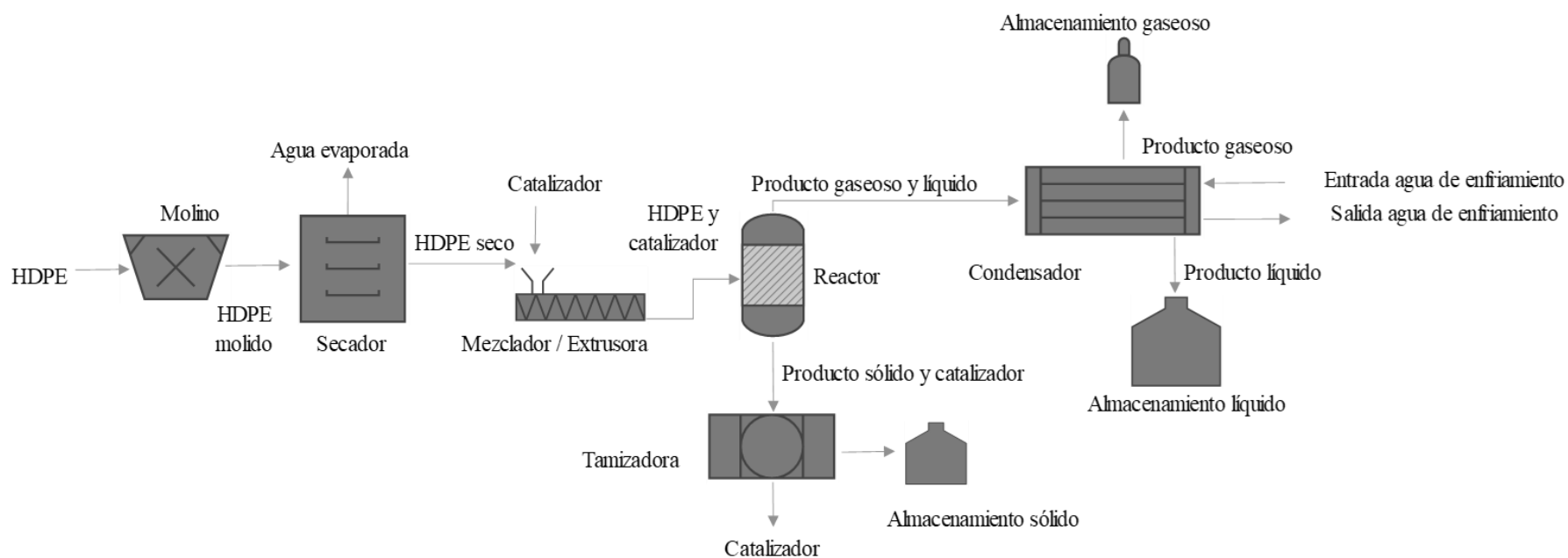
Figura 20. Esquema de propuesta de operaciones unitarias para pirólisis de HDPE



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 20 se observa el esquema de la propuesta de las operaciones unitarias planteadas para el proceso de pirólisis de HDPE.

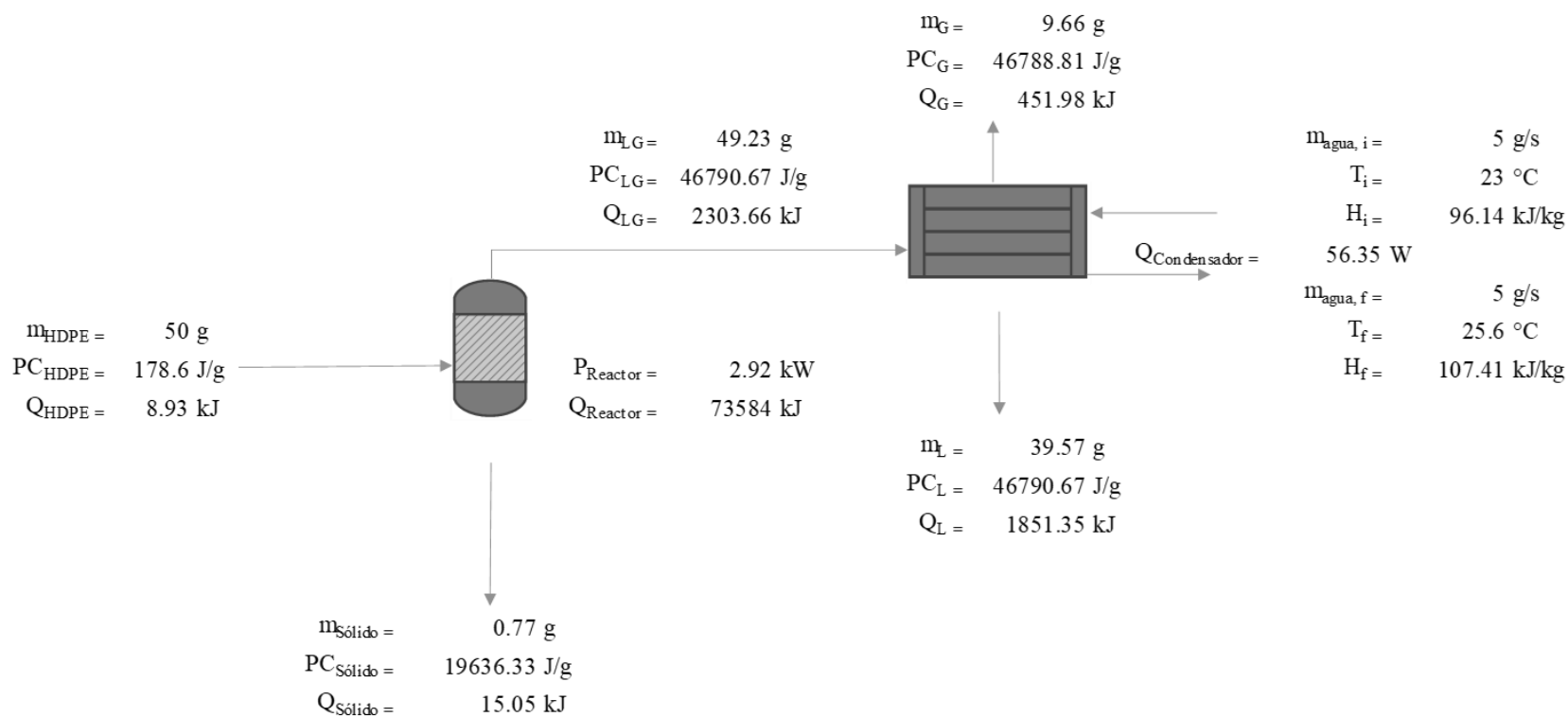
Figura 21. Esquema de propuesta de operaciones unitarias para pirólisis de HDPE catalizada



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 21 se observa el esquema de la propuesta de las operaciones unitarias planteadas para los procesos de pirólisis de HDPE catalizada.

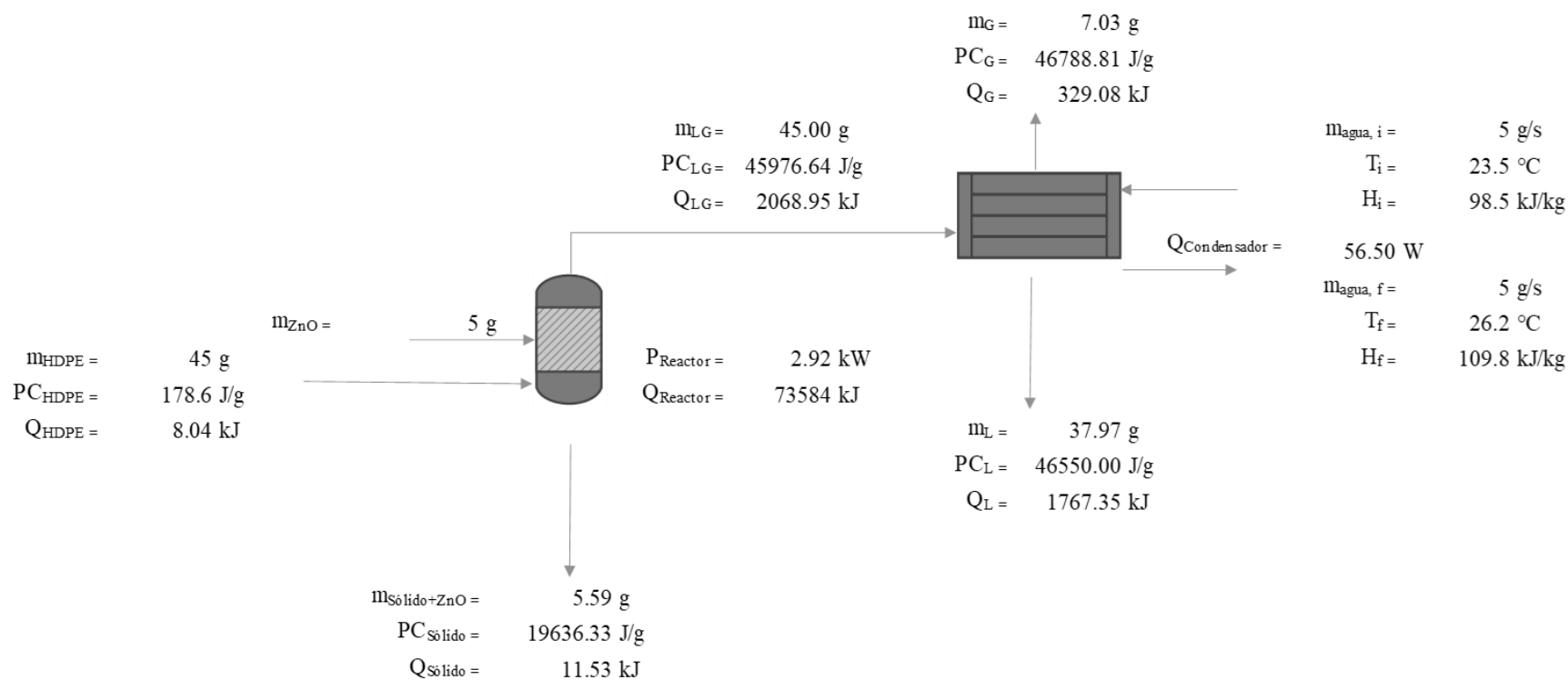
Figura 22. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 22 se observa el diagrama del balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE. Este balance se llevó a cabo en la pirólisis utilizando una masa de muestra inicial de 50 g.

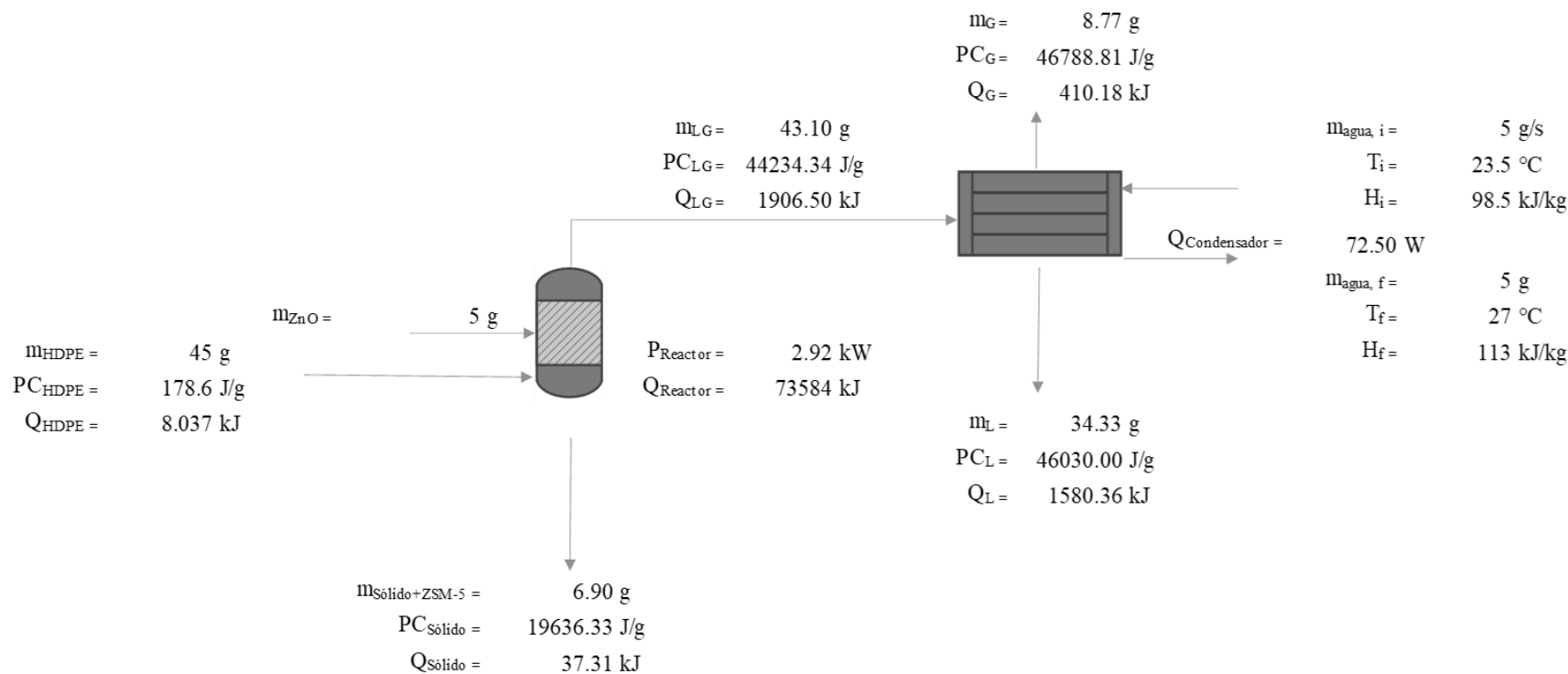
Figura 23. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 23 se observa el diagrama del balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO. Este balance se llevó a cabo en la pirólisis utilizando una masa de muestra inicial de 45 g y 5 g de ZnO.

Figura 24. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 24 se observa el diagrama del balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5. Este balance se llevó a cabo en la pirólisis utilizando una masa de muestra inicial de 45 g y 5 g de zeolitas ZSM-5.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este estudio consistió en llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) utilizando como catalizadores óxido de zinc y zeolitas ZSM-5, para evaluar la obtención de combustible líquido. Se realizaron 3 corridas de pirólisis sin catalizador, 3 empleando ZnO y 3 con Zeolitas ZSM-5, para un total de 9 corridas experimentales, según el cálculo de muestra para población infinita (ver cálculo 1). Para esto se requirió el montaje de un sistema de pirólisis en la que se empleó una mufla como fuente de calor para el reactor de pirólisis (Figura 9, en página 32). Dicho reactor a escala laboratorio tiene un diámetro de 9.5 cm, y un largo de 21 cm, 1.48 L de volumen, es de acero inoxidable 304 DN 50, cuenta con una apertura de 13mm de diámetro con un acople de ¼" soldado al reactor, que tiene chimenea donde se da el escape de los gases hacia el sistema de condensación. Para esta aplicación se acopló un condensador de un kit de destilación de laboratorio, debido a la escala a la que se trabajó, empleándose una muestra inicial de 50 g de HDPE en las primeras 3 corridas y 45 g en las siguientes 6 corridas.

La adición de catalizadores en proporciones cercanas al 10 % en masa con respecto al polímero base favorece el craqueo térmico de residuos plásticos sin saturar el sistema ni dificultar la separación posterior del catalizador, según estudios. La selección de esta concentración se basa en un equilibrio entre potenciar los efectos catalíticos como la reducción de la temperatura de degradación, el aumento del rendimiento del producto líquido, la alteración de la distribución de fracciones hidrocarbonadas y la viabilidad operativa del proceso. En un estudio al utilizar zeolitas ZSM-5 en proporciones de 5 a 15 % m/m se obtuvo que empleando 10 % m/m se producía un mayor rendimiento de producto líquido sin generar excesiva formación de coque (Aguado et al., 2008). De igual manera, investigaciones con óxidos metálicos como ZnO han demostrado que dosis similares permiten obtener aumento en la selectividad sin afectar la estabilidad térmica del sistema (Syamsiro et al., 2014).

Para considerar las temperaturas a las cuales trabajar se realizaron análisis termogravimétricos de las muestras de HDPE, con la ayuda de CETEC de Cementos Progreso, ya que no se contaba con el equipo especializado para cuantificar pérdida de masa a condiciones de aumento de temperatura elevadas, estos se pueden observar en Figura 25 – Figura 33 (página 70). La forma sigmoidea de las curvas termogravimétricas obtenidas refleja el comportamiento térmico del HDPE durante la degradación. Generalmente, se observa una única caída abrupta en la masa del polímero, característica de materiales como el HDPE que presentan una etapa principal de descomposición térmica asociada a la ruptura de las cadenas poliméricas. Esta caída se produce sin etapas intermedias, lo que indica una degradación homogénea y rápida del polímero una vez alcanzada la temperatura de degradación. En el caso de la muestra con zeolita ZSM-5, la curva inicia a temperaturas más bajas, evidenciando una descomposición más rápida. Esto se debe a la acción catalítica de la zeolita, que al ofrecer sitios ácidos y porosos facilita la escisión de enlaces C–C mediante mecanismos de β -scisión

y cracking catalítico. En contraste, la curva del HDPE sin catalizar y la del HDPE con ZnO muestran una pérdida de masa a temperaturas más altas, lo cual indica que la presencia del ZnO no acelera la cinética de descomposición térmica. Estas observaciones están en concordancia con la literatura, donde se reporta que catalizadores como ZSM-5 influyen en la temperatura y mecanismo de degradación, promoviendo una descomposición más temprana y selectiva hacia productos de menor peso molecular (Miandad et al., 2019).

Cómo se puede observar en la Figura 10 y el Cuadro 1 (página 37), según los análisis termogravimétricos realizados a las muestras de polietileno de alta densidad (HDPE) se obtuvo un intervalo de temperatura de degradación promedio de entre 396.67 y 488.33 °C, similar al de la muestra de HDPE y catalizador óxido de zinc (en una proporción de 10 % m/m) de entre 405.00 y 488.33 °C. En el caso de la muestra con catalizador zeolita ZSM-5 al 10 % m/m, se obtuvo un intervalo de entre 308.33 y 460 °C (ver Figura 12 y Cuadro 1, en página 38). La diferencia de los intervalos de degradación entre la muestra de HDPE y la catalizada con óxido de zinc, demuestra que el catalizador no tiene efecto en la disminución de energía de activación de la reacción (como se detallará más adelante). En el caso de la catalizada con zeolitas ZSM-5, se muestra un decrecimiento en la temperatura inicial y final de la degradación de las muestras, como lo esperado al aumentar los sitios activos de reacción del material. En base a los análisis termogravimétricos realizados, se estableció una temperatura inicial en la pirólisis tanto para HDPE sin catalizador, como de HDPE catalizada con óxido de zinc de 390 °C, mientras que para la catalizada con zeolitas ZSM-5 de 330 °C. Se estableció una rampa de temperatura de 8 °C cada 30 minutos, en base a la evaluación de distintas rampas de temperatura en la pirólisis de HDPE, ya que representó un mayor rendimiento en el producto líquido recuperado según Zachrisson, (2024). Aunque en este contexto, se recomienda la realización de un estudio de otros factores que pueden afectar el proceso como lo son la concentración de catalizador, rampas de temperaturas, tipo de catalizador e incluso una mezcla de diferentes catalizadores, para la evaluación de la obtención de un rendimiento de producto líquido mayor.

Los rendimientos experimentales obtenidos en los tres procesos de pirólisis, empleando masas iniciales de 50 g (sin catalizador) y de 45 g (corridas con catalizador), evidencian el efecto que los catalizadores ejercen sobre la conversión del HDPE, al observar en el Cuadro 2 (página 39). El mayor rendimiento de producto líquido se logró en la catalizada con óxido de zinc (ZnO), alcanzando un 84.37 ± 0.34 % m/m, seguido por la pirólisis sin catalizador con 79.13 ± 0.61 % m/m, mientras que la catalizada con zeolita ZSM-5 presentó el valor más bajo, con 76.30 ± 1.05 % m/m. Este comportamiento se ve respaldado por el análisis estadístico mostrado en el Cuadro 23 (página 97), donde al realizar un análisis de varianza se obtuvieron valores de F y p que confirman diferencias estadísticamente significativas tanto entre HDPE y HDPE + ZnO ($p = 0.0002$) como entre HDPE y HDPE + ZSM-5 ($p = 0.0155$), utilizando un valor de ($\alpha=0.05$). Esto implica que los cambios en los rendimientos líquidos no son atribuibles al azar, sino al efecto real de los catalizadores sobre la conversión del polímero. Estos resultados indican que el ZnO actúa facilitando la ruptura

de cadenas del polímero, favoreciendo la formación de hidrocarburos líquidos. La utilización de catalizadores metálicos como ZnO tienen una acción promotora del craqueo térmico al reducir la energía de activación de las reacciones involucradas, incrementando así el producto líquido del proceso (Ahmad et al., 2017). Por el contrario, la reducción en el rendimiento líquido en la muestra con ZSM-5 puede estar relacionada con su elevada acidez y microporosidad, que tienden a inducir una mayor formación de gases y coque debido a reacciones secundarias intensas (Al-Salem et al., 2017). Por otro lado, al observar en el Cuadro 21 (página 96), el análisis estadístico de dicho valores indica que las corridas de pirólisis con zeolitas presentaron un coeficiente de variación mayor (del 1.38 % m/m), con respecto a las de HDPE de 0.77 % m/m y con ZnO de 0.40 % m/m. Por lo que al emplear ZnO de catalizador se obtienen resultados con menor variación y de mejor rendimiento de combustible líquido.

Respecto al rendimiento de producto gaseoso, se observó un comportamiento inverso: la mayor producción de gases se dio en la pirólisis catalizada con ZSM-5 (19.48 ± 1.05 % m/m), seguida por la muestra sin catalizador (19.33 ± 1.01 % m/m), y la menor fue para la muestra con ZnO (14.32 ± 0.27 % m/m). Este patrón confirma que la zeolita ZSM-5, debido a sus características estructurales y elevada acidez, promueve reacciones de deshidrogenación y craqueo profundo, favoreciendo la generación de hidrocarburos gaseosos ligeros (Yang et al., 2024). Además, el bajo rendimiento gaseoso en presencia de ZnO sugiere una mayor estabilidad del proceso hacia la formación de líquidos, posiblemente por su capacidad de suprimir reacciones radicalarias indeseadas. Este comportamiento diferenciado permite concluir que la elección del catalizador no solo modifica la cantidad total de productos, sino también su distribución de fases, como se detallará más adelante en cuanto a la distribución de los compuestos según las cromatografías de gases masa (GC-MS), realizadas al producto líquido.

En cuanto al rendimiento de producto sólido también varió entre las condiciones experimentales. La mayor formación de sólidos se presentó con el uso de ZSM-5 (4.22 ± 0.44 % m/m), mientras que la menor fue con ZnO (1.31 ± 0.60 % m/m), y en la pirólisis sin catalizador fue de 1.53 ± 0.46 % m/m. El incremento de residuo sólido con la zeolita podría deberse a la deposición de carbono sobre los sitios activos del catalizador, lo que también explicaría su progresiva desactivación durante la reacción (Yang et al., 2024). Este fenómeno es común en materiales catalíticos con microporosidad elevada, donde las moléculas grandes se retienen, se polimerizan o ciclan, generando residuos carbonosos. En cambio, la baja formación de sólidos en la muestra con ZnO demuestra que este catalizador mantiene una selectividad hacia productos líquidos, con menor generación de residuos. En el caso de los procesos catalíticos se determinó el rendimiento de producto sólido por medio de un balance de masa, al no incluir la separación del catalizador empleado de la ceniza remanente en el reactor. Por lo que, se recomienda la separación de dicha mezcla empleando una tamizadora según el tamaño de partícula, o bien considerando la utilización de la mezcla de ceniza-catalizador en un proceso de pirólisis posterior para la evaluación de su viabilidad y

desactivación del catalizador. También se podría considerar la separación al llevar a cabo un análisis granulométrico de la mezcla para comparar la separación de ambos catalizadores empleados, del producto sólido de la pirólisis.

Las curvas de pirólisis presentadas en: Figura 13, Figura 14 y Figura 15 (página 39) muestran el comportamiento térmico del proceso en función del tiempo y temperatura. Con el software Microsoft Excel se tienen las líneas suavizadas para los datos experimentales obtenidos (puntos) de las rampas de temperatura (línea azul), masa de producto líquido recolectado (curva naranja), masa de HDPE degradado (curva celeste) y masa de gas producido (curva verde), las últimas dos se calcularon con balance de masa a partir del producto líquido obtenido. En el caso de la Figura 13 (página 39), la masa de producto líquido permanece prácticamente constante en las primeras 2 rampas de aumento de temperatura, lo que indica que aún no se alcanza la temperatura suficiente para la descomposición significativa del polímero. A partir de este punto, se observa un incremento progresivo y pronunciado en la masa de combustible líquido sobre todo entre los 400 y 430 °C, lo que sugiere que se activa la despolimerización térmica del HDPE en un rango crítico de temperaturas. Finalmente, la curva de masa se estabiliza nuevamente, lo que indica que la mayor parte del material volátil ha sido convertida y recolectada, alcanzando el rendimiento total del proceso bajo las condiciones experimentales utilizadas.

En la Figura 14 (página 40), al utilizar ZnO como catalizador, se observa un comportamiento similar, pero con un aumento de la masa de producto líquido hasta en la tercera rampa, aunque el intervalo de mayor aumento fue entre 406 y 446 °C. Para el caso de la muestra catalizada con Zeolitas ZSM-5 (Figura 15, página 40), se inició el proceso desde una temperatura de 330 °C, iniciando a obtener un aumento de producto líquido en la tercera rampa, y un intervalo de recolección de producto líquido elevado entre los 330 y 365 °C. Esta reducción significativa en la temperatura operativa en presencia de zeolitas representa una ventaja técnica importante en términos de consumo energético, ya que implica menores requerimientos de calor para alcanzar la despolimerización del HDPE.

El análisis cinético realizado para los tres sistemas demostró diferencias en los parámetros obtenidos, al observar en el Cuadro 3. La energía de activación (E_a) fue mayor en la pirólisis catalizada con ZnO (230877.1 ± 928.90 J/mol), pero muy similar al proceso sin catalizador de 230148.19 ± 1777.04 J/mol. En cambio, la diferencia fue más notoria en el proceso con ZSM-5 (199716.36 ± 2749.00 J/mol), una zeolita cuya acidez y estructura porosa favorecen mecanismos de β -scission y cracking catalítico a menor temperatura. Esto indica una potencial mejora de eficiencia de la energía de activación. No obstante, la presencia de catalizadores puede influir no solo en el término energético de la reacción, sino también en el entrópico, modificando el grado de orden/desorden en el estado de transición. En este caso la entropía del sistema aumenta, al favorecer la formación de más especies intermedias y productos de reacción, como se detallará más adelante según la distribución de productos obtenidos en los productos.

La constante de frecuencia (A) se mantuvo en el orden de 10^{25} en los tres sistemas, aunque fue menor para los catalizados. Según la ecuación de Arrhenius, esta constante representa la frecuencia de colisiones exitosas entre moléculas; sin embargo, su interpretación debe hacerse junto a E_a , ya que valores elevados de A pueden compensar barreras energéticas altas. En este caso, el descenso de A en los procesos catalizados es congruente con la menor E_a , reflejando un sistema cinético más accesible para la conversión del polímero. Respecto al orden de reacción (n), en la pirólisis térmica se obtuvo un valor de 2.1488 ± 0.0166 , lo que indica una cinética compleja y no elemental, posiblemente asociada a la superposición de múltiples mecanismos de degradación (Predel & Kaminsky, 2000). Con el uso de ZnO y ZSM-5, los órdenes de reacción obtenidos fueron 2.1389 ± 0.0087 y 2.1516 ± 0.0296 respectivamente, valores muy cercanos al comportamiento térmico. Esto sugiere que, aunque los catalizadores influyen en el proceso, no modifican drásticamente la dependencia de la velocidad respecto a la conversión, pero sí pueden facilitar rutas reactivas en superficie que hacen la degradación más eficiente sin alterar la complejidad cinética del sistema. El peso de sólido final (Wf) propuesto para el ajuste del modelo fue más alto en la pirólisis con ZSM-5 (0.5000 ± 0.0069 g), a pesar de haber obtenido experimentalmente un peso de sólido final mayor. Mientras que para el proceso sin catalizador fue de 0.2077 ± 0.0016 g y para el proceso con ZnO de 0.2000 ± 0.0008 g.

Las curvas generadas en el software Berkeley Madonna (Figura 16, Figura 17 y Figura 18, en la página 41) contienen datos de: masa de HDPE dentro del reactor (color verde), producto líquido (color amarillo), sólido (color celeste) y gaseoso (color morado) a visualizarse en el eje vertical derecho, en unidades de gramos. Además, también contiene las rampas de temperatura (color azul) en el eje vertical izquierdo en $^{\circ}\text{C}$, con respecto al tiempo en el eje horizontal (en minutos). Los puntos representan datos experimentales obtenidos: color negro el combustible líquido generado y los rojos la temperatura. Dichas curvas fueron obtenidas por medio de la parametrización con la ecuación de Arrhenius y el modelo de gradiente de temperatura. La comparación entre los datos experimentales y los modelos cinéticos muestra una correlación, con coeficientes de determinación (R^2) de 0.9990 para el HDPE sin catalizador, 0.9981 para HDPE con ZnO, y 0.9973 para HDPE con ZSM-5. Estos valores indican un ajuste muy apegado entre los datos experimentales y el modelo cinético empleado, lo cual valida el uso de este. Se observa que las curvas simuladas replican adecuadamente los perfiles de generación de productos, en particular el combustible líquido, cuyo comportamiento sigue muy de cerca los puntos experimentales (puntos negros). Esta concordancia sugiere que los modelos son adecuados para describir la cinética del proceso, y pueden ser útiles para predecir el rendimiento bajo otras condiciones operativas.

Desde una perspectiva energética, operar a temperaturas más bajas reduce considerablemente el gasto de combustible o electricidad en los sistemas de calentamiento. Esto puede traducirse no solo en una disminución directa en los costos operativos, sino también en un menor desgaste de los materiales del reactor, menor necesidad de aislamiento térmico, y una reducción del impacto ambiental asociado al uso intensivo de energía.

Además, operar a menor temperatura puede tener implicaciones positivas en la selectividad del proceso. A temperaturas más moderadas, es posible reducir las reacciones secundarias no deseadas como la formación excesiva de gases o la carbonización, mejorando la calidad del producto líquido recuperado. Por lo que se recomienda realizar un análisis de costos energéticos comparando los catalizadores empleados en el proceso.

Los resultados de densidad del producto líquido obtenido, al observar en el Cuadro 4 (página 44), fueron: para la muestra sin catalizador de $779.97 \pm 8.28 \text{ kg/m}^3$, mientras que al utilizar óxido de zinc (ZnO) en una proporción del 10 % m/m, la densidad disminuyó ligeramente a $769.70 \pm 6.86 \text{ kg/m}^3$. Por otro lado, al utilizar zeolitas ZSM-5, se obtuvo la menor densidad, con un valor de $755.83 \pm 3.97 \text{ kg/m}^3$. Estos resultados son consistentes con estudios previos que han demostrado que el uso de catalizadores como las zeolitas tiende a favorecer la formación de productos más ligeros y con menor densidad, debido a su capacidad para promover el craqueo de cadenas largas de hidrocarburos en compuestos más volátiles y de menor masa molecular inferiores (Syamsiro et al., 2014). Mientras que para el producto de pirólisis de HDPE se obtuvo un producto más denso, al tratarse de un proceso sin adición de ningún agente que ayudara en la conversión del producto, además del calor adicionado.

Comparando estos valores con los rangos de densidades comerciales de combustibles líquidos, según la norma ASTM D4814, se observa que el producto de la pirólisis de HDPE presenta una mayor cercanía al rango de densidad de la gasolina comercial ($720\text{--}770 \text{ kg/m}^3$), especialmente en el caso de la ZSM-5. Esta diferencia sugiere la obtención de más proporción de fracciones ligeras en los productos de la muestra catalizada con zeolitas, lo cual también concuerda con los resultados de mayor rendimiento gaseoso y sólido (19.48 % m/m y 4.22 % m/m), lo que indica una pirólisis con mayor rompimiento de cadenas. La densidad y el poder calorífico del combustible están inversamente relacionados con el índice de octano, ya que los compuestos más densos y energéticos, como los alcanos de cadena larga, tienden a tener un menor octanaje y una mayor tendencia a la detonación. En cambio, combustibles con menor densidad y poder calorífico, compuestos en su mayoría por hidrocarburos ramificados o insaturados, suelen presentar un mayor octanaje y mejor comportamiento antidetonante (Grimaldi & Millo 2015).

La concordancia de estos datos con los rendimientos de producto líquido y las temperaturas de pirólisis previamente analizadas demuestran que la muestra catalizada con ZSM-5 presentó una degradación a menor temperatura (iniciando a 330°C) y un menor rendimiento de producto líquido (76.30 % m/m), lo que se traduce en productos más volátiles y de menor densidad. Esta tendencia, sumada al hecho de que el catalizador de ZnO permitió el mayor rendimiento de producto líquido (84.37 % m/m) con una densidad intermedia, sugiere que este catalizador podría ser más adecuado cuando el objetivo es aumentar la producción de combustibles líquidos, ambos con propiedades cercanas a la gasolina comercial.

Los resultados del poder calorífico muestran valores elevados que reflejan un alto contenido energético (Cuadro 5 página 44). La muestra sin catalizador alcanzó el mayor poder calorífico con 46790.67 ± 1.73 J/g, seguido por la muestra catalizada con ZnO (46550.00 ± 1.73 J/g) y finalmente por la muestra con zeolitas ZSM-5 (46030.00 ± 1.73 J/g). Estos valores son comparables a los de los combustibles fósiles tradicionales: la gasolina comercial presenta un poder calorífico de aproximadamente 44000 a 46000 J/g, mientras que el diésel se encuentra entre 43000 y 44000 J/g (ASTM D4814, 2023; EN 590, 2023). Por tanto, los productos líquidos obtenidos mediante pirólisis tienen un contenido energético superior al de ambos combustibles comerciales, lo cual es un indicador favorable de su viabilidad como fuente alternativa de energía.

La ligera disminución en el poder calorífico observada al utilizar catalizadores puede atribuirse a la influencia que estos tienen sobre la selectividad de la pirólisis. El uso de zeolitas ZSM-5, por ejemplo, promueve la formación de compuestos más livianos y aromáticos, así como un incremento en el rendimiento gaseoso, lo que conlleva a la producción de líquidos con fracciones más ligeras y de menor densidad energética (Aguado et al., 2008; Onwudili et al., 2009). Asimismo, se ha reportado que la descomposición catalítica favorece el craqueo de cadenas largas en compuestos menos complejos, lo cual, aunque mejora la calidad del combustible en términos de volatilidad y combustión limpia, puede disminuir su poder calorífico en comparación con productos más densos y pesados como los obtenidos sin catalizador. Esto concuerda con lo observado en el presente estudio, donde la muestra sin catalizador mostró el mayor valor energético.

Estos resultados también se encuentran relacionados con otros parámetros analizados, como la densidad y los rendimientos. Por ejemplo, el producto líquido sin catalizador no solo tuvo el mayor poder calorífico, sino también una densidad mayor (779.97 kg/m³) y un rendimiento líquido considerable (79.13 % m/m), lo que sugiere la formación de hidrocarburos más pesados, lineales y saturados, característicos de un contenido energético alto. En cambio, los productos obtenidos con catalizadores, particularmente con ZSM-5, mostraron menor densidad y poder calorífico, y una mayor producción de productos sólidos y gaseosos, reflejando un craqueo más profundo del polímero. Por tanto, si bien el uso de catalizadores puede ser ventajoso para modificar la selectividad o reducir la temperatura de operación, desde el punto de vista energético bruto, los productos sin catalizar mantienen una mayor concentración de energía por unidad de masa. Mientras que para la muestra con ZnO, se encuentra en medio de los parámetros analizados, pero con un aumento significativo del rendimiento de producto líquido.

Empleando análisis de cromatografía de gases masa (GC-MS), se realizó la distribución de compuestos de los productos líquidos obtenidos de pirólisis en base al porcentaje de área bajo la curva que representan según la cantidad de carbonos de los componentes. Se obtuvieron tendencias esperadas en cuanto a la cantidad de carbonos de las moléculas en los tres diferentes procesos. Como se puede observar en Cuadro 33, Cuadro 34

y Cuadro 35 (página 104), el listado de componentes en los cromatogramas de gases masa de pirólisis de HDPE al ser un polímero lineal de largas cadenas de carbono saturadas, el principal tipo de productos formados durante su descomposición térmica fueron alcanos de cadena larga, seguidos de alquenos en menor proporción, debido a la ruptura de enlaces C–C mediante reacciones de escisión aleatoria y β -eliminación (Aguado et al., 2008). En la Figura 19, se observa que la mayoría de los compuestos detectados corresponden a cadenas hidrocarbonadas entre C12 y C21, lo cual es coherente con la literatura, que reporta una alta proporción de hidrocarburos en ese rango cuando se utiliza HDPE como materia prima (Syamsiro et al., 2014).

Para establecer qué compuestos se incluirían en el análisis comparativo, se utilizó el principio de Pareto, seleccionando únicamente aquellos picos del cromatograma con mayor área relativa hasta alcanzar el 80 % del área total de la curva. Esto permitió enfocar el análisis en los compuestos más representativos de la muestra. Esta metodología se aplica en análisis de espectros de masas para evitar el sesgo introducido por compuestos traza o artefactos de la detección (Palma et al., 2023; Gómez, 2007). La muestra sin catalizador mostró una curva más equilibrada, con altos porcentajes en hidrocarburos de C19 y C20, destacando la producción de compuestos lineales saturados como el hexadecano, nonadecano y eicosano, los cuales corresponden al perfil esperado de un polímero de origen lineal térmicamente degradado (según Cuadro 33, Cuadro 34 y Cuadro 35 página 104).

Al emplear óxido de zinc como catalizador, se observa un ligero desplazamiento de la distribución hacia compuestos más pesados, en especial en la fracción C16 y C19. Esto se debe a la actividad catalítica del ZnO para romper cadenas en fracciones más pequeñas, debido a su limitado número de sitios ácidos comparado con las zeolitas (Zhou et al., 2022). Este comportamiento concuerda con los resultados de rendimiento obtenidos, donde el ZnO favoreció la formación de mayor producto líquido, pero sin una modificación significativa en la distribución de pesos moleculares, lo que sugiere que promovió la descomposición sin un craqueo intensivo. Adicionalmente, se observaron compuestos como el octadecano y eicoseno, que podrían estar relacionados con reacciones de deshidrogenación y olefinación en condiciones catalíticas suaves (ver Cuadro 36, Cuadro 37 y Cuadro 38 de Anexos página 113). El uso de catalizadores modifica no solo la cinética de craqueo, sino también el perfil entrópico del sistema, ya que promueve la formación de una mayor diversidad de compuestos intermedios y finales, aumentando el desorden molecular en el estado de transición. Este incremento entrópico puede reflejarse en una disminución de la energía libre de Gibbs (ΔG) para ciertas rutas de reacción, haciendo termodinámicamente más favorables las transformaciones hacia productos de menor peso molecular o de mayor grado de insaturación. Por lo que se recomienda la realización de un estudio para evaluar el cambio entrópico del sistema en los procesos, para estudiar la dependencia de la estructura química obtenida respecto del uso de catalizadores.

Por otro lado, la muestra catalizada con zeolitas ZSM-5 mostró una distribución de hidrocarburos notablemente diferente. Se detectó un aumento de compuestos de menor peso molecular (C14–C16). Estos resultados son consistentes con otros estudios que reportan que las zeolitas con estructura MFI, como la ZSM-5, generan productos más ligeros y de mayor valor agregado, como naftas o fracciones tipo gasolina (Chen et al., 2014). Aunque el rendimiento líquido global fue menor en comparación con el ZnO, la calidad y valor potencial del producto generado con ZSM-5 podrían ser superiores en aplicaciones energéticas o petroquímicas que impliquen el uso del producto gaseoso de la pirólisis. Tomando en cuenta esta evidente diferencia entre los compuestos del producto líquido de pirólisis, se podría realizar un análisis empleando diferentes rampas de temperatura en los procesos y evaluar su influencia en dicha distribución de compuestos.

El Cuadro 6 contiene las principales operaciones unitarias involucradas en el proceso de pirólisis de HDPE tanto sin catalizador como catalizado con ZnO y zeolitas ZSM-5, así como también los esquemas de ambos (Figura 20 y Figura 21); destacando además los principios de dimensionamiento asociados. Se observa que el proceso más sencillo corresponde al HDPE sin catalizador, ya que no requiere etapas como mezclado o tamizaje intermedio, lo cual se debe a la ausencia de materiales sólidos adicionales. En contraste, cuando se utilizan catalizadores heterogéneos como ZnO o ZSM-5, es necesario considerar etapas adicionales como la mezcla o extrusión previa a la reacción, con el fin de garantizar una distribución homogénea del catalizador en la matriz polimérica, lo cual influye directamente en la eficiencia de contacto y la cinética del proceso. Se contempló iniciar con molienda para los 3 procesos de pirólisis, tomando en cuenta que para su dimensionamiento se tendría que establecer un tamaño de partícula inicial y final del HDPE, así como también las propiedades del material en cuanto a dureza, resistencia térmica, etc. Las condiciones del equipo se deben establecer tomando en cuenta la reducción eficiente del tamaño de partícula sin inducir fusión térmica prematura del polímero, ya que el cizallamiento del material puede provocar calentamiento excesivo, que sería contraproducente en la operación. Luego se tiene un proceso de transporte del sólido que podría ser de carácter mecánico, dependiendo de las propiedades del material y distancia de transporte. El secado previo del HDPE es crucial para garantizar una pirólisis más eficiente, ya que la presencia de agua puede afectar la cinética de degradación y alterar la distribución del producto. En este contexto, se debe tomar en cuenta la humedad inicial del polímero y los coeficientes de transferencia de calor en el equipo, para conseguir la remoción de humedad sin degradación térmica del polímero.

Para la etapa de mezclado, se planteó un proceso de extrusión que permite formar una mezcla homogénea del polímero con aditivos o catalizadores (Barigou, 2004). El mezclado homogéneo es vital en la pirólisis catalítica para asegurar el contacto entre el HDPE y el catalizador, lo cual puede tener un impacto directo en la temperatura de inicio de degradación y en la selectividad del producto (Onwudili et al., 2009). Esta operación unitaria también funciona como transporte para una alimentación directa al reactor. No se consideró mezcla para la muestra sin catalizador debido a que no había interacción heterogénea que favorecer. En la etapa de reacción, se debe tener un reactor que pueda soportar las altas temperaturas de

operación que rondan los 500 °C, para su dimensionamiento se debe obtener la cinética de reacción y las propiedades de transferencia de calor dentro del reactor. La rampa de temperatura de 8 °C cada 30 minutos se podría considerar para determinar su escalamiento a partir de los datos experimentales obtenidos a escala laboratorio, según Zachrisson (2024).

El tamizaje se implementa especialmente en los procesos catalizados, con el objetivo de separar el catalizador sólido del residuo carbonoso o del producto sólido final, permitiendo su posible recuperación y reutilización, dependiendo del tamaño de partícula del producto sólido y del catalizador. Por lo que se recomienda la realización de un análisis granulométrico de la mezcla catalizador-ceniza después del proceso para evaluar su separación por tamizaje. La condensación es clave para transformar los vapores de productos generados en la reacción en combustible líquido recuperable, siendo su eficiencia altamente dependiente de las condiciones térmicas y del diseño del sistema de enfriamiento. Posteriormente, el transporte de líquido se encarga de movilizar este producto condensado hacia sistemas de almacenamiento, considerando parámetros como la viscosidad del líquido, la temperatura de operación y la distancia de transporte, así como también para el producto gaseoso. Finalmente, el almacenamiento de productos líquidos, sólidos y gaseosos requiere una cuidadosa selección de materiales y condiciones, tomando en cuenta la compatibilidad química, estabilidad del producto, y posibles riesgos asociados a su manipulación, lo cual garantiza la seguridad y calidad del producto final. Se podrían incluir tanques de acero inoxidable 304 para los productos líquidos y gaseosos, debido a su resistencia química y térmica, lo cual es esencial para evitar reacciones o contaminaciones post pirólisis, según normas ASTM D4057 para manejo de combustibles experimentales.

En cuanto a los balances de masa y energías realizados, en Figura 22, Figura 23 y Figura 24 (página 49), se comprende el proceso de pirólisis y condensación respectivo, con los valores máxicos empleados en el sistema, así como también los flujos energéticos empleados. En cuanto a términos energéticos, se demuestra que no se tiene una viabilidad directa del proceso de pirólisis para la producción de combustible líquido en los 3 casos. Debido a la gran cantidad de energía que se debe suministrar al reactor, siendo de 73,500 kJ, y obteniéndose un producto con un contenido energético de alrededor de los 2,000 kJ. Es por esto que se recomienda un estudio de comparación energética entre un proceso a escala laboratorio con un proceso a escala piloto donde los costos energético tienden a disminuir al aumentar la eficiencia de conversión. Así como también una comparación de catalizadores para determinar si los costos del proceso disminuyen al emplear catalizadores, y cuales opciones resultan más eficientes.

IX. CONCLUSIONES

- Por medio de los análisis termogravimétricos realizados, se obtuvo un intervalo de temperatura de degradación en °C de entre 396.67 ± 32.15 y 488.33 ± 7.64 , para la muestra de polietileno de alta densidad (HDPE), para la muestra de HDPE y catalizador óxido de zinc (en una proporción de 10 % m/m) de entre 405.00 ± 13.23 y 488.33 ± 2.89 ; estableciéndose como temperatura inicial de pirólisis los 390 °C y en el caso de la muestra con catalizador zeolita ZSM-5 al 10 % m/m, se obtuvo un intervalo en °C de entre 308.33 ± 33.29 y 460.00 ± 32.79 , iniciando el proceso de pirólisis en 330 °C, logrando disminuir la temperatura de degradación térmica del polímero en el proceso.
- El mayor rendimiento de producto líquido en los procesos de pirólisis estudiados se logró en la catalizada con óxido de zinc (ZnO), alcanzando un 84.37 ± 0.34 % (m/m), seguido por la pirólisis sin catalizador con 79.13 ± 0.61 % (m/m), mientras que la catalizada con zeolita ZSM-5 con 76.30 ± 1.05 % (m/m). Por el contrario, la muestra con ZSM-5 produjo una mayor formación de gases (con 19.48 ± 1.05 %) y producto sólido (4.22 ± 0.44 %) comparado con los demás procesos evaluados.
- Los valores de densidad de los productos líquidos de pirólisis fueron de 779.97 ± 8.28 kg/m³ para la muestra sin catalizador, con ZnO de 769.70 ± 6.86 kg/m³, y con ZSM-5 de 755.83 ± 3.97 kg/m³; encontrándose estos últimos dos dentro del intervalo para gasolina comercial según la norma ASTM D4814. Los resultados del poder calorífico se encontraron por arriba del intervalo de 44,000 – 46,000 J/g de la norma, siendo el más elevado de 46790.67 ± 1.73 J/g para la muestra sin catalizador. Las cromatografías de gases masa (GC-MS), indicaron que el producto líquido de pirólisis sin catalizador poseía un porcentaje mayor de compuestos C19 y C20, según la distribución de los picos con mayor área. La muestra con ZnO tenía una mayor área en la fracción C16 y C19, mientras que con Zeolitas ZSM-5 se detectaron en su mayoría hidrocarburos de menor peso molecular (C14–C16).
- Las operaciones unitarias propuestas para el proceso de pirólisis de HDPE sin catalizador incluye una unidad inicial de molienda, transporte de sólido, secado, reacción, condensación, transporte y almacenamiento de productos líquidos y gaseosos. Los procesos con catalizador incluyen además una unidad de mezclado/extrusión previo a la reacción y una de tamizaje para separar el producto sólido del catalizador.

X. RECOMENDACIONES

- Evaluar demás factores que puedan afectar en la pirólisis catalítica, como lo son la concentración de catalizador, el tipo de catalizador a utilizar, e incluso la mezcla de diferentes catalizadores, para evaluar la obtención de un rendimiento de producto líquido mayor.
- Hacer un estudio de diferentes rampas de temperatura en el proceso para determinar su influencia en la distribución de los compuestos del producto líquido (combustible) de pirólisis.
- Realizar una comparación desde el punto de vista de un análisis energético-económico, para determinar si los costos del proceso disminuyen al emplear catalizadores, y cuales opciones resultan más eficientes.
- Realizar un estudio del cambio entrópico del sistema al emplear catalizador para definir si existe una dependencia de la estructura química obtenida en los productos respecto al uso de catalizadores.
- Recuperar el catalizador de la mezcla ceniza-catalizador resultante del proceso sugiere la realización de un análisis granulométrico de dicha mezcla para evaluar la separación de los sólidos resultantes en base al tamaño de partícula de los componentes.
- Realizar el proceso de pirólisis con la mezcla ceniza-catalizador obtenida para identificar el efecto catalítico remanente de los catalizadores utilizados, así como también la posible inactivación según el uso dado.
- Diseñar e implementar una planta piloto del proceso de pirólisis que permita el estudio de diferentes catalizadores que permitan evaluar la influencia que tienen a una escala mayor.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, J., Serrano, D., Escola, J. (2008). Fuels from Waste Plastics by Thermal and Catalytic Processes: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(21), 7982–7992. <https://doi.org/10.1021/ie800393w>
- Ahmad, I., Khan, M., Khan, H., Ishaq, M., Khan, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2017). Pyrolysis of HDPE into fuel like products: Evaluating catalytic performance of plain and metal oxides impregnated waste brick kiln dust. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 195-203. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.02.005>
- Al-Salem, S., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197, 177–198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Amar, S., Ardila, A., & Barrera, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 306-326. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>
- Anderson, D., Sweeney, D., Williams, T., Camm, J., Cochran, J., Fry, J., & Ohlmann, J. (2012). *Statistics for Business & Economics* (11ª ed.). Cengage
- Andrady, A., & Neal, M. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- Aristegui, A. (s. f.). Método de extrusión: Su proceso y aplicación. <https://www.aristegui.info/metodo-de-extrusion-su-proceso-y-aplicacion/>
- ASTM D4814 (2023). *Standard Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel (ASTM D4814-25)*. ASTM International.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2010). *Physical chemistry* (9th ed.). Oxford University Press.
- Barigou, M. (2004). Particle tracking in opaque mixing systems: An overview of the capabilities of PET and PEPT. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(9), 1258-1267. <https://doi.org/10.1205/cerd.82.9.1258.44160>
- Basak, B., & Ghosal, P. (2010). Pyrolysis: a sustainable way to generate energy from waste. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(7), 614-627. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69036>
- Beltrán, M., & Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros procesado y propiedades*. Universidad de Alicante.

- Beston Group. (2025). Pyrolysis plant achieves successful installation in Guatemala. <https://bestongroup.com>
- Bridgwater, A. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Bustamante, B. (1994). La degradación de los plásticos. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- Buteler, M. (2019). ¿Qué es la contaminación por plástico y por qué nos afecta a todos? <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/109678>
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2011). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (8th ed.). Wiley.
- Campos, G. (2017). Estudio preliminar de la pirólisis catalítica de desechos plásticos para la obtención de combustibles. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/23235/1/Tesis%20Estudio%20preliminar%20de%20la%20pirólisis%20catalitica%20de%20desechos%20plásticos%20para%20la%20obtención%20de%20combustibles.pdf>
- Cardona, D., Lavernia, C., & Alcerro, J. (2010). Polietileno. <https://www.medigraphic.com/pdfs/ortope/or-2010/or102m.pdf>
- Castells, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste management*, 34(12), 2466-2486. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>
- Coulson, J., Richardson, J., Backhurst, J., & Harker, J. (1999). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering. Vol. 6: Chemical Engineering Design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Crawford, R., & Throne, J. (2002). *Rotational molding technology*. William Andrew.
- Díaz, F. (2020). Evaluación de la pirólisis como método para la obtención de combustibles a partir de residuos plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/entities/publication/379f02e9-7c34-49fe-b087-d78a258dfc6a>
- EN 590. (2023). Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods. https://www.intertekinform.com/preview/944565391074.pdf?sku=883793_saig_nsai

[nsai_3129707&srsId=AfmBOoryyHsGDuU02g4Nz-uMdhtFrsjZ78YjG5WJYQJymC3Pa-x2MhWi](#)

- Fogler, H. (2016). *Elements of chemical reaction engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Gabbott, P. (2008). *Principles and applications of thermal analysis*. Wiley Online Library.
- Geankoplis, C. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles* (4th ed.). Prentice Hall.
- Geyer, R., Jambeck, J., & Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi/10.1126/sciadv.1700782>
- Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite*. kassel university press GmbH
- Gómez, J. (2007). Ley de pareto: 80/20. <http://www.jggomez.eu/>
- Green, D., & Southard, M. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill Education
- Grimaldi, C., & Millo, F. (2015). *Handbook of clean energy systems*. John Wiley & Sons Limited.
- Grover, C., & Santamaría, G. (2023). Obtención de combustibles sintéticos a partir de residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) mediante simulación en Aspen Plus. <https://www.omniscens.com/index.php/rmec/article/download/25/44#page=65>
- Guachamín, C., & Castro, A. (2023). Obtención de combustibles a partir de la pirólisis de material plástico reciclado de polietileno de alta densidad (HDPE). *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.46296/ig.v6i11.0090>
- Gutiérrez, J. (2015). Modelado y simulación de un proceso de despolimerización vía pirólisis catalítica: Polietileno de alta densidad (PEADP). <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/327/1/Tesis%20MTP%20Jesus%20Zavala.pdf>
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- IEQSA. (2024). Óxido de zinc. <https://quimiprova.com/productos/materia-prima/>
- Illescas, J. (2024). Evaluación del rendimiento energético de la pirólisis de mascarillas quirúrgicas desechables. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/5172>
- Infinitia. (2025). Análisis Termogravimétrico (TGA). <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/analisis-termogravimetrico-tga/>

- INE. (2021). Estadísticas de residuos sólidos domiciliarios en Guatemala. <https://datos.ine.gob.gt/dataset/5-desechos-solidos>
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547>
- Kreith, F., & Goswami, D. (2007). *Energy Management and Conservation Handbook*. Taylor & Francis Group. 230(2). <https://doi.org/10.1201/9781420044300>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Earthscan.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. John Wiley & Sons.
- Lopez, C. (2023). The Present and the Future of Polyethylene Pyrolysis. *Engineering Proceedings* 37(1), 74. <https://doi.org/10.3390/ECP2023-14695>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.
- McLafferty, F., & Tureček, F. (1993). *Interpretation of Mass Spectra*. University Science Books.
- Miandad, R., Barakat, M., Aburiazaiza, A., Rehan, M., & Nizami, A. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 659–672. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Onwudili, J., Insura, N., & Williams, P. (2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.07.008>
- Palma, A., Ruiz-Montoya, M., Díaz, M., Giráldez, I., & Morales, E. (2023). Optimization of bioactive compounds by ultrasound extraction and gas chromatography-mass spectrometry in fast-growing leaves. *Microchemical Journal*, 193, 109231. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109231>
- Perdomo, G. (2002). Plásticos y medio ambiente. https://www.academia.edu/download/59214400/REVISTA_SOBRE_PLASTICOS2_0190511-120589-1ic8uu6.pdf
- Plastic. (2022). Pirólisis de residuos plásticos de poliolefina y aplicaciones potenciales en la construcción de carreteras asfálticas: Una revisión técnica. <https://plastic.org/2022/02/13/pirolisis-de-residuos-plasticos-de-poliolefina-y-aplicaciones-potenciales-en-la-construccion-de-carreteras-asfalticas-una-revision-tecnica/>

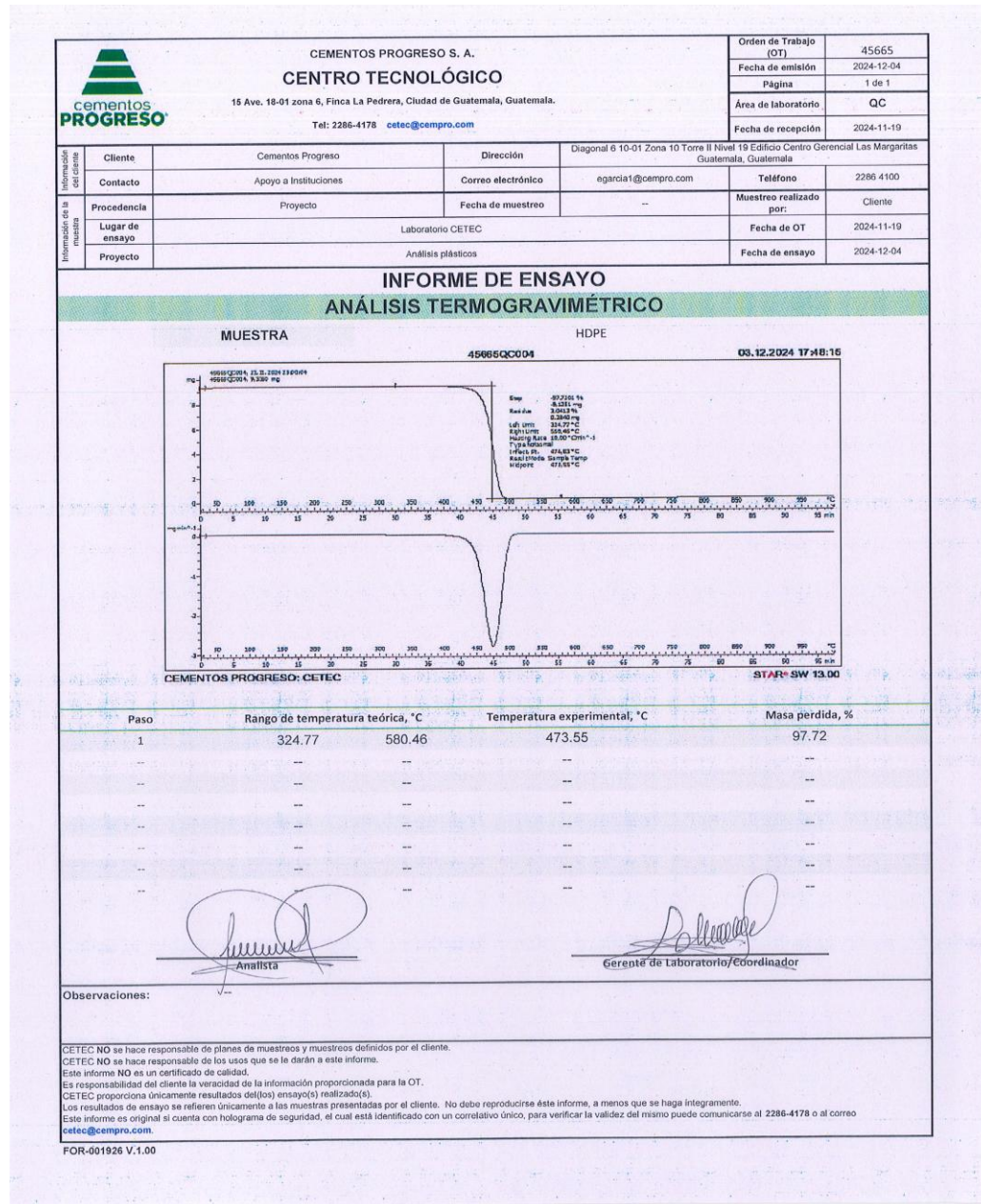
- PlasticsEurope. (2023). Plásticos – the Facts 2023: An analysis of European plastics production, demand and waste data. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>
- Predel, M., & Kaminsky, W. (2000). Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed. *Polymer Degradation and Stability*, 70, 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.05.002>
- Ramos, W., & Pretell, V. (2021). Optimización y caracterización de combustibles líquidos obtenidos a partir de la pirólisis catalítica de residuos plásticos. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology* 19(2) 1-8. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.95>
- Rejas, L., Carreón, B., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2015). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(11), 635-642.
- Requema, A., Quintanilla, J. Bolarín, A. Vázquez, A. (s. f.). Representación de cromatogramas: TIC. <https://www.um.es/LEQ/Atmosferas/Ch-VI-1/F61s3p4.htm>
- Rodríguez, J. (2023). Análisis de la generación de desechos sólidos en Guatemala (edición 252). <https://ipn.usac.edu.gt/wp-content/uploads/2023/09/Analisis-de-la-generacion-de-desechos-solidos-en-Guatemala.pdf>
- Rosen, S. (2012). *Fundamental Principles of Polymeric Materials* (3rd ed.). Wiley.
- Rowe, R., & Sangam, H. (2002). Durability of HDPE geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(2), 77-95. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00005-5)
- Seymour, R., & Charles, E. (2021). *Introducción a la química de los polímeros*. Reverté.
- Skoog, D., Holler, F., & Crouch, S. (2007). *Principles of Instrumental Analysis*. Thomson Brooks/Cole.
- Smith, J. (2019). *Chemical Engineering Kinetics*. McGraw-Hill.
- Smith, J., Van Ness, H. C., & Abbott, M. (2005). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors. *Energy Procedia*, 47, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.212>
- Thompson, R., Moore, C., Vom Saal, F., & Swan, S. (2009). Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the*

- Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>
- Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* (2nd ed.). Elsevier.
- Treybal, R. (1980). *Mass-Transfer Operations* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- UNEP. (2018). Single-use plastics: A roadmap for sustainability.
<https://www.unep.org/ietc/resources/publication/single-use-plastics-roadmap-sustainability>
- Uzcátegui, R. (2010). Síntesis y caracterización de zeolita ZSM-5 mesoporosa,
https://www.researchgate.net/publication/265593512_Sintesis_y_caracterizacion_de_zeolitas_mesoporosas
- Vargas, Y., Valdivia, A., Rodríguez, G., Gómez-Vidales, V., Carvayar, J., & Bórquez, A. (2013). Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores. *Revista Digital Universitaria*, 14(5), 1-13.
- XFNANO. (2024). Molecular sieve. <https://chinanano.com>
- Yang, G., Peng, P., Guo, H., Song, H., & Li, Z. (2024). The catalytic pyrolysis of waste polyolefins by zeolite-based catalysts: a critical review on the structure-acidity synergies of catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 222(1).
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110712>
- Young, H., & Freedman, R. (2011). *University Physics*. Pearson Education.
- Zachrisson, S. (2024). Comparación energética del combustible líquido obtenidos a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a diferentes rampas de temperaturas. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/5163>
- Zhou, S., Li, P., Pan, H., & Zhang, Y. (2022). Improvement of aromatics selectivity from catalytic pyrolysis of low-density polyethylene with metal-modified HZSM-5 in a CO₂ atmosphere. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(31), 11407-11416. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01287>

XII. ANEXOS

A. Datos originales

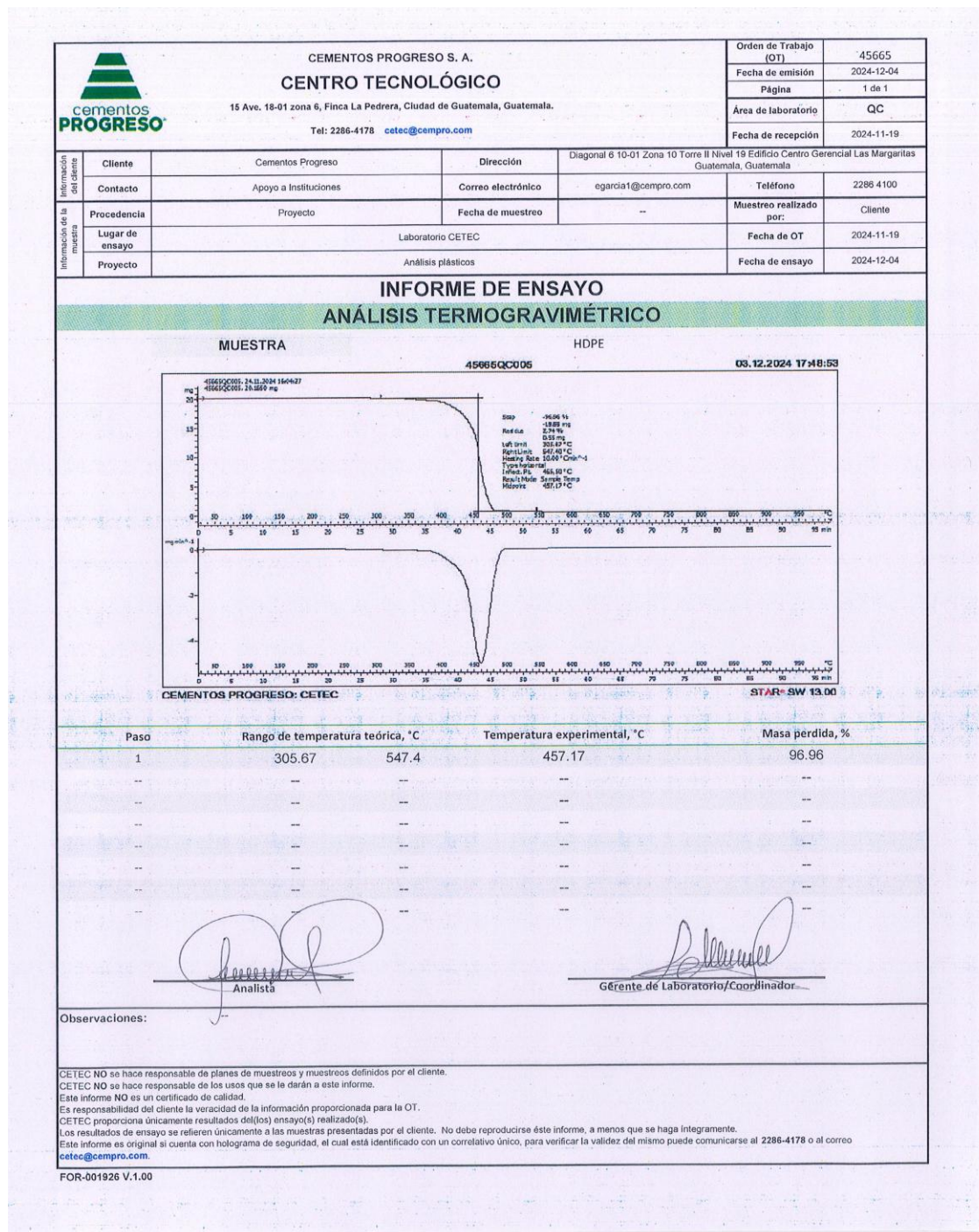
Figura 25. Análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE)



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 25 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE), realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

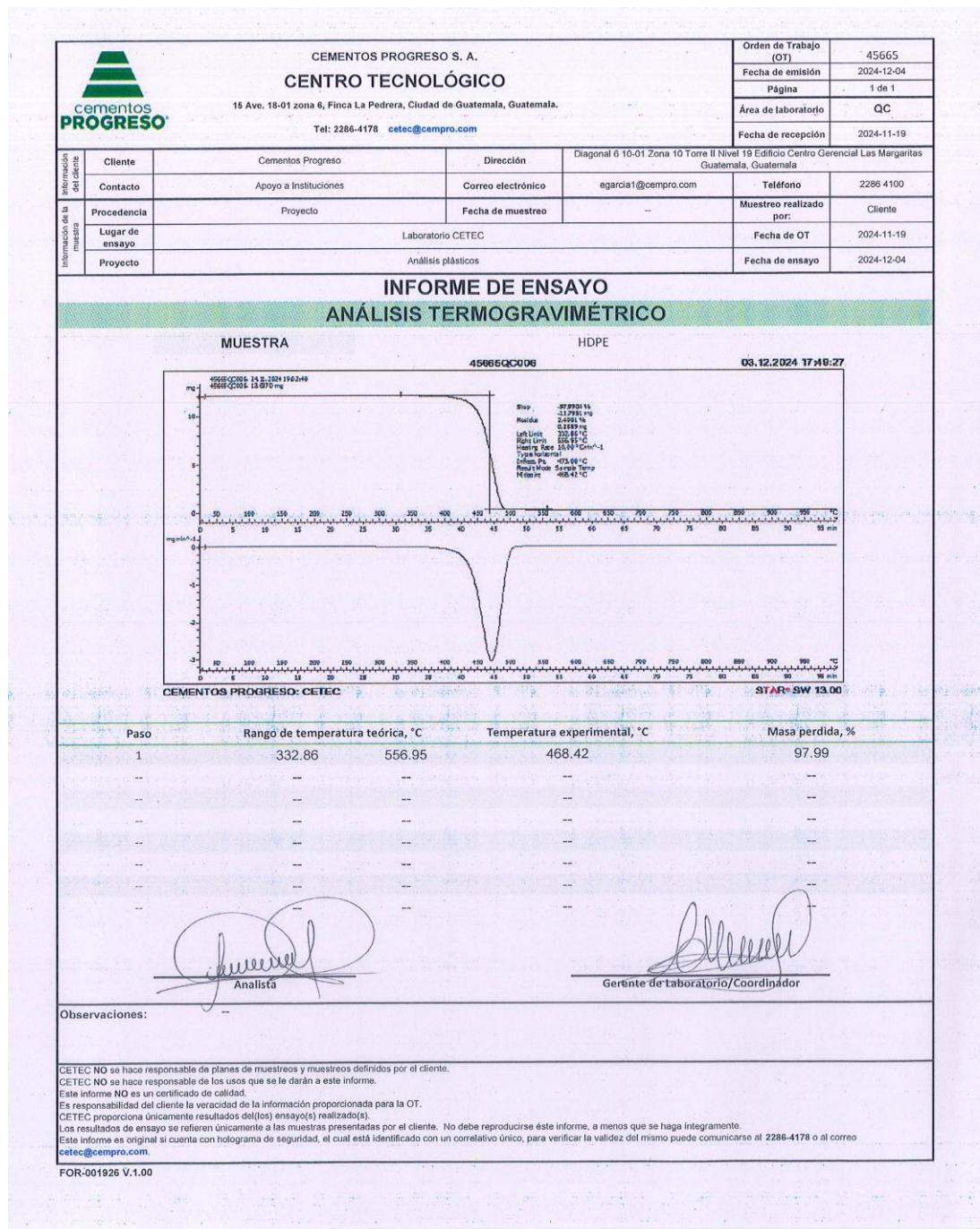
Figura 26. Análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE)



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 26 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE), realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

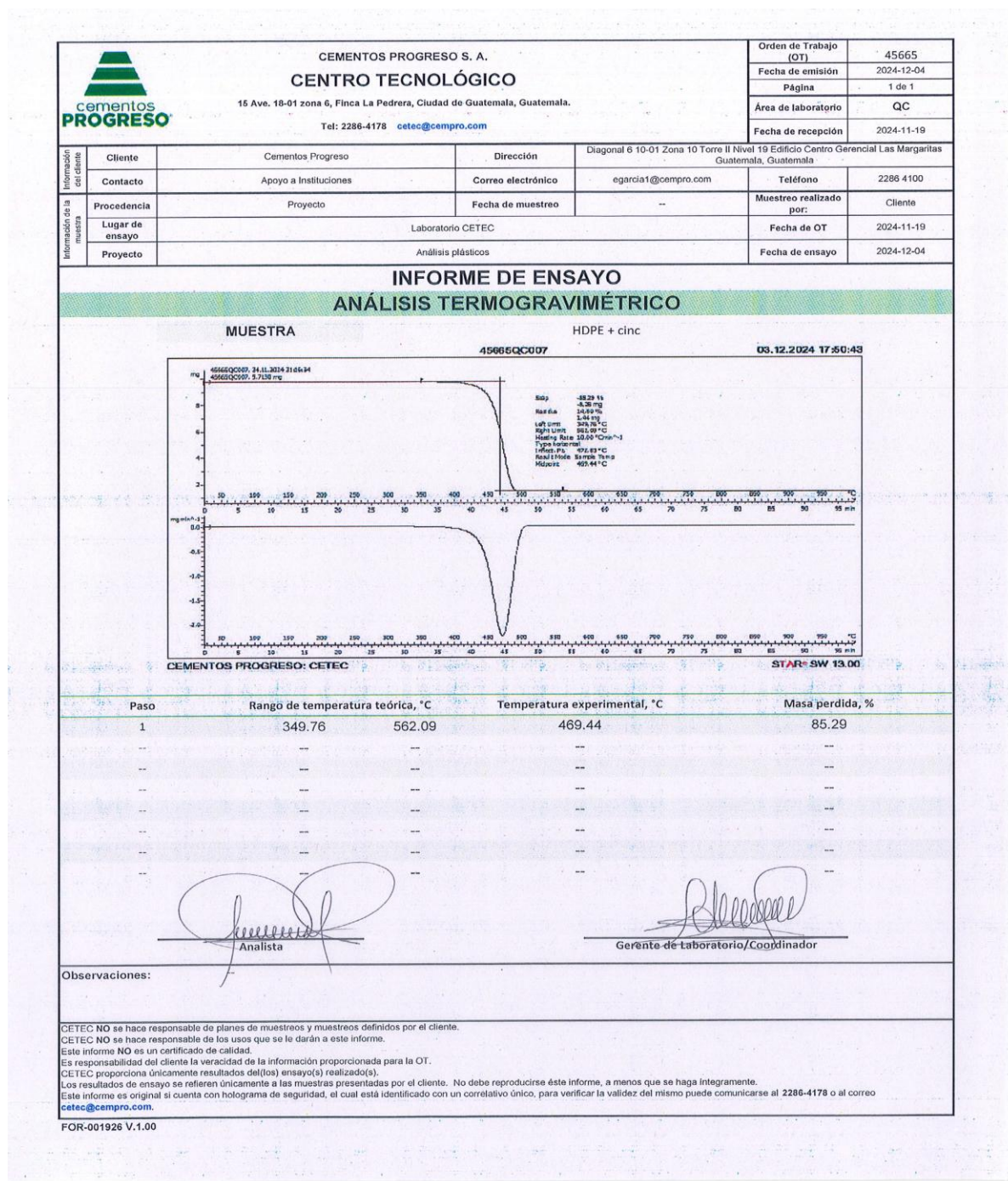
Figura 27. Análisis termogravimétrico de la muestra 3 de polietileno de alta densidad (HDPE)



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 27 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE), realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

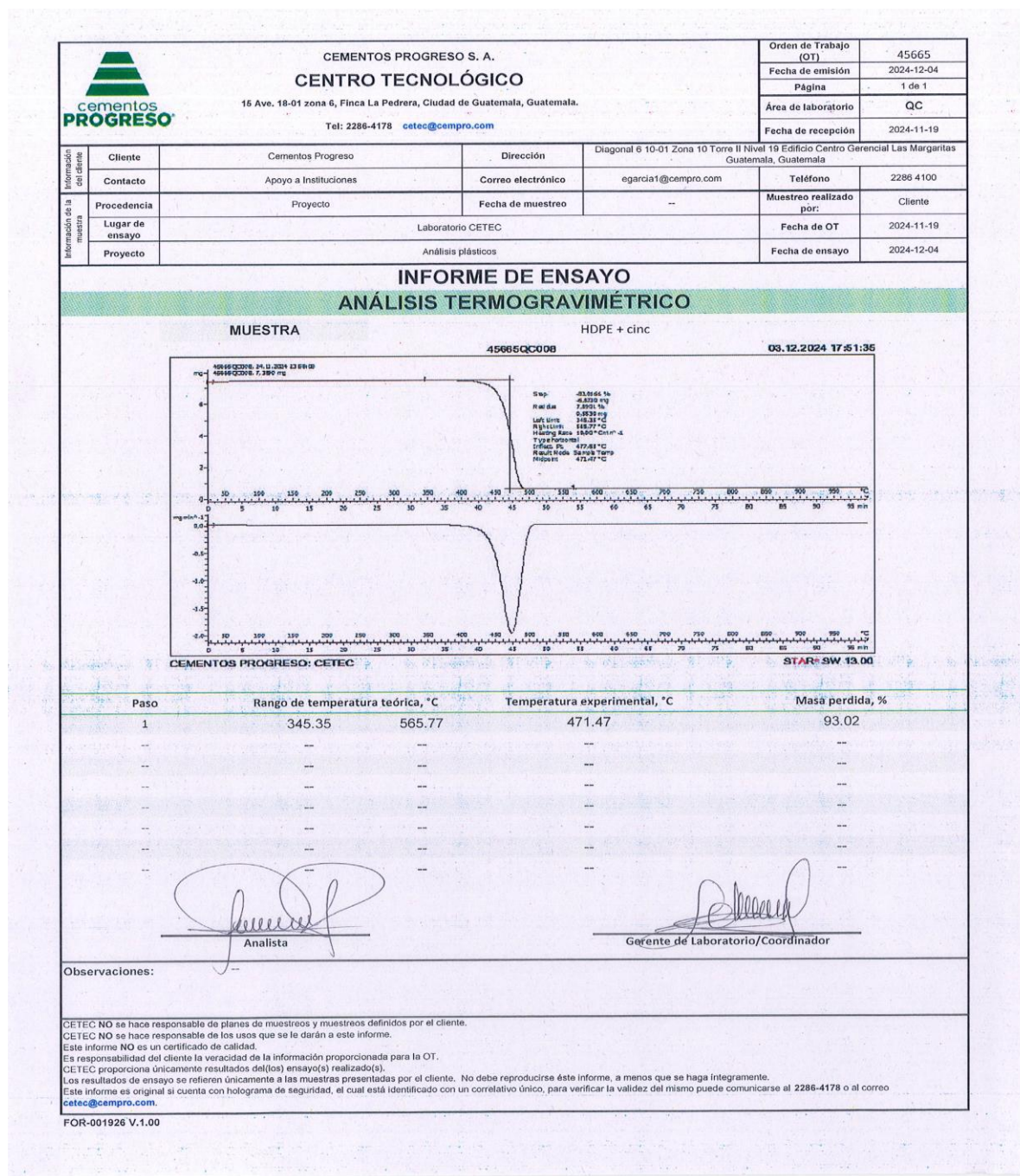
Figura 28. Análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE) y óxido de zinc



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 28 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE) con 10 % m/m de óxido de zinc, realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 29. Análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE) y óxido de zinc



Fuente: (CETEC, 2024)

En la Figura 29 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE) con 10 % m/m de óxido de zinc, realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

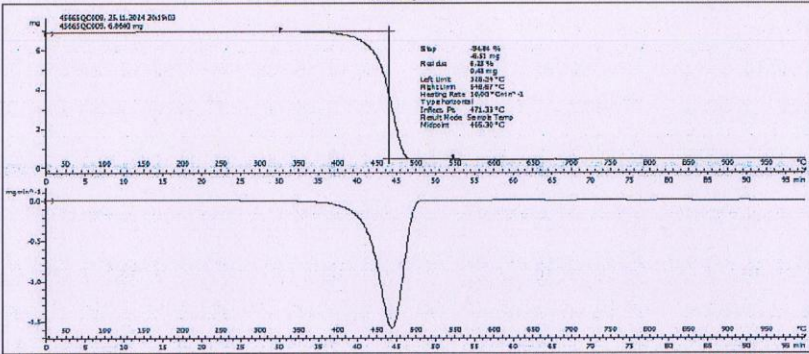
 CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com		Orden de Trabajo (OT)		45665
		Fecha de emisión		2024-12-04
		Página		1 de 1
		Área de laboratorio		QC
		Fecha de recepción		2024-11-19

Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Apoyo a Instituciones	Correo electrónico	egarcia1@cempro.com	
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	--	Muestreo realizado por:
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT
	Proyecto	Análisis plásticos			Fecha de ensayo

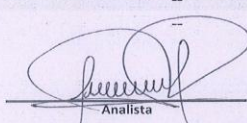
INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

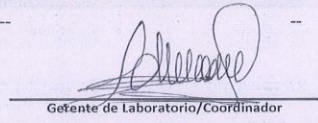
MUESTRA	HDPE + cinc	03.12.2024 17:52:07
---------	-------------	---------------------



Paso	Rango de temperatura teórica, °C	Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %
1	326.24 548.87	465.3	94.84
--	-- --	--	--
--	-- --	--	--
--	-- --	--	--
--	-- --	--	--
--	-- --	--	--
--	-- --	--	--
--	-- --	--	--
--	-- --	--	--



Analista



Gerente de Laboratorio/Coordinador

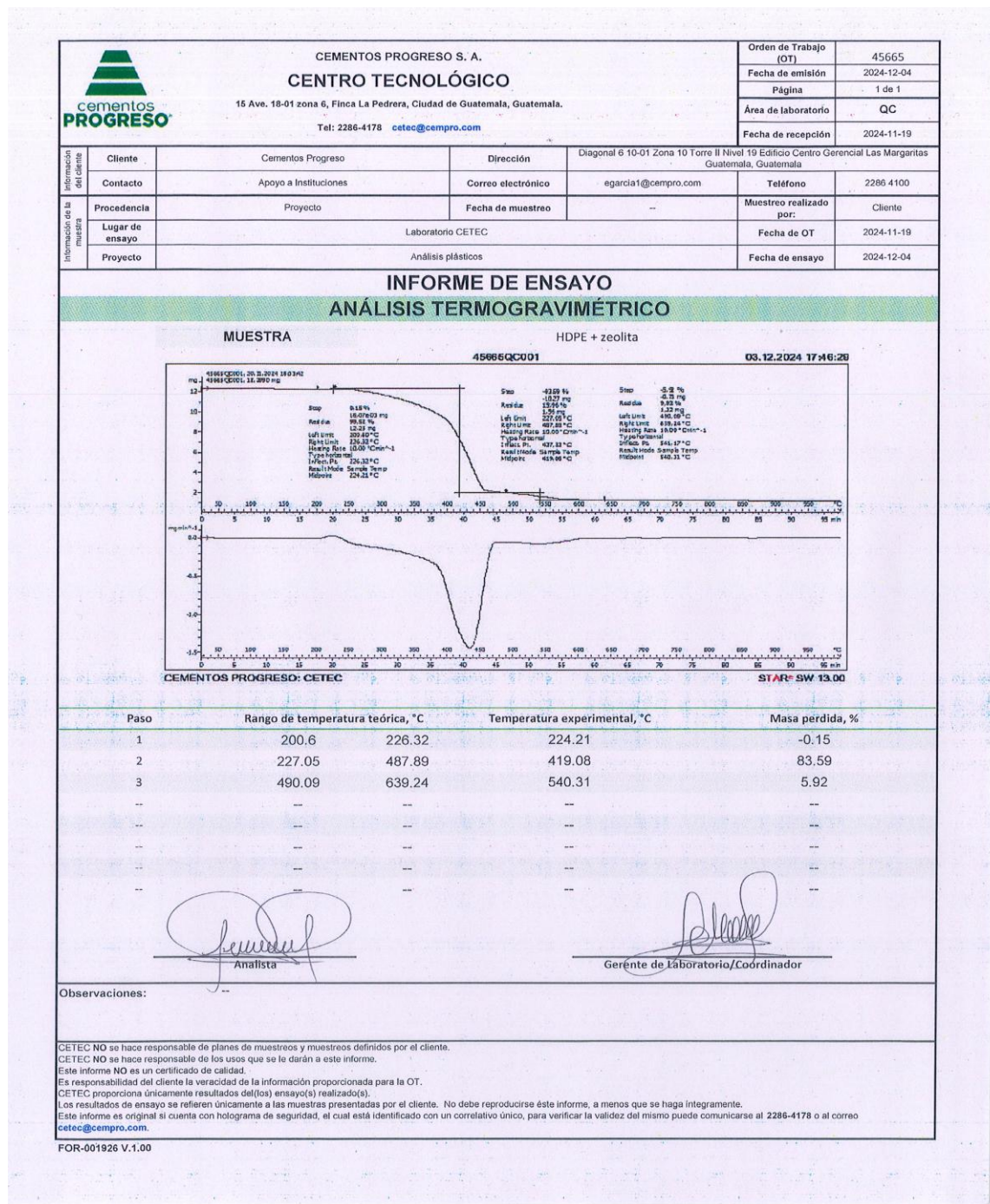
Observaciones:

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.
 CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
 Este informe NO es un certificado de calidad.
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
 CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
 Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

FOR-001926 V.1.00

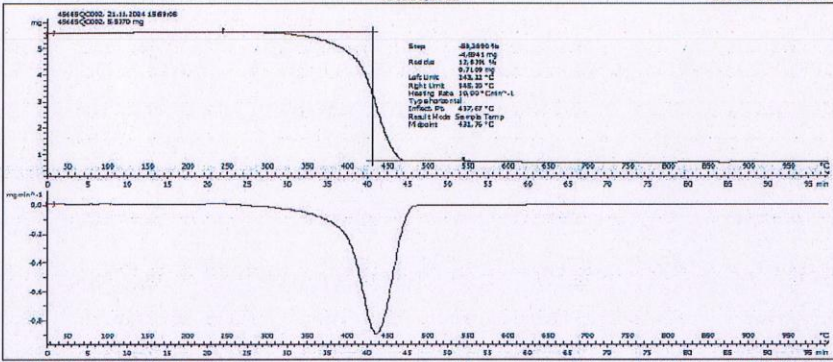
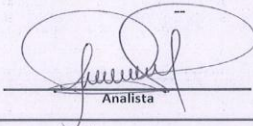
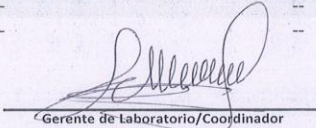
En la Figura 30 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 3 de polietileno de alta densidad (HDPE) con 10 % m/m de óxido de zinc, realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 31. Análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE) y zeolitas ZSM-5



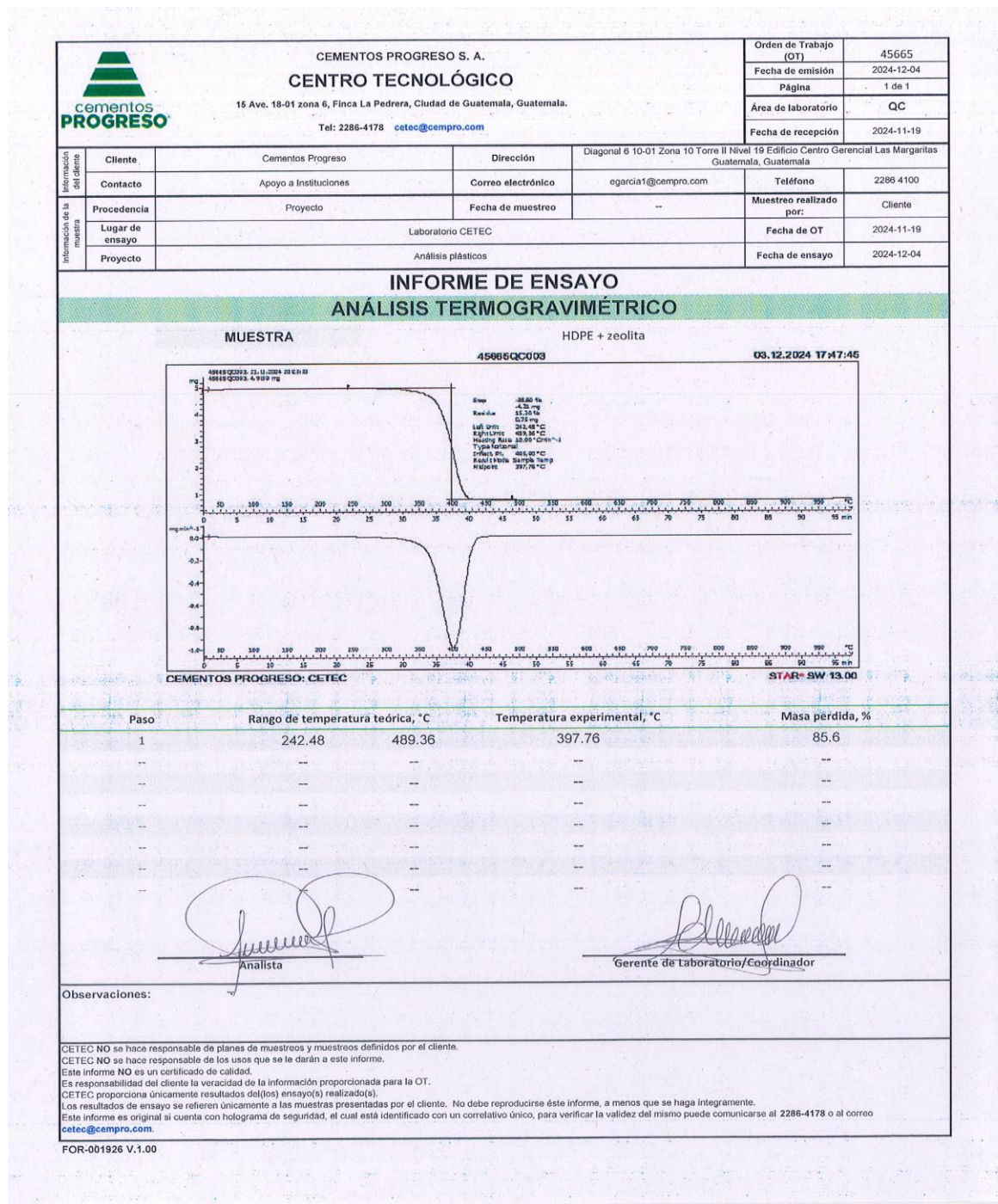
Fuente: CETEC, 2024

En la Figura 31 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 1 de polietileno de alta densidad (HDPE) con 10 % m/m de zeolitas ZSM-5, realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

		CEMENTOS PROGRESO S. A.		Orden de Trabajo (OT)		45665																																													
		CENTRO TECNOLÓGICO		Fecha de emisión		2024-12-04																																													
		15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.		Página		1 de 1																																													
		Tel: 2286-4178 cathec@cempro.com		Área de laboratorio		QC																																													
				Fecha de recepción		2024-11-19																																													
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala																																															
	Contacto	Apoyo a Instituciones	Correo electrónico	egarcia1@cempro.com																																															
	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	--																																															
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Muestreo realizado por:	Cliente																																													
	Proyecto	Análisis plásticos			Fecha de OT	2024-11-19																																													
Información de la muestra				Fecha de ensayo	2024-12-04																																														
INFORME DE ENSAYO ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO																																																			
MUESTRA HDPE + zeolita 45665QC002 03.12.2024 17:47:06  CEMENTOS PROGRESO: CETEC STAR SW 13.00																																																			
<table><thead><tr><th>Paso</th><th colspan="2">Rango de temperatura teórica, °C</th><th>Temperatura experimental, °C</th><th>Masa perdida, %</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>243.22</td><td>545.2</td><td>431.76</td><td>88.39</td></tr><tr><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td></tr><tr><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td></tr><tr><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td></tr><tr><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td></tr><tr><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td></tr><tr><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td></tr><tr><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td><td>---</td></tr></tbody></table>  Analista  Gerente de Laboratorio/Coordinador							Paso	Rango de temperatura teórica, °C		Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %	1	243.22	545.2	431.76	88.39	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Paso	Rango de temperatura teórica, °C		Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %																																															
1	243.22	545.2	431.76	88.39																																															
---	---	---	---	---																																															
---	---	---	---	---																																															
---	---	---	---	---																																															
---	---	---	---	---																																															
---	---	---	---	---																																															
---	---	---	---	---																																															
---	---	---	---	---																																															
Observaciones: ---																																																			
CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cathec@cempro.com.																																																			
FOR-001926 V.1.00																																																			

En la Figura 32 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 2 de polietileno de alta densidad (HDPE) con 10 % m/m de zeolitas ZSM-5, realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 33. Análisis termogravimétrico de la muestra 3 de polietileno de alta densidad (HDPE) y zeolitas ZSM-5



Fuente: CETEC, 2024

En la Figura 33 se observa el análisis termogravimétrico de la muestra 3 de polietileno de alta densidad (HDPE) con 10 % m/m de zeolitas ZSM-5, realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 7. Datos originales de corrida 1 de pirólisis de HDPE

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	390	87.3
5	390	87.3
10	390	87.3
15	390	87.3
20	390	87.3
25	390	87.3
30	398	87.3
35	398	87.3
40	398	87.3
45	398	87.3
50	398	87.3
55	398	87.3
60	406	88.3
65	406	88.3
70	406	88.3
75	406	88.3
80	406	88.3
85	406	88.3
90	414	93.4
95	414	93.4
100	414	93.4
105	414	93.4
110	414	93.4
115	414	93.4
120	422	138.0
125	422	138.0
130	422	138.0
135	422	138.0
140	422	138.0
145	422	138.0
150	430	92.9
155	430	92.9
160	430	92.9
165	430	92.9
170	430	92.9
175	430	92.9
180	438	242.2
185	438	242.2
190	438	242.2

195	438	242.2
200	438	242.2
205	438	242.2
210	446	30.0
215	446	30.0
220	446	30.0
225	446	30.0
230	446	30.0
235	446	30.0
240	454	29.5
245	454	29.5
250	454	29.5
255	454	29.5
260	454	29.5
265	454	29.5
270	454	87.5

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 7 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 1 de pirólisis de HDPE, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 8. Datos originales de corrida 2 de pirólisis de HDPE

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	390	87.9
5	390	87.9
10	390	87.9
15	390	87.9
20	390	87.9
25	390	87.9
30	398	87.9
35	398	87.9
40	398	87.9
45	398	87.9
50	398	87.9
55	398	87.9
60	406	88.9
65	406	88.9
70	406	88.9
75	406	88.9
80	406	88.9
85	406	88.9

90	414	93.9
95	414	93.9
100	414	93.9
105	414	93.9
110	414	93.9
115	414	93.9
120	422	138.0
125	422	138.0
130	422	138.0
135	422	138.0
140	422	138.0
145	422	138.0
150	430	92.9
155	430	92.9
160	430	92.9
165	430	92.9
170	430	92.9
175	430	92.9
180	438	241.2
185	438	241.2
190	438	241.2
195	438	241.2
200	438	241.2
205	438	241.2
210	446	30.0
215	446	30.0
220	446	30.0
225	446	30.0
230	446	30.0
235	446	30.0
240	454	29.5
245	454	29.5
250	454	29.5
255	454	29.5
260	454	29.5
265	454	29.5
270	454	88.1

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 8 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 2 de pirólisis de HDPE, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 9. Datos originales de corrida 3 de pirólisis de HDPE

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	390	29.0
5	390	29.0
10	390	29.0
15	390	29.0
20	390	29.0
25	390	29.0
30	398	29.0
35	398	29.0
40	398	29.0
45	398	29.0
50	398	29.0
55	398	29.0
60	406	29.0
65	406	29.0
70	406	29.0
75	406	29.0
80	406	29.0
85	406	29.0
90	414	29.4
95	414	29.4
100	414	29.4
105	414	29.4
110	414	29.4
115	414	29.4
120	422	93.6
125	422	93.6
130	422	93.6
135	422	93.6
140	422	93.6
145	422	93.6
150	430	93.3
155	430	93.3
160	430	93.3
165	430	93.3
170	430	93.3
175	430	93.3
180	438	100.7
185	438	100.7
190	438	100.7

195	438	100.7
200	438	100.7
205	438	100.7
210	446	131.1
215	446	131.1
220	446	131.1
225	446	131.1
230	446	131.1
235	446	131.1
240	454	89.1
245	454	89.1
250	454	89.1
255	454	89.1
260	454	89.1
265	454	89.1
270	454	87.3

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 9 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 3 de pirólisis de HDPE, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 10. Datos originales de corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	390	87.2
5	390	87.2
10	390	87.2
15	390	87.2
20	390	87.2
25	390	87.2
30	398	87.2
35	398	87.2
40	398	87.2
45	398	87.2
50	398	87.2
55	398	87.2
60	406	88.4
65	406	88.4
70	406	88.4
75	406	88.4
80	406	88.4
85	406	88.4

90	414	94.4
95	414	94.4
100	414	94.4
105	414	94.4
110	414	94.4
115	414	94.4
120	422	93.1
125	422	93.1
130	422	93.1
135	422	93.1
140	422	93.1
145	422	93.1
150	430	135.8
155	430	135.8
160	430	135.8
165	430	135.8
170	430	135.8
175	430	135.8
180	438	32.7
185	438	32.7
190	438	32.7
195	438	32.7
200	438	32.7
205	438	32.7
210	446	88.7
215	446	88.7
220	446	88.7
225	446	88.7
230	446	88.7
235	446	88.7
240	454	29.8
245	454	29.8
250	454	29.8
255	454	29.8
260	454	29.8
265	454	29.8
270	454	87.6

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 10 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con

ZnO, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 11. Datos originales de corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	390	29.0
5	390	29.0
10	390	29.0
15	390	29.0
20	390	29.0
25	390	29.0
30	398	29.0
35	398	29.0
40	398	29.0
45	398	29.0
50	398	29.0
55	398	29.0
60	406	29.0
65	406	29.0
70	406	29.0
75	406	29.0
80	406	29.0
85	406	29.0
90	414	30.0
95	414	30.0
100	414	30.0
105	414	30.0
110	414	30.0
115	414	30.0
120	422	95.8
125	422	95.8
130	422	95.8
135	422	95.8
140	422	95.8
145	422	95.8
150	430	99.4
155	430	99.4
160	430	99.4
165	430	99.4
170	430	99.4
175	430	99.4

180	438	92.0
185	438	92.0
190	438	92.0
195	438	92.0
200	438	92.0
205	438	92.0
210	446	129.4
215	446	129.4
220	446	129.4
225	446	129.4
230	446	129.4
235	446	129.4
240	454	29.8
245	454	29.8
250	454	29.8
255	454	29.8
260	454	29.8
265	454	29.8
270	454	29.5

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 11 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 12. Datos originales de corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	390	29.0
5	390	29.0
10	390	29.0
15	390	29.0
20	390	29.0
25	390	29.0
30	398	29.0
35	398	29.0
40	398	29.0
45	398	29.0
50	398	29.0
55	398	29.0
60	406	29.0
65	406	29.0

70	406	29.0
75	406	29.0
80	406	29.0
85	406	29.0
90	414	29.8
95	414	29.8
100	414	29.8
105	414	29.8
110	414	29.8
115	414	29.8
120	422	35.4
125	422	35.4
130	422	35.4
135	422	35.4
140	422	35.4
145	422	35.4
150	430	99.4
155	430	99.4
160	430	99.4
165	430	99.4
170	430	99.4
175	430	99.4
180	438	101.2
185	438	101.2
190	438	101.2
195	438	101.2
200	438	101.2
205	438	101.2
210	446	85.2
215	446	85.2
220	446	85.2
225	446	85.2
230	446	85.2
235	446	85.2
240	454	30.2
245	454	30.2
250	454	30.2
255	454	30.2
260	454	30.2
265	454	30.2
270	454	80.7

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 12 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 13. Datos originales de corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	330	29.3
5	330	29.3
10	330	29.3
15	330	29.3
20	330	29.3
25	330	29.3
30	338	29.3
35	338	29.3
40	338	29.3
45	338	29.3
50	338	29.3
55	338	29.3
60	346	29.8
65	346	29.8
70	346	29.8
75	346	29.8
80	346	29.8
85	346	29.8
90	354	29.8
95	354	29.8
100	354	29.8
105	354	29.8
110	354	29.8
115	354	29.8
120	362	93.1
125	362	93.1
130	362	93.1
135	362	93.1
140	362	93.1
145	362	93.1
150	370	91.6
155	370	91.6
160	370	91.6

165	370	91.6
170	370	91.6
175	370	91.6
180	378	99.2
185	378	99.2
190	378	99.2
195	378	99.2
200	378	99.2
205	378	99.2
210	386	33.4
215	386	33.4
220	386	33.4
225	386	33.4
230	386	33.4
235	386	33.4
240	394	30.1
245	394	30.1
250	394	30.1
255	394	30.1
260	394	30.1
265	394	30.1
270	394	87.5

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 13 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 14. Datos originales de corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	330	29.0
5	330	29.0
10	330	29.0
15	330	29.0
20	330	29.0
25	330	29.0
30	338	29.0
35	338	29.0
40	338	29.0
45	338	29.0

50	338	29.0
55	338	29.0
60	346	29.3
65	346	29.3
70	346	29.3
75	346	29.3
80	346	29.3
85	346	29.3
90	354	29.9
95	354	29.9
100	354	29.9
105	354	29.9
110	354	29.9
115	354	29.9
120	362	85.9
125	362	85.9
130	362	85.9
135	362	85.9
140	362	85.9
145	362	85.9
150	370	96.7
155	370	96.7
160	370	96.7
165	370	96.7
170	370	96.7
175	370	96.7
180	378	98.8
185	378	98.8
190	378	98.8
195	378	98.8
200	378	98.8
205	378	98.8
210	386	35.3
215	386	35.3
220	386	35.3
225	386	35.3
230	386	35.3
235	386	35.3
240	394	30.3
245	394	30.3
250	394	30.3

255	394	30.3
260	394	30.3
265	394	30.3
270	394	87.4

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 14 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 15. Datos originales de corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5

Tiempo (± 0.01 min)	Temperatura (± 1 °C)	Masa medida (± 0.1 g)
0	330	29.3
5	330	29.3
10	330	29.3
15	330	29.3
20	330	29.3
25	330	29.3
30	338	29.3
35	338	29.3
40	338	29.3
45	338	29.3
50	338	29.3
55	338	29.3
60	346	29.4
65	346	29.4
70	346	29.4
75	346	29.4
80	346	29.4
85	346	29.4
90	354	30.1
95	354	30.1
100	354	30.1
105	354	30.1
110	354	30.1
115	354	30.1
120	362	87.8
125	362	87.8
130	362	87.8
135	362	87.8

140	362	87.8
145	362	87.8
150	370	97.3
155	370	97.3
160	370	97.3
165	370	97.3
170	370	97.3
175	370	97.3
180	378	97.4
185	378	97.4
190	378	97.4
195	378	97.4
200	378	97.4
205	378	97.4
210	386	35.2
215	386	35.2
220	386	35.2
225	386	35.2
230	386	35.2
235	386	35.2
240	394	29.7
245	394	29.7
250	394	29.7
255	394	29.7
260	394	29.7
265	394	29.7
270	394	29.4

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 15 se observan los datos de tiempo, temperatura y masa medida de producto líquido recuperado de la corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5, empleando un sistema de pirólisis a escala laboratorio y una balanza marca Ohaus.

Cuadro 16. Masa de los productos líquidos obtenidos de la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5 para cálculo de densidad

Pirólisis	No. Muestra	Masa (± 0.001 g)
HDPE	1	7.886
	2	7.721
	3	7.792
HDPE + ZnO	1	7.663
	2	7.776
	3	7.652
HDPE + Zeolitas ZSM-5	1	7.593
	2	7.567
	3	7.515

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 16 se observan los datos de masa de producto líquido de pirólisis de HDPE, catalizada con ZnO y con Zeolitas ZSM-5, obtenida en un volumen de 10 mL, utilizando una probeta para determinar la densidad y una balanza semi-analítica marca OHAUS PX623/E.

Cuadro 17. Poderes caloríficos de la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5

Pirólisis	No. Muestra	Poder calorífico producto líquido (± 1 J/g)
HDPE	1	46944
	2	46694
	3	46560
HDPE + ZnO	1	46710
	2	46840
	3	46263

HDPE + ZSM-5	1	45918
	2	46143
	3	46229

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 17 se observan los resultados de poder calorífico obtenidos de los productos líquidos de la pirólisis de HDPE, obtenidos utilizando una bomba calorimétrica marca IKA C200, con el apoyo del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 18. Resultados de poder calorífico de producto sólido de pirólisis de HDPE

No. muestra	Poder calorífico (± 1 J/g)
1	19047
2	20302
3	19560

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 18 se observan los resultados de poder calorífico obtenidos de los productos sólidos de la pirólisis de HDPE, obtenidos utilizando una bomba calorimétrica marca IKA C200, con el apoyo del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala.

B. Datos calculados

Cuadro 19. Análisis estadístico de las temperaturas de degradación de las muestras de HDPE y de HDPE con 10 % (m/m) de óxido de zinc y zeolitas ZSM-5

Muestra	Temperatura	Media (°C)	Desviación estándar (°C)	Coefficiente de variación	Intervalo de confianza (°C)
HDPE	Inicial	396.67	32.15	8.10 %	[316.81 – 476.52]
	Final	488.33	7.64	1.56 %	[469.36 – 507.31]
HDPE + ZnO 10 % (m/m)	Inicial	405.00	13.23	3.27 %	[372.14 – 437.86]
	Final	488.33	2.89	0.59 %	[481.16 – 495.50]
HDPE + ZSM-5 10 % (m/m)	Inicial	308.33	33.29	10.80 %	[225.63 – 391.03]
	Final	460.00	32.79	7.13 %	[378.55 – 541.45]

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 19 se observa el análisis estadístico de las temperaturas iniciales y finales de degradación en los análisis termogravimétricos realizados a las muestras de HDPE y de HDPE con 10 % (m/m) de óxido de zinc y zeolitas ZSM-5, se obtuvieron con el apoyo del Centro de Tecnología de Cementos Progreso S. A. CETEC.

Cuadro 20. Resultados de los productos obtenidos en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5

Pirólisis	No. Muestra	Masa producto líquido (± 0.1 g)	Masa producto sólido (± 0.1 g)	Masa producto gaseoso (g)
HDPE	1	39.3	0.5	10.2 ± 0.17
	2	39.5	0.9	9.6 ± 0.17
	3	39.9	0.9	9.2 ± 0.17
HDPE + ZnO	1	37.8	0.9	6.3 ± 0.17
	2	38.0	0.5	6.5 ± 0.17
	3	38.1	0.4	6.5 ± 0.17
	1	34.7	1.7	8.6 ± 0.17

HDPE + Zeolitas ZSM-5	2	33.8	1.9	9.3 ± 0.17
	3	34.5	2.1	8.4 ± 0.17

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 20 se observan los resultados de masa de productos de la pirólisis de HDPE, la muestra inicial utilizada fue de 50 g para las 3 muestras, para la de HDPE + ZnO fue de 45 g y 5 g de catalizador ZnO para las 3 muestras y para la de HDPE + zeolitas ZSM-5 fue de 45 g y 5 g de catalizador zeolita ZSM-5 para las 3 muestras.

Cuadro 21. Rendimientos obtenidos en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5

Pirólisis	No. Muestra	Rendimiento producto líquido (%)	Rendimiento producto sólido (%)	Rendimiento producto gaseoso (%)
HDPE	1	78.60 ± 0.25	1.00 ± 0.20	20.40 ± 10.01
	2	79.00 ± 0.25	1.80 ± 0.20	19.20 ± 10.01
	3	79.80 ± 0.26	1.80 ± 0.20	18.40 ± 10.01
HDPE + ZnO	1	84.00 ± 0.28	1.98 ± 0.22	14.02 ± 10.01
	2	84.44 ± 0.28	1.09 ± 0.22	14.47 ± 10.01
	3	84.67 ± 0.28	0.84 ± 0.22	14.49 ± 10.01
HDPE + Zeolitas ZSM-5	1	77.11 ± 0.27	3.78 ± 0.22	19.11 ± 10.01
	2	75.11 ± 0.27	4.22 ± 0.22	20.67 ± 10.01
	3	76.67 ± 0.27	4.67 ± 0.22	18.67 ± 10.01

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 21 se observan los resultados de rendimiento de productos de la pirólisis de HDPE, la muestra inicial utilizada fue de 50 g para las 3 muestras, para la de HDPE + ZnO fue de 45 g y 5 g de catalizador ZnO para las 3 muestras y para la de HDPE + zeolitas ZSM-5 fue de 45 g y 5 g de catalizador zeolita ZSM-5 para las 3 muestras.

Cuadro 22. Análisis estadístico de los rendimientos del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE

Pirólisis	Promedio rendimiento producto líquido (%)	Desviación estándar (%)	Coefficiente de variación (%)	Intervalo de confianza (%)
HDPE	79.13	0.61	0.77	[77.62 – 80.65]
HDPE + ZnO	84.37	0.34	0.40	[83.53 – 85.21]
HDPE + Zeolitas ZSM-5	76.30	1.05	1.38	[73.69 – 78.91]

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 22 se observa la estadística descriptiva del rendimiento de producto líquido de la pirólisis de HDPE estudiados.

Cuadro 23. Análisis de varianza entre los rendimientos de producto líquido

Experimentos comparados	F	p	Resultado
HDPE vs HDPE + ZnO	168.16	0.0002	Si hay diferencia estadísticamente significativa
HDPE vs HDPE + ZSM-5	16.36	0.0155	Si hay una diferencia estadísticamente significativa

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 23 se observa el análisis de varianza (ANOVA) entre los rendimientos de producto líquido de los procesos de pirólisis estudiados.

Cuadro 24. Resultados promedio de rendimientos del producto sólido y gaseoso obtenido en la pirólisis de HDPE

Pirólisis	Rendimiento producto gaseoso (%)	Rendimiento producto sólido (%)
HDPE	19.33 ± 1.01	1.53 ± 0.46
HDPE + ZnO	14.32 ± 0.27	1.31 ± 0.60
HDPE + Zeolitas ZSM-5	19.48 ± 1.05	4.22 ± 0.44

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 24 se observan los resultados promedio de rendimiento de producto gaseoso y sólido de la pirólisis de HDPE.

Cuadro 25. Resultados cinéticos de los modelos parametrizados de la curvas de pirólisis

	HDPE	HDPE + ZnO	HDPE + ZSM-5
Energía de activación (Ea) (J/mol)	230148.19 ± 1777.04	230877.1 ± 928.90	199716.36 ± 2749.00
Constante de frecuencia (A)	$1.69\text{E}+25 \pm 1.30\text{E}+23$	$1.70\text{E}+25 \pm 6.84\text{E}+22$	$1.71\text{E}+25 \pm 2.36\text{E}+23$
Orden de reacción (n)	2.1488 ± 0.0166	2.1389 ± 0.0087	2.1516 ± 0.0296
Peso de sólido final (Wf) (g)	0.2077 ± 0.0016	0.2000 ± 0.0008	0.5000 ± 0.0069

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 25 se observan los resultados de la energía de activación, constante de Arrhenius, orden de reacción y el peso de sólido final obtenido en los modelos cinéticos parametrizados realizados en el software Berkeley Madonna para los datos obtenidos de la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y con Zeolitas ZSM-5. Se obtuvieron estos resultados empleando la Ecuación 8.

Cuadro 26. Parámetros de los modelos cinéticos obtenidos de la pirólisis de HDPE

Parámetro	Valor
A	1.6867E25
Ea (J/mol)	230148.19
R (J/mol·K)	8.314
Wf (g)	0.2077
n	2.14883
n1	0.24468
n2	0.69133
n3	0.69459
n4	0.26808
n5	0.69125
n6	0.76365
n7	0.29008
n8	0.69014
t1	25.1358
t2	55.37113
t3	85.37266
t4	115.14837
t5	145.37108
t6	175.3998
t7	205.15736
t8	235.37047

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 26 se observan los resultados de la energía de activación, constante de Arrhenius, orden de reacción, el peso de sólido final obtenido y los parámetros determinados para la rampa de temperatura de 8 °C cada 30 minutos en los modelos cinéticos parametrizados realizados en el software Berkeley Madonna para los datos obtenidos de la pirólisis de HDPE, y cuenta con un R^2 de 0.9990. Se obtuvieron estos resultados empleando la Ecuación 8 (ver código en Figura 49).

Cuadro 27. Parámetros de los modelos cinéticos obtenidos de la pirólisis de HDPE catalizado con ZnO al 10 % (m/m)

Parámetro	Valor
A	1.6999E25
Ea (J/mol)	230877.11
R (J/mol·K)	8.314
Wf (g)	0.2000
n	2.1389
n1	0.24468
n2	0.69133
n3	0.69459
n4	0.26808
n5	0.69125
n6	0.76365
n7	0.29015
n8	0.69014
t1	25.1358
t2	55.37113
t3	85.37266
t4	115.14837
t5	145.37108
t6	175.3998
t7	205.15741
t8	235.37047

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 27 se observan los resultados de la energía de activación, constante de Arrhenius, orden de reacción, el peso de sólido final obtenido y los parámetros determinados para la rampa de temperatura de 8 °C cada 30 minutos en los modelos cinéticos parametrizados realizados en el software Berkeley Madonna para los datos obtenidos de la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO, y cuenta con un R^2 de 0.9981. Se obtuvieron estos resultados empleando la Ecuación 8 (ver código en Figura 50).

Cuadro 28. Parámetros de los modelos cinéticos obtenidos de la pirólisis de HDPE catalizado con zeolitas ZSM-5 al 10 % (m/m)

Parámetro	Valor
A	1.7144E25
Ea (J/mol)	199716.36
R (J/mol·K)	8.314
Wf (g)	0.5000
n	2.1516
n1	0.24468
n2	0.69133
n3	0.69459
n4	0.26808
n5	0.69125
n6	0.76365
n7	0.29015
n8	0.69014
t1	25.1358
t2	55.37113
t3	85.37266
t4	115.14837
t5	145.37108
t6	175.3998
t7	205.15741
t8	235.37047

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 28 se observan los resultados de la energía de activación, constante de Arrhenius, orden de reacción, el peso de sólido final obtenido y los parámetros determinados para la rampa de temperatura de 8 °C cada 30 minutos en los modelos cinéticos parametrizados realizados en el software Berkeley Madonna para los datos obtenidos de la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5, y cuenta con un R^2 de 0.9973. Se obtuvieron estos resultados empleando la Ecuación 8 (ver código en Figura 51).

Cuadro 29. Densidades del producto líquido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5

Pirólisis	No. Muestra	Densidad producto líquido (kg/m ³)
HDPE	1	788.60 ± 3.94
	2	772.10 ± 3.86
	3	779.20 ± 3.90
HDPE + ZnO	1	766.30 ± 3.83
	2	777.60 ± 3.89
	3	765.20 ± 3.83
HDPE + Zeolitas ZSM-5	1	759.30 ± 3.80
	2	756.70 ± 3.78
	3	751.50 ± 3.76

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 29 se observan las densidades calculadas de los productos líquidos de pirólisis de HDPE, catalizada con ZnO y con Zeolitas ZSM-5, en un volumen de 10 mL, al emplearse una probeta.

Cuadro 30. Análisis estadístico de las densidades del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5

Pirólisis	Promedio de densidad producto líquido (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Coefficiente de variación	Intervalo de confianza (kg/m ³)
HDPE	779.97	8.28	1.06 %	[759.41 – 800.53]
HDPE + ZnO	769.70	6.86	0.89 %	[752.65 – 786.75]
HDPE + Zeolitas ZSM-5	755.83	3.97	0.53 %	[745.97 – 765.70]

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 30 se observan los análisis estadísticos de las densidades calculadas para las muestras de combustible líquido obtenido de pirólisis de HDPE y

catalizada con ZnO y con Zeolitas ZSM-5, en un volumen de 10 mL, al emplearse una probeta.

Cuadro 31. Análisis estadístico de los poderes caloríficos del producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y Zeolitas ZSM-5

Pirólisis	Promedio poder calorífico producto líquido (J/g)	Desviación estándar (J/g)	Coefficiente de variación	Intervalo de confianza (J/g)
HDPE	46790.67 ± 1.73	133.03	0.28 %	[46460.20 – 47121.13]
HDPE + ZnO	46550.00 ± 1.73	248.73	0.53 %	[45932.12 – 47167.88]
HDPE + Zeolitas ZSM-5	46030.00 ± 1.73	106.10	0.23 %	[45766.44 – 46293.56]

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 31 se observan los análisis estadísticos de los poderes caloríficos obtenidos de las muestras de combustible líquido obtenido de pirólisis de HDPE y catalizada con ZnO y con Zeolitas ZSM-5, utilizando una bomba calorimétrica marca IKA C200, con la ayuda del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala.

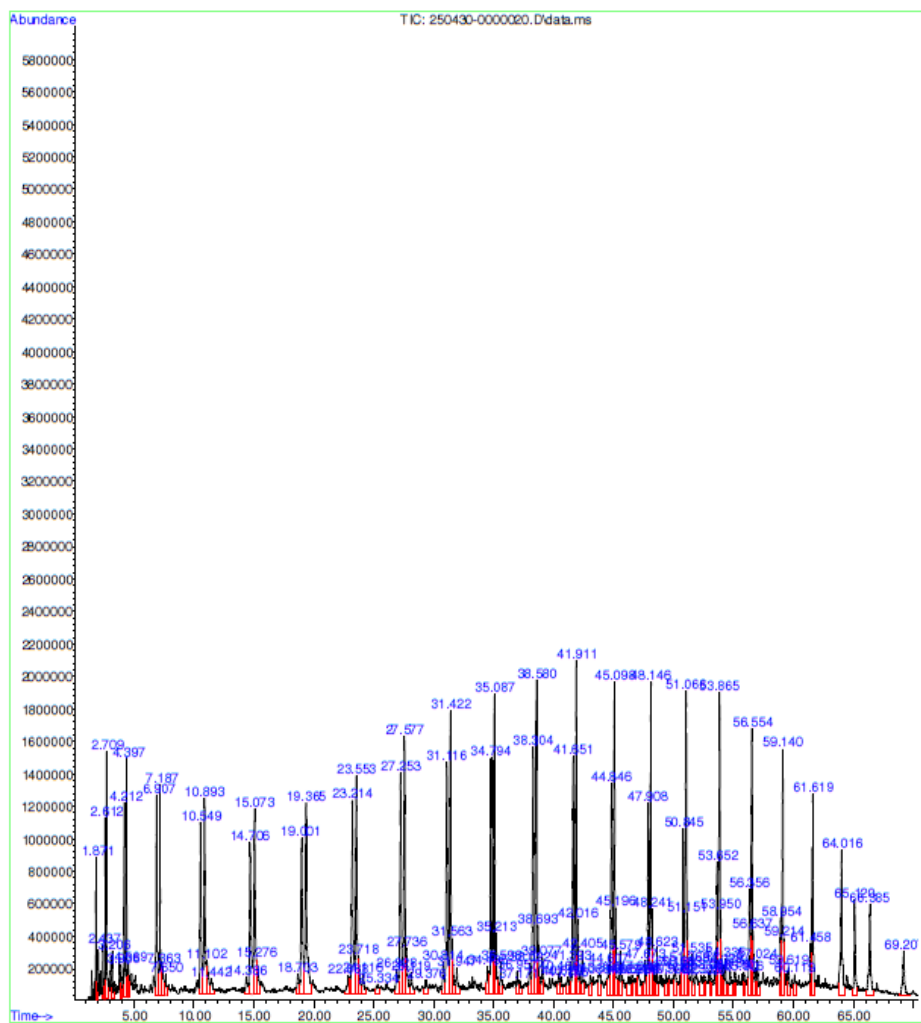
Cuadro 32. Análisis estadístico de poder calorífico de producto sólido de pirólisis de HDPE

Pirólisis	Promedio poder calorífico producto sólido (J/g)	Desviación estándar (J/g)	Coefficiente de variación	Intervalo de confianza (J/g)
HDPE	19636.33 ± 1.73	630.97	3.21 %	[18068.91 – 21203.76]

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 32 se observan los análisis estadísticos de los poderes caloríficos obtenidos de las muestras de combustible sólido obtenido de pirólisis de HDPE, utilizando una bomba calorimétrica marca IKA C200, con la ayuda del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 34. Cromatograma de la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 34 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 1 de pirólisis de HDPE. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 33. Compuestos presentes en la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE

Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
66	45.096	2.87	Eicosano
75	48.144	2.84	Heneicosano

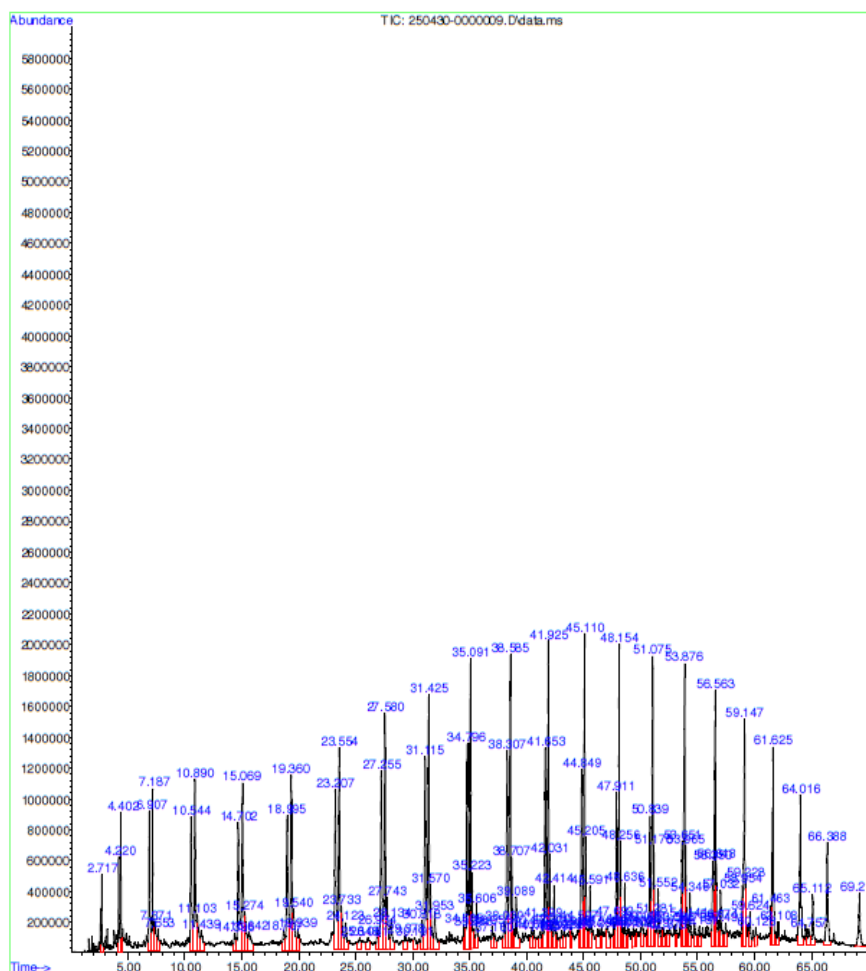
59	41.912	2.83	Nonadecano
51	38.578	2.81	Octadecano
83	51.064	2.72	Heptadecano
44	35.089	2.67	Heptadecano
39	31.423	2.6	Hexadecano
24	19.364	2.51	Tridecano
91	53.866	2.51	Eicosano
33	27.579	2.43	Pentadecano
32	27.252	2.33	1-Pentadeceno
99	56.554	2.31	Tetracosano
38	31.118	2.27	5-Octadeceno
43	34.793	2.25	1-Heptadeceno
27	23.554	2.21	Tetradecano
50	38.305	2.19	5-Octadeceno
26	23.213	2.16	2-Tetradeceno
58	41.653	2.12	1-Nonadeceno
103	59.138	1.98	Hexadecano
23	19.001	1.96	1-Trideceno
65	44.846	1.91	5-Eicoseno
108	61.617	1.86	Hexadecano
20	15.075	1.82	Dodecano
19	14.707	1.77	1-Dodeceno
74	47.907	1.67	1-Nonadeceno
14	10.549	1.66	1-Undeceno
15	10.895	1.65	Undecano
109	64.018	1.65	Eicosano
82	50.846	1.49	3-Eicoseno
10	6.906	1.44	1-Deceno
11	7.188	1.37	Decano
90	53.652	1.24	9-Tricoseno
111	66.384	1.12	Eicosano
8	4.395	1.03	Nonano
7	4.213	0.93	Nonano
98	56.354	0.93	Ciclotetracosano
4	2.707	0.86	Octano
110	65.119	0.86	Bis(2-etilhexil) ftalato
102	58.956	0.65	9-Tricoseno
40	31.564	0.63	3-Hexadeceno
67	45.196	0.62	5-Eicoseno
76	48.239	0.62	10-Heneicoseno
3	2.612	0.59	1-Octeno

112	69.208	0.59	Eicosano
34	27.734	0.54	2-Metil-Z-4-tetradeceno
21	15.275	0.53	3-Dodeceno
28	23.718	0.52	2-Tetradeceno
60	42.017	0.52	Z-5-Nonadeceno
52	38.692	0.51	5-Octadeceno

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 33 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 1 de pirólisis de HDPE. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 35. Cromatograma de la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 35 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 2 de pirólisis de HDPE. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 34. Compuestos presentes en la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE

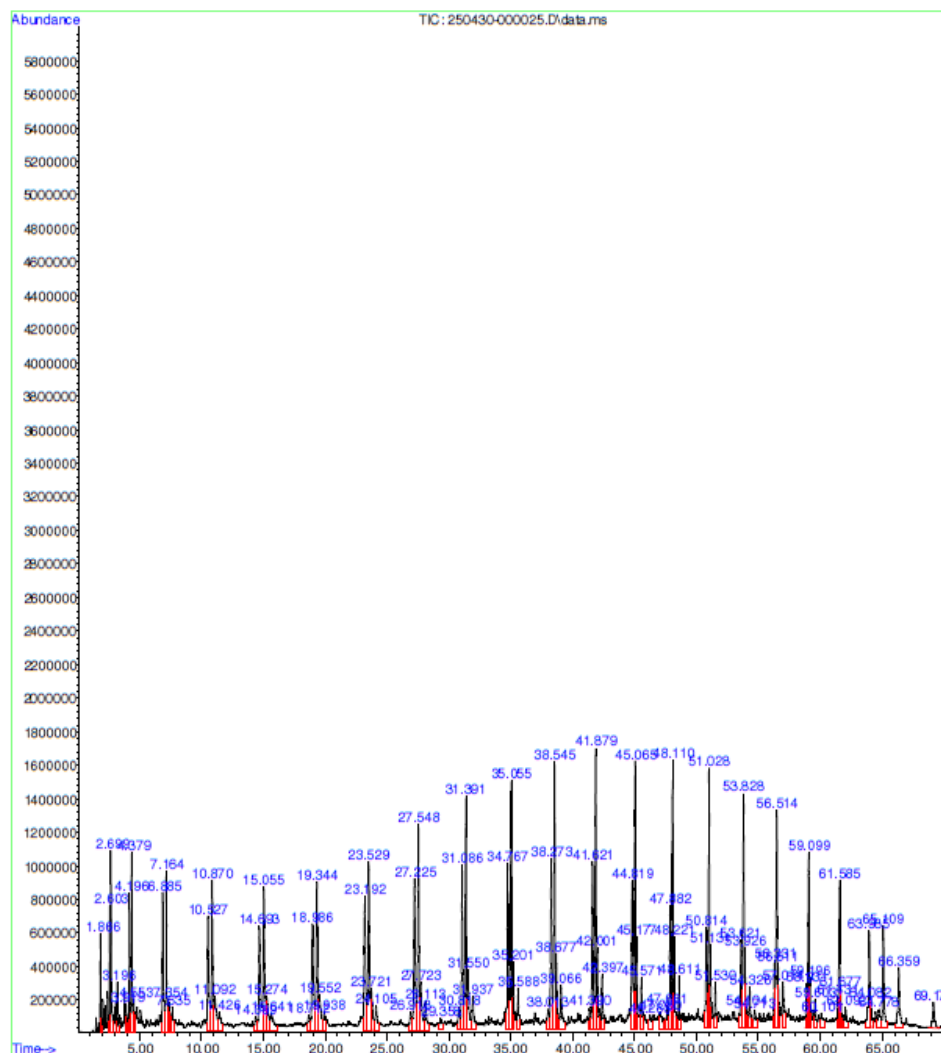
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
68	45.11	2.88	Eicosano
76	48.153	2.88	Heneicosano
58	41.926	2.81	Nonadecano
50	38.583	2.8	Octadecano
85	51.078	2.78	Hexadecano
42	35.089	2.6	Heptadecano
93	53.875	2.56	Heneicosano
37	31.423	2.51	Hexadecano
100	56.563	2.37	Tetracosano
30	27.579	2.33	Pentadecano
23	23.554	2.14	Tetradecano
29	27.256	2.09	1-Pentadeceno
106	59.147	2.08	Tetracosano
41	34.798	2.01	1-Heptadeceno
36	31.114	2	1-Nonadeceno
111	61.626	2	Heneicosano
22	23.208	1.97	2-Tetradeceno
49	38.305	1.97	1-Nonadeceno
57	41.653	1.93	1-Nonadeceno
19	19.36	1.92	Tridecano
18	18.996	1.81	1-Trideceno
14	15.071	1.77	Dodecano
67	44.851	1.75	5-Eicoseno
113	64.014	1.75	Hexadecano
13	14.702	1.62	1-Dodeceno
9	10.89	1.53	Undecano
75	47.912	1.51	1-Nonadeceno
8	10.545	1.47	1-Undeceno
84	50.841	1.32	1-Nonadeceno
116	66.388	1.28	Eicosano
5	7.188	1.13	Decano
4	6.906	1.11	1-Deceno

92	53.652	1.08	9-Tricoseno
99	56.349	0.82	1-Nonadeceno
69	45.205	0.8	5-Eicoseno
38	31.569	0.78	7-Hexadeceno
77	48.257	0.76	10-Heneicoseno
117	69.213	0.71	Eicosano
31	27.743	0.7	Eicosano
52	39.087	0.68	E-15-Heptadecenal
15	15.275	0.67	2-Dodeceno
20	19.537	0.67	2-Trideceno
59	42.03	0.67	Z-5-Nonadeceno
24	23.731	0.66	2-Tetradeceno
51	38.705	0.66	5-Octadeceno
3	4.404	0.65	Nonano
101	56.65	0.63	Ciclotetracosano
94	53.966	0.61	9-Tricoseno
10	11.104	0.59	Eicosano
43	35.221	0.59	1-Heptadeceno
86	51.169	0.57	1-Docoseno
88	51.551	0.57	3-Eicoseno
103	57.032	0.57	Ciclotetracosano
70	45.592	0.55	Eicosano
115	65.11	0.54	1,3-Benzeno ácido dicarboxílico

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 34 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 2 de pirólisis de HDPE. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 36. Cromatograma de la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 36 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 2 de pirólisis de HDPE. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 35. Compuestos presentes en la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE

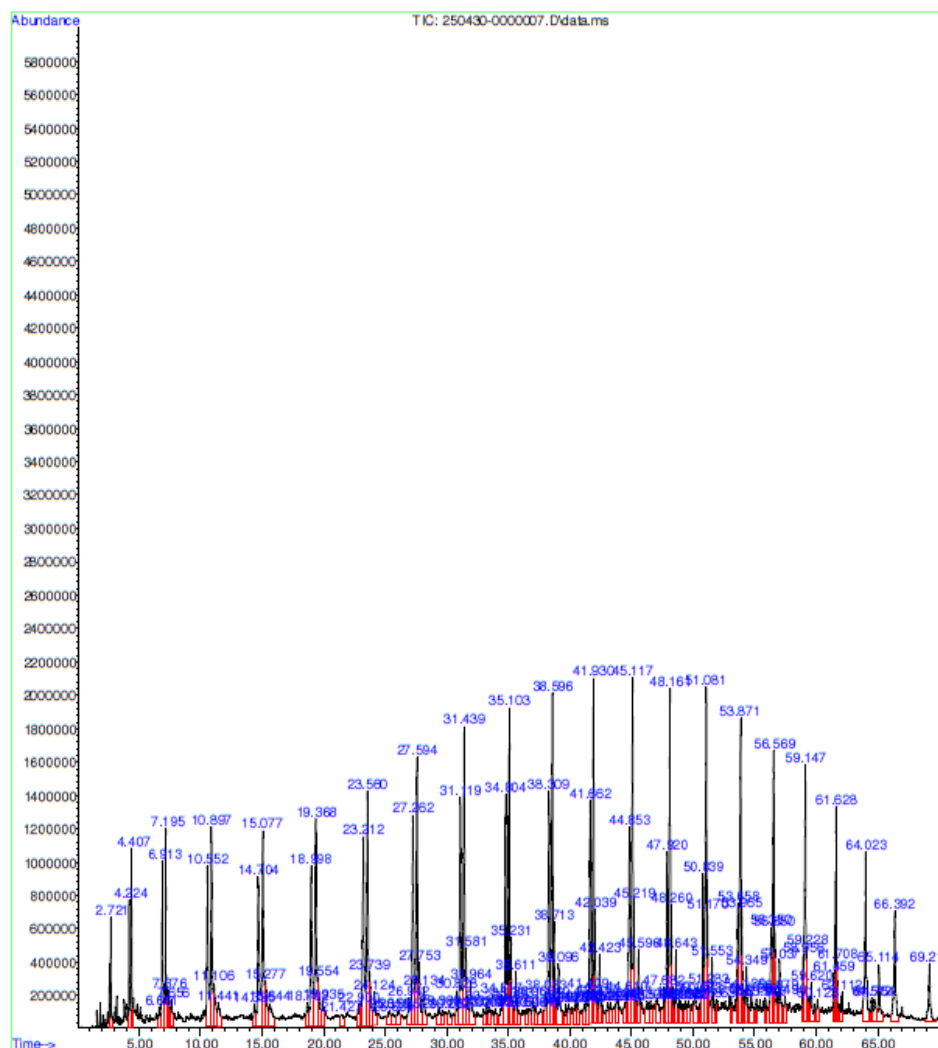
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
53	41.88	2.92	Pentadecano
57	45.064	2.91	Eicosano
48	38.546	2.89	Octadecano
64	48.112	2.89	Heneicosano
43	35.053	2.74	Heptadecano
68	51.028	2.73	Eicosano
39	31.391	2.69	Hexadecano
72	53.829	2.5	Eicosano
33	27.547	2.49	Pentadecano
28	23.531	2.3	Tetradecano
78	56.513	2.29	Tetracosano
32	27.224	2.18	1-Pentadeceno
24	19.342	2.09	Tridecano
42	34.766	2.09	1-Heptadeceno
38	31.086	2.08	1-Nonadeceno
27	23.194	2.05	1-Tetradeceno
47	38.273	2	1-Nonadeceno
19	15.057	1.94	Dodecano
52	41.621	1.91	1-Nonadeceno
23	18.987	1.89	1-Trideceno
82	59.097	1.85	Hexadecano
14	10.868	1.75	Undecano
18	14.693	1.75	1-Dodeceno
56	44.819	1.71	5-Eicoseno
13	10.526	1.68	1-Undeceno
9	6.883	1.45	1-Deceno
63	47.884	1.45	1-Nonadeceno
10	7.165	1.44	Decano
87	61.585	1.38	Hexadecano
67	50.814	1.28	3-Eicoseno
93	65.11	1.21	1,3-Benzeno ácido dicarboxílico
90	63.987	1.2	Eicosano
7	4.381	1.08	Nonano
71	53.62	1	9-Tricoseno
94	66.361	0.99	1-Nonadeceno
6	4.195	0.93	Eicosano

40	31.55	0.92	7-Hexadeceno
3	2.698	0.91	Octano
34	27.72	0.84	1-Nonadeceno
65	48.221	0.84	10-Heneicoseno
25	19.551	0.78	2-Trideceno
29	23.722	0.78	3-Tetradeceno
49	38.678	0.78	5-Octadeceno
58	45.178	0.78	5-Eicoseno
20	15.275	0.76	2-Dodeceno
50	39.065	0.75	1-Nonadeceno
54	41.998	0.75	Z-5-Nonadeceno
80	57.014	0.72	Ciclotetracosano
77	56.331	0.71	Ciclotetracosane

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 35 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 3 de pirólisis de HDPE. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 37. Cromatograma de la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 37 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 36. Compuestos presentes en la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO

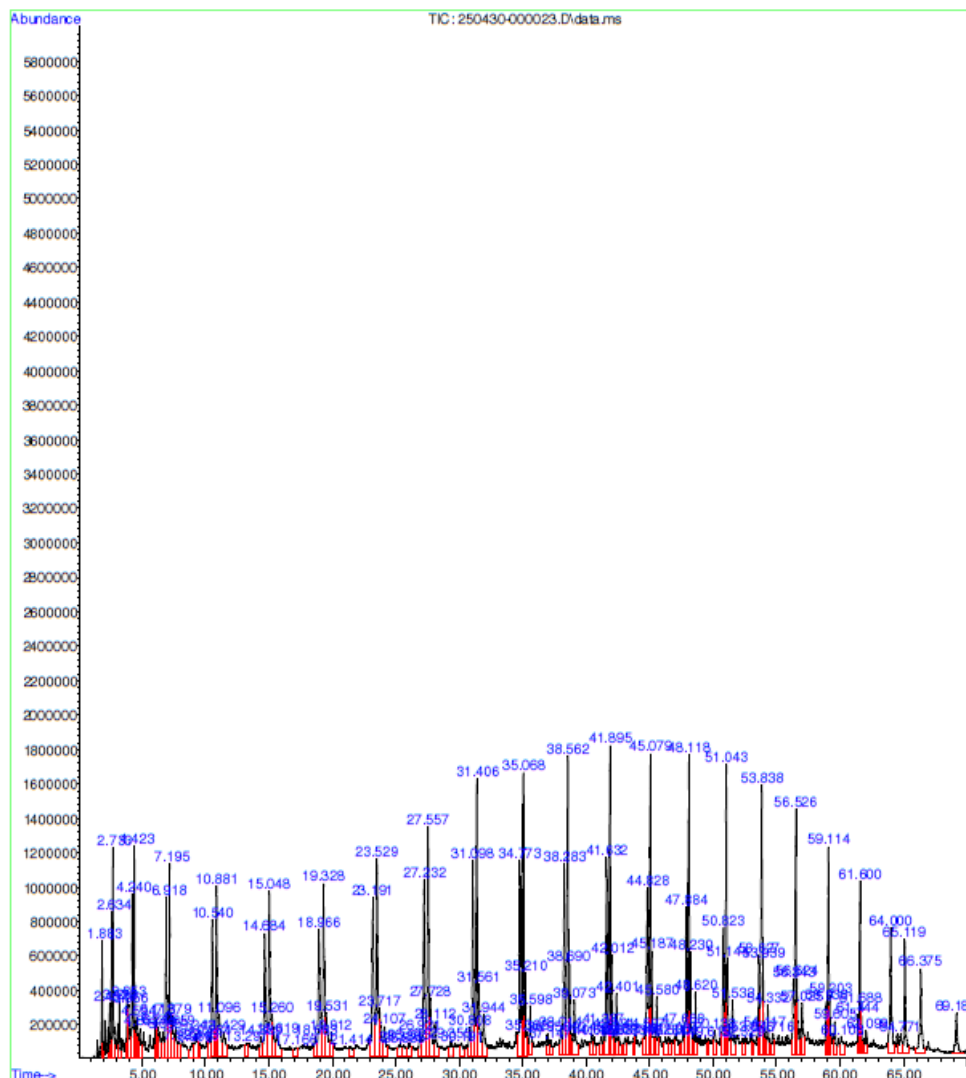
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
83	45.119	2.72	Eicosano
72	41.93	2.67	Tetradecano
91	48.162	2.67	Heneicosano
62	38.596	2.65	Octadecano
51	35.103	2.53	Heptadecano
101	51.082	2.53	Heneicosano
42	31.441	2.41	Hexadecano
108	53.87	2.31	Hexadecano
34	27.593	2.26	Pentadecano
116	56.568	2.18	Tetracosano
26	23.558	2.07	Tetradecano
33	27.261	2.03	1-Pentadeceno
41	31.118	1.96	7-Hexadeceno
25	23.213	1.93	1-Tetradeceno
50	34.803	1.93	1-Heptadeceno
61	38.31	1.9	1-Nonadeceno
20	19.369	1.88	Tridecano
122	59.147	1.87	Hexadecano
71	41.662	1.83	1-Nonadeceno
19	18.996	1.75	1-Trideceno
15	15.075	1.72	Dodecano
82	44.855	1.67	5-Eicoseno
130	64.023	1.63	Eicosano
14	14.702	1.6	1-Dodeceno
127	61.626	1.53	Hexadecano
10	10.899	1.48	Undecano
9	10.554	1.44	1-Undeceno
90	47.921	1.42	1-Nonadeceno
100	50.836	1.26	1-Nonadeceno
134	66.393	1.22	Octadeceno
5	6.915	1.1	1-Deceno
6	7.197	1.1	Decano
107	53.657	1.02	9-Tricoseno
43	31.582	0.78	7-Hexadeceno
115	56.349	0.74	Cyclotetracosano
84	45.219	0.73	5-Eicoseno
92	48.262	0.73	9-Nonadeceno

35	27.752	0.69	Tridecano
64	39.096	0.69	1-Nonadeceno
135	69.213	0.68	1-Heptadeceno
3	4.409	0.67	Nonano
21	19.555	0.66	2-Trideceno
27	23.74	0.66	3-Tetradeceno
16	15.275	0.65	2-Dodeceno
73	42.039	0.63	Z-5-Nonadeceno
63	38.714	0.62	5-Octadeceno
11	11.104	0.58	5-Undeceno
117	56.65	0.58	Ciclotetracosano
119	57.036	0.58	Ciclotetracosane
52	35.23	0.57	1-Heptadeceno
109	53.966	0.56	9-Tricoseno
104	51.555	0.55	1-Nonadeceno
2	4.222	0.54	Tridecano
85	45.596	0.54	1-Octadeceno
102	51.169	0.54	1-Nonadeceno
133	65.115	0.54	1,3-Bencenodicarboxílico
44	31.964	0.51	3-Hexadeceno
75	42.421	0.51	Z-5-Nonadeceno
93	48.644	0.51	1-Nonadeceno
121	58.956	0.5	9-Tricoseno
17	15.644	0.49	4-Dodeceno
36	28.134	0.48	Ciclopentadecano
54	35.612	0.43	1-Heptadeceno

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 36 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 38. Cromatograma de la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 38 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 37. Compuestos presentes en la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO

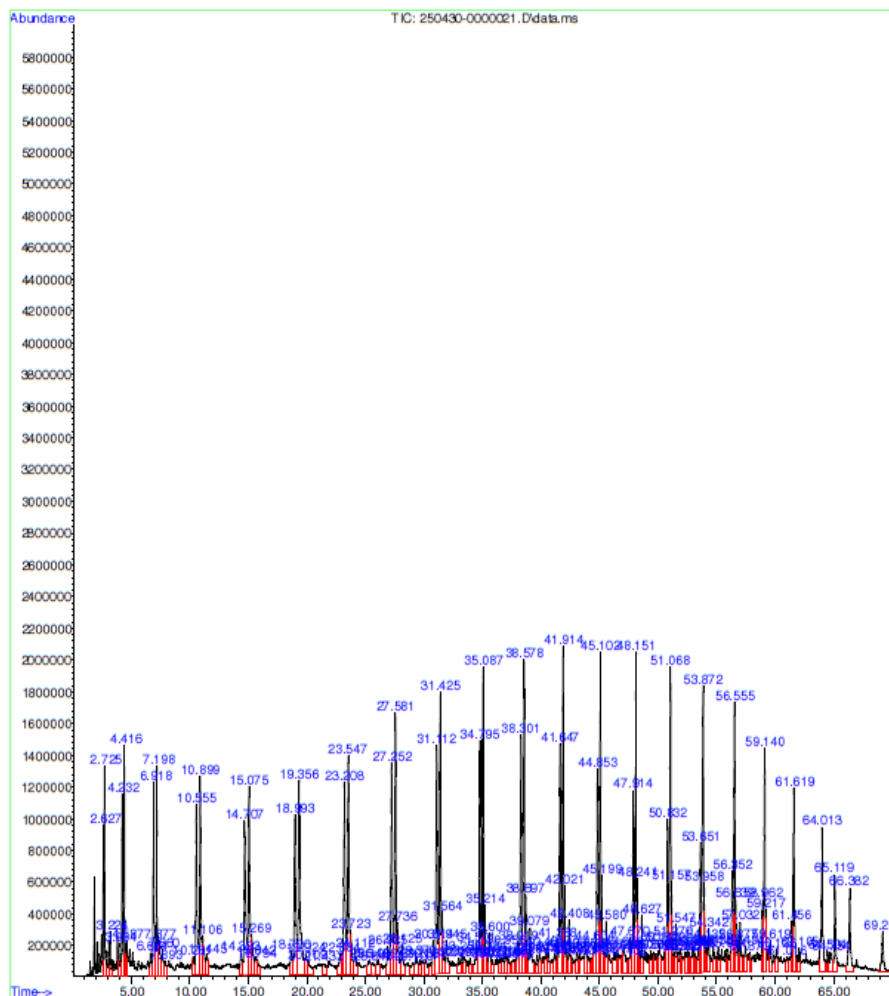
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
77	41.894	2.57	Nonadecano
69	38.56	2.56	Octadecano
86	45.078	2.55	Eicosano
94	48.116	2.51	Heneicosano
61	35.066	2.44	Heptadecano
57	31.405	2.41	Hexadecano
100	51.041	2.37	Octadecano
50	27.556	2.2	Pentadecano
106	53.838	2.16	Hexadecano
112	56.527	2	Tetracosano
42	23.531	1.99	Tetradecano
49	27.233	1.97	1-Pentadeceno
56	31.1	1.87	3-Hexadeceno
60	34.771	1.86	1-Heptadeceno
41	23.19	1.83	1-Tetradeceno
68	38.282	1.83	1-Nonadeceno
37	19.328	1.78	Tridecano
76	41.63	1.73	1-Nonadeceno
36	18.964	1.67	1-Trideceno
31	15.048	1.66	Dodecano
116	59.115	1.66	Pentadecano
85	44.828	1.58	5-Eicoseno
30	14.684	1.57	1-Dodeceno
25	10.881	1.46	Undecano
15	6.919	1.44	1-Deceno
124	64	1.44	Hexadecano
121	61.598	1.34	Hexadecano
16	7.197	1.33	Decano
24	10.54	1.33	1-Undeceno
93	47.884	1.3	3-Eicoseno
99	50.823	1.15	1-Nonadeceno
127	66.375	1.11	Eicosano
126	65.119	1.05	Octano
9	4.422	0.94	Nonano
105	53.625	0.88	9-Tricoseno
8	4.24	0.86	Decano
58	31.559	0.84	7-Hexadeceno

87	45.187	0.8	5-Eicoseno
4	2.735	0.78	Octano
51	27.729	0.77	5-Octadeceno
95	48.23	0.74	10-Heneicoseno
38	19.533	0.72	3-Trideceno
43	23.717	0.72	3-Tetradeceno
70	38.691	0.71	5-Octadeceno
71	39.074	0.71	5-Octadeceno
32	15.261	0.69	3-Dodeceno
78	42.012	0.67	Z-5-Nonadeceno
26	11.095	0.66	5-Undeceno
111	56.345	0.65	Ciclotetracosano
62	35.212	0.64	8-Heptadeceno
114	57.027	0.6	Ciclotetracosano
113	56.622	0.59	Ciclotetracosano
17	7.379	0.57	2-Deceno
33	15.621	0.56	2-Dodeceno
128	69.186	0.56	Heptadecano
88	45.578	0.55	Octano
102	51.532	0.55	1-Nonadeceno
107	53.939	0.55	9-Tricoseno
59	31.946	0.54	7-Hexadeceno
80	42.399	0.54	Z-5-Nonadeceno
101	51.146	0.54	1-Docoseno
52	28.111	0.52	Ciclopentadecano
3	2.634	0.5	Ciclooctano
12	6.114	0.49	Benceno

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 37 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 39. Cromatograma de la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 39 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 38. Compuestos presentes en la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con ZnO

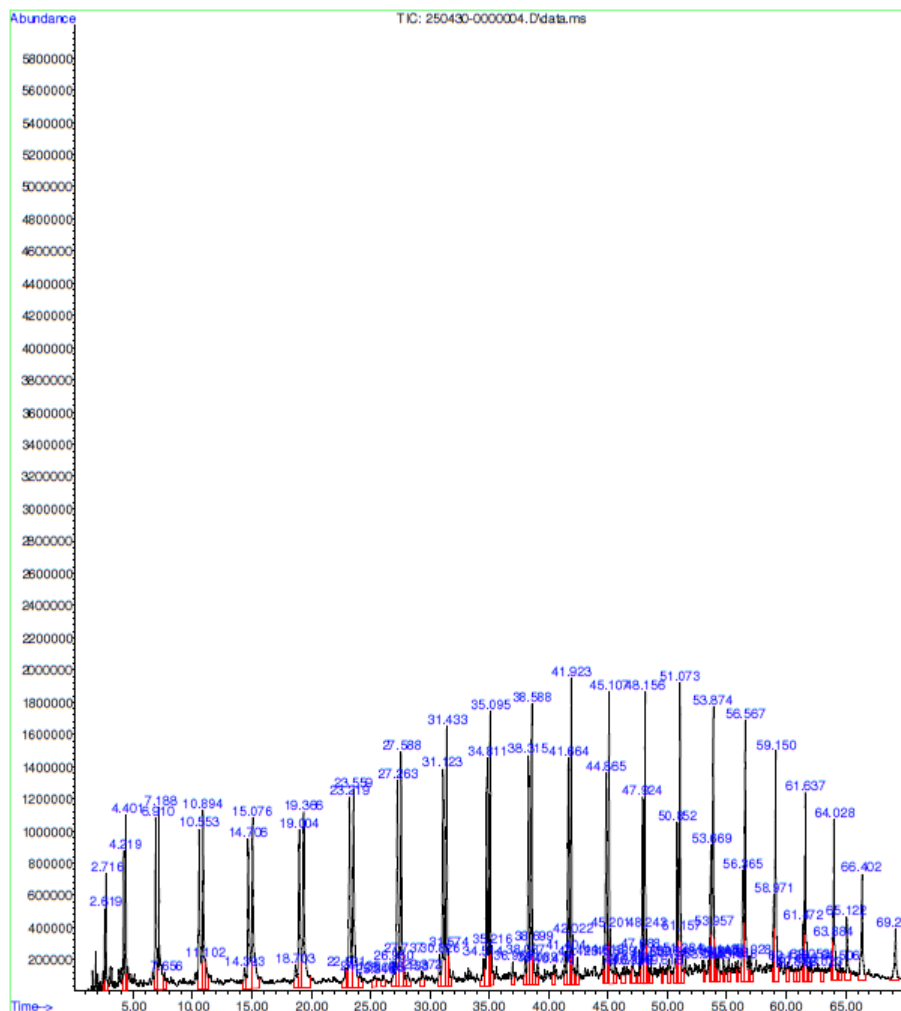
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
93	45.101	2.54	Eicosano
81	41.912	2.51	Nonadecano
103	48.153	2.51	Heneicosano
71	38.578	2.5	Octadecano
27	19.355	2.4	Tridecano
59	35.089	2.37	Heptadecano
112	51.068	2.37	Heneicosano
50	31.427	2.31	Hexadecano
123	53.87	2.22	Heptadecano
41	27.579	2.18	Pentadecano
40	27.252	2.03	1-Pentadeceno
131	56.554	2.01	Hexadecano
33	23.549	2	Tetradecano
49	31.114	1.95	2-Tetradeceno
58	34.793	1.94	1-Heptadeceno
32	23.208	1.92	2-Tetradeceno
70	38.3	1.9	1-Nonadeceno
80	41.648	1.82	1-Nonadeceno
26	18.991	1.75	1-Trideceno
138	59.138	1.71	Hexadecano
21	15.075	1.68	Dodecano
92	44.855	1.65	5-Eicoseno
20	14.707	1.63	1-Dodeceno
144	61.621	1.58	Eicosano
15	10.554	1.51	1-Undeceno
16	10.899	1.5	Undecano
102	47.912	1.45	1-Nonadeceno
146	64.014	1.39	Eicosano
111	50.832	1.3	E-15-Heptadecenal
9	6.919	1.28	1-Deceno
10	7.197	1.19	Decano
122	53.652	1.05	9-Tricoseno
150	66.384	0.94	Hexadecano
6	4.418	0.86	Nonano
130	56.354	0.82	3-Eicoseno
149	65.119	0.79	Heptano
5	4.231	0.76	Octano

2	2.725	0.65	Octano
51	31.564	0.65	7-Hexadeceno
94	45.201	0.64	5-Eicoseno
104	48.239	0.61	10-Heneicoseno
73	39.078	0.58	1-Hexadeceno
34	23.722	0.56	2-Tetradeceno
22	15.271	0.55	3-Dodeceno
42	27.734	0.55	Hexadecano
17	11.104	0.54	3-Undeceno
137	58.96	0.54	9-Tricoseno
72	38.696	0.51	5-Octadeceno
82	42.021	0.51	Z-5-Nonadeceno
132	56.64	0.49	Cyclotetracosano
134	57.032	0.48	Cyclotetracosano
151	69.204	0.47	Heptadeceno
60	35.212	0.46	8-Heptadeceno
84	42.408	0.44	Z-5-Nonadeceno
124	53.957	0.44	1-Tricoseno
11	7.379	0.42	cis-4-Deceno
43	28.125	0.42	1-Hexadeceno
52	31.946	0.42	3-Hexadeceno
88	43.863	0.42	Dodecano
105	48.626	0.42	1-Nonadeceno
113	51.159	0.42	1-Docoseno
1	2.625	0.39	1-Octeno
99	47.079	0.39	1-Hexadeceno
39	26.924	0.38	1-Octeno
48	30.813	0.38	Ciclohexadecano
57	34.502	0.38	Nonano
95	45.578	0.38	Ácido carbónico
115	51.546	0.37	3-Eicoseno
31	22.885	0.36	1-Octeno
127	54.735	0.36	1-Octeno
62	35.598	0.35	1-Heptadeceno

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 38 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 40. Cromatograma de la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 40 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 39. Compuestos presentes en la muestra 1 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5

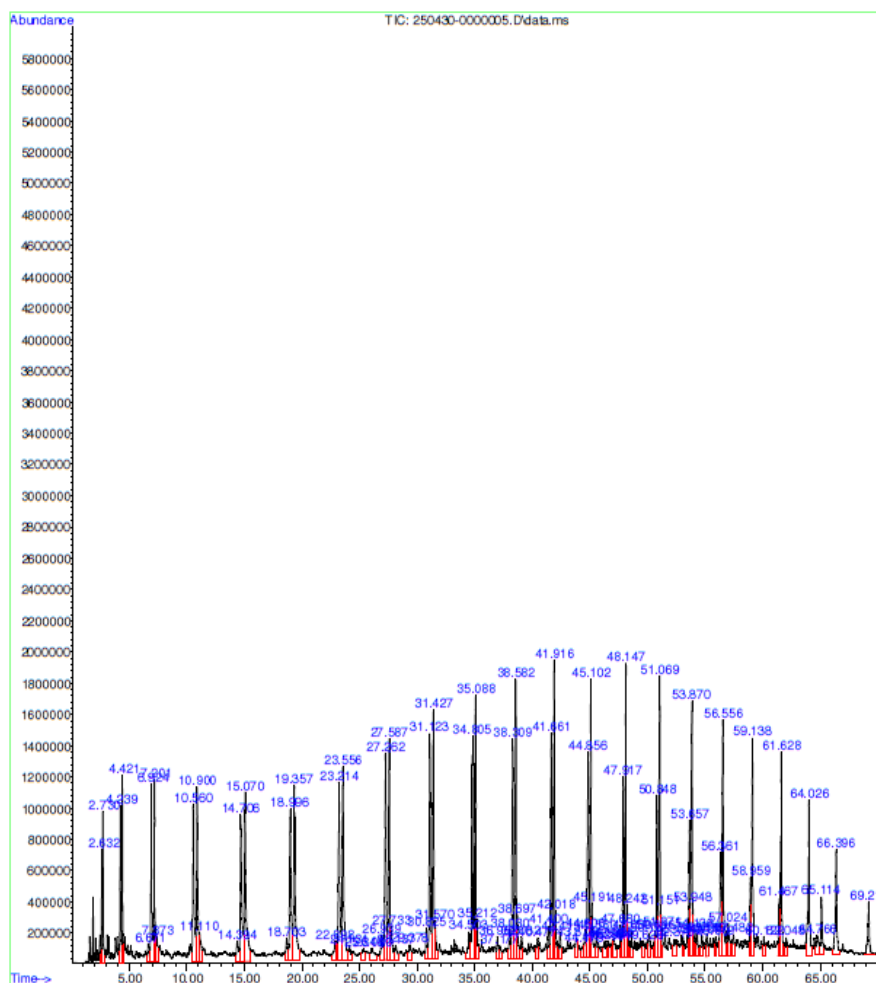
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
51	45.105	2.88	Eicosano
46	41.921	2.86	Pentadecano
79	56.568	2.86	Tetracosano
19	23.558	2.83	Tetradecano
40	38.587	2.83	Pentadecano
59	48.157	2.83	Heneicosano
35	35.094	2.72	Heptadecano
16	19.364	2.71	Tridecano
66	51.073	2.71	Hexadecano
31	31.432	2.65	Hexadecano
13	15.075	2.59	Dodecano
71	53.875	2.56	Hexadecano
25	27.588	2.54	Pentadecano
24	27.261	2.53	1-Pentadeceno
82	59.151	2.44	Hexadecano
30	31.123	2.42	9-Octadeceno
34	34.812	2.39	1-Heptadeceno
18	23.217	2.37	2-Tetradeceno
39	38.314	2.33	1-Nonadeceno
45	41.662	2.23	1-Nonadeceno
15	19.005	2.17	1-Trideceno
87	61.635	2.11	Hexadecano
50	44.864	2.04	5-Eicoseno
12	14.707	2	1-Dodeceno
8	10.554	1.84	1-Undeceno
58	47.925	1.81	E-15-Heptadecenal
9	10.895	1.76	Undecano
6	7.188	1.75	Decano
91	64.028	1.74	Heneicosano
65	50.85	1.62	1-Docoseno
5	6.91	1.46	1-Deceno
94	66.402	1.44	Tetracosano
70	53.67	1.41	9-Tricoseno
78	56.363	1.07	3-Eicoseno
4	4.399	0.86	Nonano
95	69.222	0.82	1-Heptadeceno

93	65.124	0.81	1,3-Benceno dicarboxílico acido
81	58.969	0.8	9-Tricosene
3	4.218	0.75	1-Nonene

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 39 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 1 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 41. Cromatograma de la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 41 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda

del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 40. Compuestos presentes en la muestra 2 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5

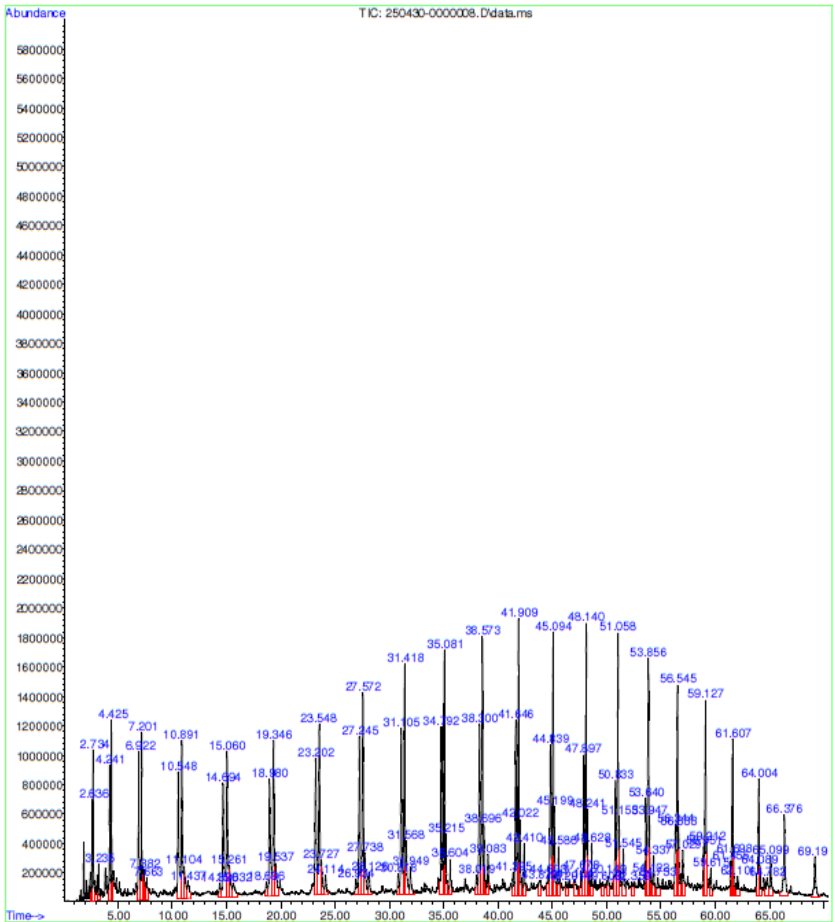
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
55	45.101	2.81	Eicosano
48	41.917	2.8	Tetradecano
42	38.582	2.79	Octadecano
20	23.558	2.77	Tetradecano
85	56.554	2.76	Tetracosano
64	48.148	2.75	Heneicosano
36	35.089	2.68	Heptadecano
71	51.068	2.65	Hexadecano
17	19.355	2.64	Tridecano
32	31.427	2.57	Hexadecano
14	15.07	2.52	Dodecano
26	27.588	2.48	Pentadecano
77	53.87	2.47	Hexadecano
25	27.261	2.45	1-Pentadeceno
31	31.123	2.39	2-Tetradeceno
35	34.807	2.34	1-Heptadeceno
19	23.213	2.33	1-Tetradeceno
89	59.138	2.33	Hexadecano
41	38.309	2.28	1-Nonadeceno
47	41.662	2.19	1-Nonadeceno
16	18.996	2.12	1-Trideceno
92	61.626	2.01	Tetracosano
54	44.855	2	5-Eicoseno
13	14.707	1.95	1-Dodeceno
94	64.027	1.94	1-Pentadeceno
9	10.558	1.82	1-Undeceno
63	47.916	1.76	3-Eicoseno
10	10.899	1.72	Undecano
70	50.846	1.59	1-Nonadeceno
6	6.924	1.51	1-Deceno
97	66.397	1.43	1-Heptadeceno
7	7.201	1.39	Decano
76	53.657	1.36	9-Tricoseno
84	56.358	1.07	3-Eicoseno

4	4.422	0.93	Nonano
3	4.24	0.85	Pentadecano
88	58.96	0.77	1-Tricoseno
98	69.213	0.77	Octadecano
96	65.115	0.73	1, 3-benceno dicarboxílico ácido
2	2.73	0.63	Octano
56	45.192	0.58	5-Eicoseno
33	31.568	0.56	3-Hexadeceno

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 40 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 2 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 42. Cromatograma de la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5



Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En la Figura 42 se observa la distribución de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 41. Compuestos presentes en la muestra 3 de producto líquido obtenido en la pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5

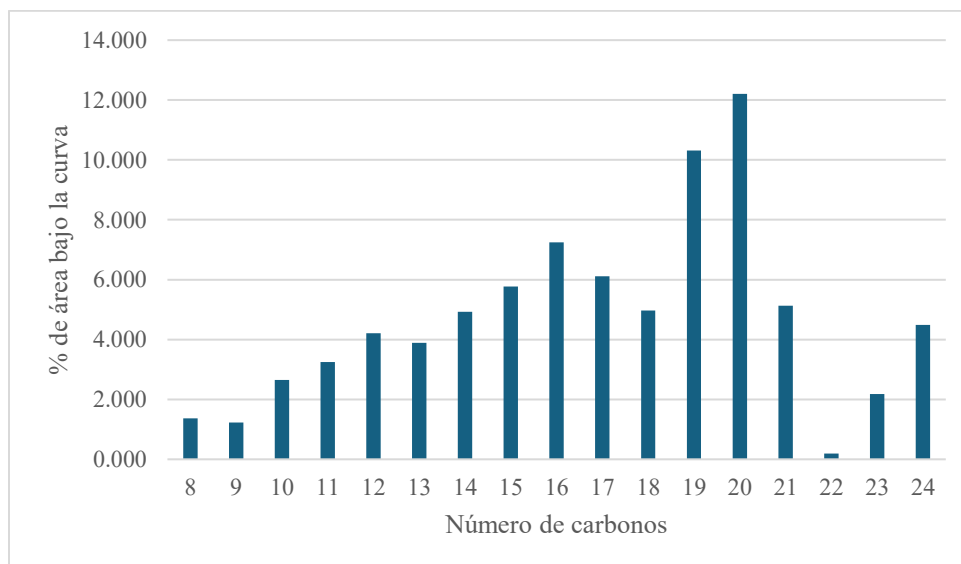
Número de pico	Retención (s)	% área bajo la curva	Compuesto
54	45.091	3.13	Eicosano
61	48.139	3.07	Heneicosano
48	41.907	3.05	Tetradecano
43	38.573	3.02	Octadecano
67	51.059	2.93	Hexadecano
38	35.08	2.86	Heptadecano
34	31.418	2.7	Hexadecano
72	53.857	2.68	Hexadecano
29	27.57	2.53	Pentadecano
78	56.545	2.49	Tetracosano
24	23.549	2.3	Tetradecano
28	27.247	2.19	Pentadeceno
33	31.104	2.15	Octadeceno
37	34.793	2.13	Heptadeceno
42	38.3	2.11	Nonadeceno
21	19.346	2.1	Tridecano
82	59.129	2.1	Hexadecano
23	23.203	2.04	Tetradeceno
47	41.644	2.04	Nonadeceno
16	15.061	1.95	Dodecano
20	18.978	1.89	Trideceno
53	44.837	1.84	Eicoseno
15	14.693	1.78	Dodeceno
11	10.89	1.76	Undecano
86	61.608	1.72	Hexadecano
10	10.549	1.71	Undeceno
60	47.898	1.6	Nonadeceno
6	6.924	1.47	Deceno
89	64.005	1.47	Hexadecano
7	7.201	1.43	Decano
66	50.832	1.38	Heptadecenal

93	66.375	1.36	Decano
71	53.638	1.1	Tricoseno
5	4.427	1.04	Nonano
4	4.24	0.89	Pentadecano
62	48.239	0.81	Heneicoseno
55	45.201	0.8	Eicoseno
77	56.345	0.8	Ciclotetracosano
35	31.568	0.76	Hexadeceno
2	2.735	0.74	Octano
80	57.027	0.71	Ciclotetracosano
94	69.19	0.71	Hexadeceno
44	38.696	0.69	Octadeceno
49	42.021	0.69	Nonadeceno
12	11.104	0.65	Pentadecano
30	27.738	0.65	Tetradeceno

Fuente: (Laboratorio Análisis Instrumental Avanzado UVG, 2025)

En el Cuadro 41 se observa el listado de compuestos del producto líquido obtenido de la corrida 3 de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 43. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE

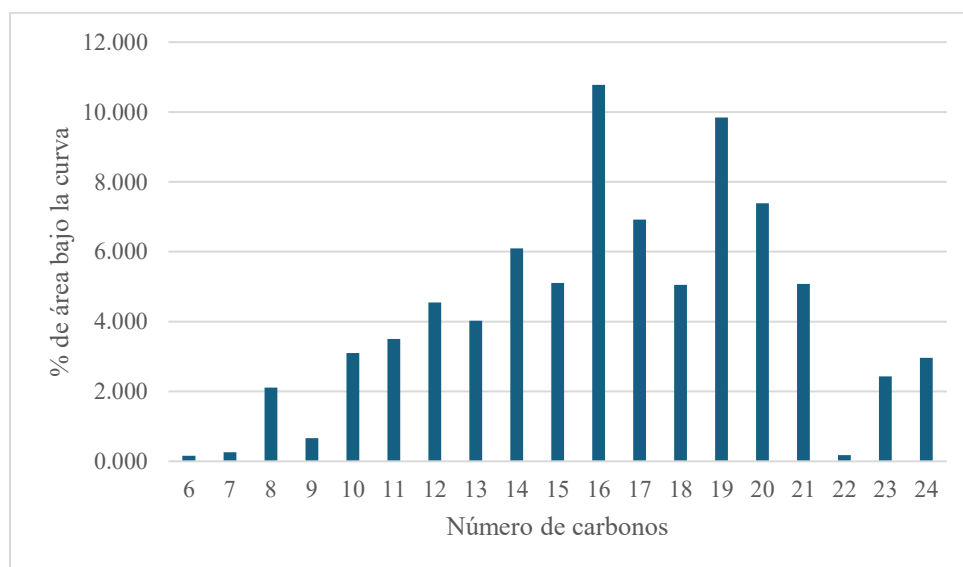


Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 43 se observa la distribución de compuestos de los productos líquidos obtenidos de pirólisis en base al porcentaje de área bajo la curva que representan según

la cantidad de carbonos de los componentes, para las muestras de pirólisis de HDPE. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

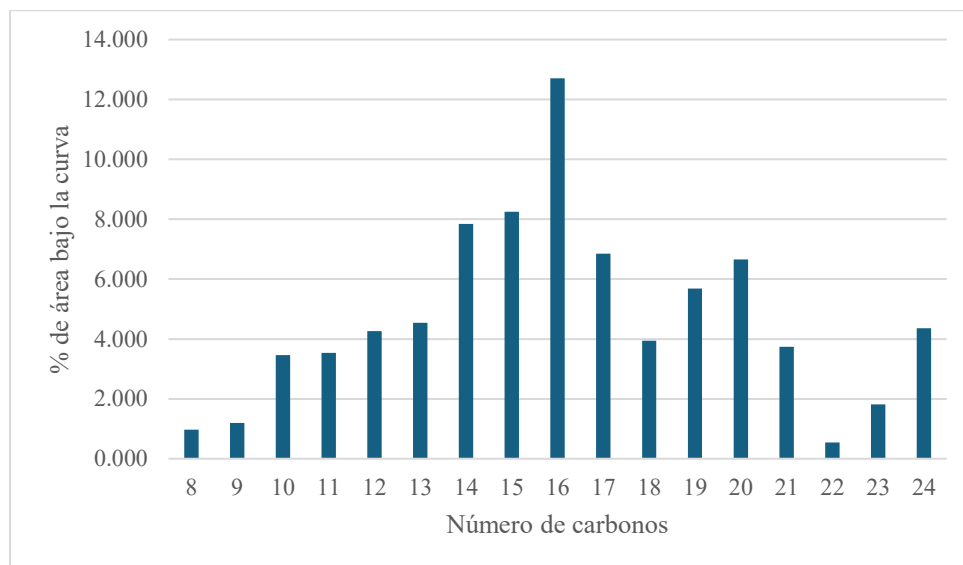
Figura 44. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE catalizada con óxido de zinc



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 44 se observa la distribución de compuestos de los productos líquidos obtenidos de pirólisis en base al porcentaje de área bajo la curva que representan según la cantidad de carbonos de los componentes, para las muestras de pirólisis de HDPE con ZnO. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 45. Distribución de compuestos en producto líquido (según número de carbonos) en pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5

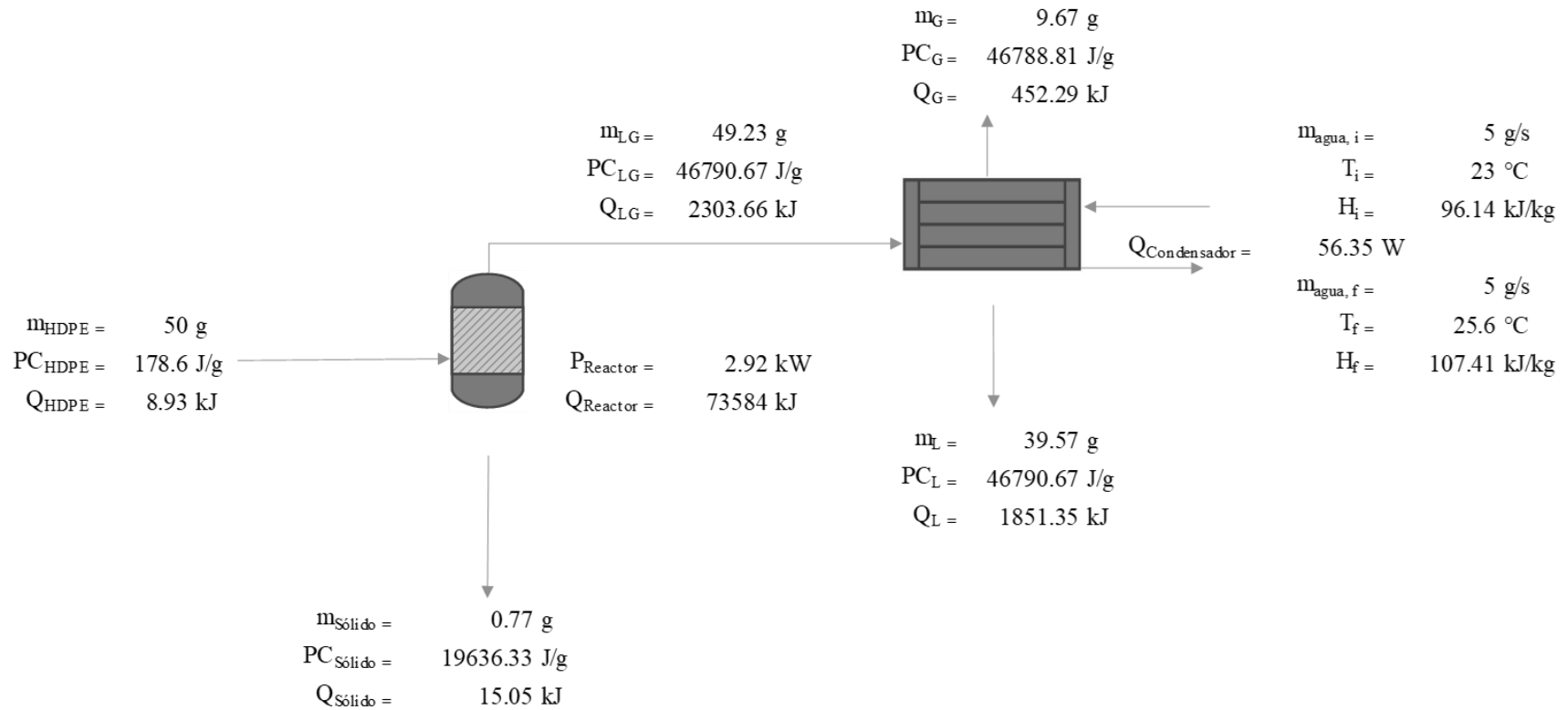


Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 45 se observa la distribución de compuestos de los productos líquidos obtenidos de pirólisis en base al porcentaje de área bajo la curva que representan según la cantidad de carbonos de los componentes, para las muestras de pirólisis de HDPE con zeolitas ZSM-5. Estos valores se obtuvieron a partir de las cromatografías de gases masa (GC-MS), con la ayuda del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

C. Balances de masa y energía

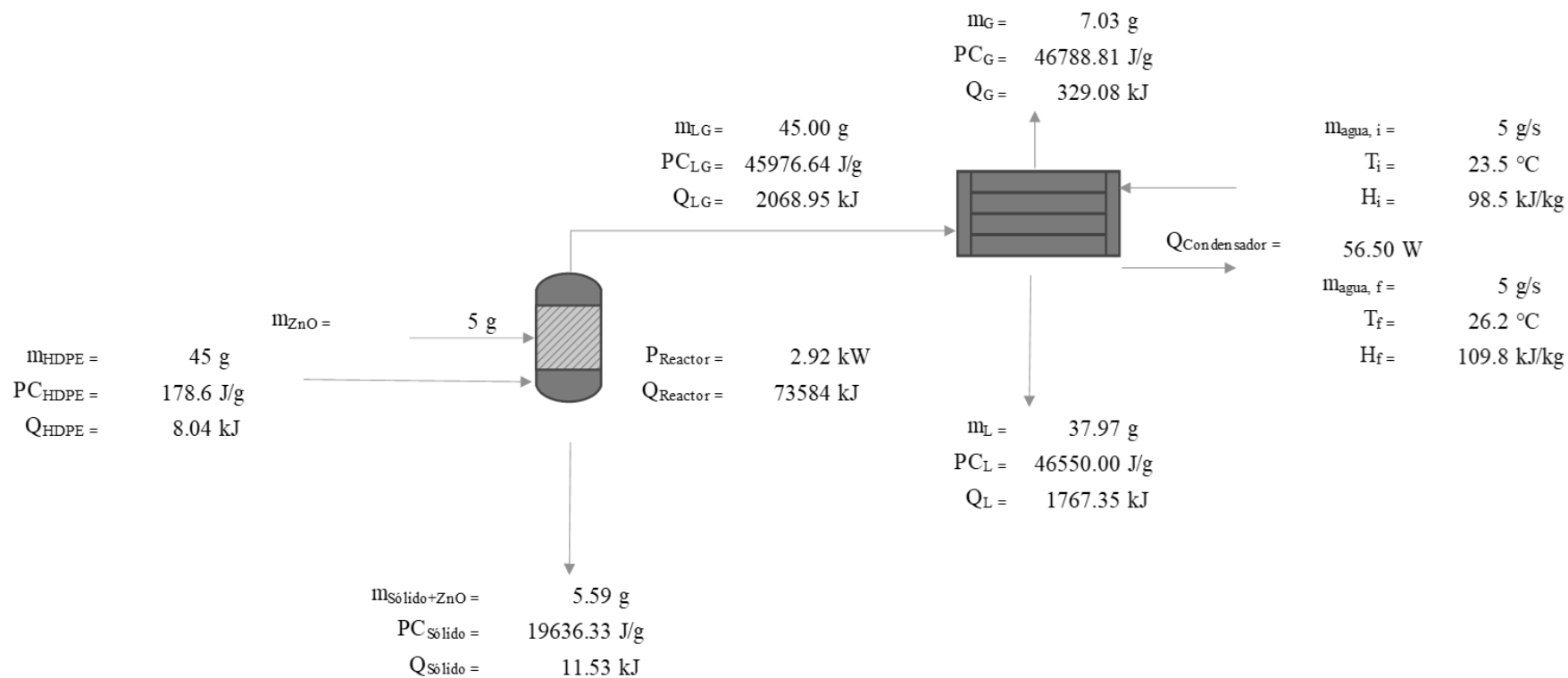
Figura 46. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE)



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 46 se observa el diagrama del balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE, para una muestra de 50 g de polímero.

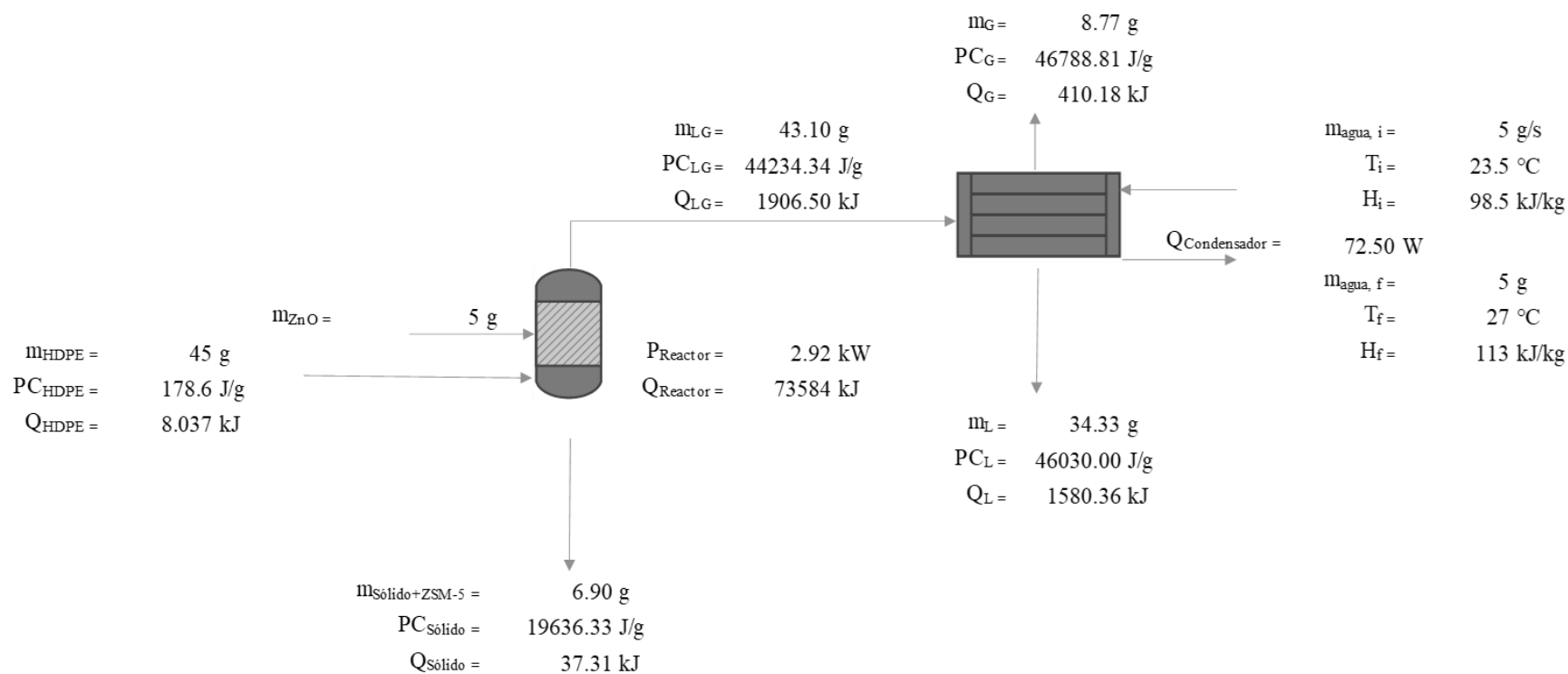
Figura 47. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con ZnO



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 47 se observa el diagrama del balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO (al 10 % m/m), para una muestra de 45 g de polímero.

Figura 48. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) catalizada con zeolitas ZSM-5



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 48 se observa el diagrama del balance de masa y energía del proceso de pirólisis de HDPE catalizada con zeolitas ZSM-5 (al 10 % m/m), para una muestra de 45 g de polímero.

D. Ecuaciones

Ecuación 1. Tamaño de muestra para población infinita

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$: Valor de la distribución Z con confiabilidad del 95 %

e : Margen de error

σ : Desviación estándar poblacional estimada

n : Tamaño de muestra

Fuente: (Anderson et al., 2012)

Ecuación 2. Masa de producto líquido obtenido

$$m_l = m_t - m_b$$

Donde:

m_l : Masa de producto líquido

m_t : Masa de beaker y producto líquido

m_b : Masa de beaker vacío

Fuente: (Green & Southard, 2019)

Ecuación 3. Balance de masa del proceso de pirólisis

$$m_{HDPE} = m_l + m_s + m_g$$

Donde:

m_{HDPE} : Masa de HDPE alimentado al reactor

m_l : Masa de producto líquido

m_s : Masa de producto sólido

m_g : Masa de producto gaseoso

Fuente: (Green & Southard, 2019)

Ecuación 4. Rendimiento de los productos obtenidos

$$\% R = \frac{m_l}{m_{HDPE}} * 100 \%$$

Donde:

m_{HDPE} : Masa de HDPE alimentado al reactor

m_l : Masa de producto líquido (también para m_g y m_s demás productos)

Fuente: (Green & Southard, 2019)

Ecuación 5. Cálculo de densidad

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

m : Masa de producto líquido (al restar peso de probeta vacía)

V : Volumen de probeta

Fuente: (Young & Freedman, 2011)

Ecuación 6. Cálculo de calor a partir de potencia

$$Q_{reactor} = P_{reactor} \times t$$

Donde:

$P_{reactor}$: Potencia del reactor

t : Tiempo de uso

Fuente: (Green & Southard, 2019)

Ecuación 7. Cálculo de potencia a partir de entalpías

$$P_{condensador} = \dot{m}(\widehat{H}_{sal} - \widehat{H}_{ent})$$

Donde:

$\dot{m}$: Flujo másico de agua en condensador

$\widehat{H}_{sal}$: Entalpía del agua en la salida

$\widehat{H}_{ent}$: Entalpía del agua en la entrada

Fuente: (Green & Southard, 2019)

Ecuación 8. Modelo de la ecuación de Boltzmann para hornos mufla (empleando rampas de calentamiento)

$$T = \frac{(\text{Temp}_2 - \text{Temp}_1) * e^{\frac{t_1 - t}{n_1}}}{n_1 * \left(1 + e^{\frac{t_1 - t}{n_1}}\right)}$$

Donde:

Temp_1 : Temperatura 1

Temp_2 : Temperatura 2

t_1 : Constante

n_1 : Constante

t : Tiempo

Fuente: (Green & Southard, 2019)

Ecuación 9. Constante de descomposición de Arrhenius

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Donde:

E_a : Energía de activación

R : Constante de gases ideales

T : Temperatura (a partir de ecuación de Boltzmann)

A : Constante de frecuencia

Fuente: (Green & Southard, 2019)

Ecuación 10. Velocidad de reacción de pirólisis

$$r_w = k(W - W_f)^n$$

Donde:

k : Constante de descomposición de Arrhenius

W : Masa instantánea dentro del reactor

W_f : Masa final de producto sólido dentro del reactor

n : Orden de reacción

Fuente: (Green & Southard, 2019)

E. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Determinación del tamaño de la muestra

$$n = \frac{(1.96)^2 * (0.04)^2}{0.05^2} = 2.46 \approx 3 \text{ muestras}$$

En el Cálculo 1 se observa el tamaño de muestra determinado, empleando un valor de margen de error del 5 %, un valor de $Z_{\alpha/2}$ de 1.96 (para una confianza del 95 %), y una desviación estándar poblacional estimada de 4.0 %. Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 1.

Cálculo 2. Masa de combustible líquido obtenido de pirólisis

$$m_c = 88.3g \pm 0.1 g - 87.3 g \pm 0.1 g = 1.0 \pm 0.1 g$$

En el Cálculo 2 se observa el resultado de combustible líquido obtenido de la pirólisis de HDPE, al restar la masa del beaker vacío de la masa de beaker con el combustible recuperado. Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 2 con los datos del Cuadro 7 de datos originales. Se llevó a cabo de la misma forma para los datos de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5.

Cálculo 3. Balance de masa del producto gaseoso del proceso de pirólisis

$$m_g = 50.0 g \pm 0.1 g - 39.3 g \pm 0.1 g - 0.5 g \pm 0.1 g = 10.2 \pm 0.17 g$$

En el Cálculo 3 se observa el resultado del rendimiento de combustible gaseoso obtenido de la pirólisis de HDPE. Este cálculo se llevó a cabo de la misma forma para los datos de producto gaseoso de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5. Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 3, y los datos del Cuadro 20 de datos calculados. Se llevó a cabo de la misma forma para los datos de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5.

Cálculo 4. Rendimiento de combustible líquido

$$\% R_l = \frac{39.3 g \pm 0.1 g}{50.0 g \pm 0.1 g} = 78.60 \pm 0.25 \% \text{ (m/m)}$$

En el Cálculo 4 se observa el resultado del rendimiento de combustible líquido obtenido de la pirólisis de HDPE. Este cálculo se llevó a cabo de la misma forma para los datos de producto líquido, gaseosos y sólido de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5. Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 4, y los datos del Cuadro 20 de datos originales. Se llevó a

cabo de la misma forma para los datos de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5.

Cálculo 5. Determinación de la densidad del producto líquido

$$\rho = \frac{7.886 \pm 0.001 \text{ g}}{10 \pm 0.05 \text{ mL}} = 0.7886 \pm 0.039 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 788.6 \pm 3.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En el Cálculo 5 se observa el resultado del calor del reactor utilizado para calentar la muestra durante la pirólisis, empleando la potencia de la mufla y el tiempo de calentamiento. Este cálculo se llevó a cabo de la misma forma para los datos de pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5. Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 5, el tiempo de operación y los datos del Cuadro 42 de datos de placa (de la mufla). Se llevó a cabo de la misma forma para los datos de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5.

Cálculo 6. Calor del reactor

$$Q_{\text{reactor}} = 2.92 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * 7 \text{ h} = 73584 \text{ kJ}$$

En el Cálculo 6 se observa el resultado del calor del reactor utilizado para calentar la muestra durante la pirólisis, empleando la potencia de la mufla y el tiempo de calentamiento. Este cálculo se llevó a cabo de la misma forma para los datos de pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5. Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 6, el tiempo de operación y los datos del Cuadro 42 de datos de placa (de la mufla). Se llevó a cabo de la misma forma para los datos de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5.

Cálculo 7. Calor del condensador

$$Q_{\text{condensador}} = 5 \frac{\text{g}}{\text{s}} * \left(\frac{107.41 \text{ kJ}}{\text{kg}} - \frac{96.14 \text{ kJ}}{\text{kg}} \right) = 56.35 \text{ W}$$

En el Cálculo 7 se observa el resultado del calor del condensador, al emplear las entalpías de entrada y salida del agua de enfriamiento. Este cálculo se llevó a cabo de la misma forma para los datos de pirólisis de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5. Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 7, y las entalpías del agua de condensación en la entrada y salida (Green & Southard, 2019). Se llevó a cabo de la misma forma para los datos de las pirólisis de HDPE y de HDPE catalizada con ZnO y catalizada con zeolitas ZSM-5.

Figura 49. Código de la cinética promedio de los datos de pirólisis de HDPE utilizando el software Berkeley Madonna

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 270

DT = 0.02

$rw = (K * (HDPE - Wf)^n)$

$K = A * \exp(-Ea / (R * Temperatura))$

A = 1.6867E25

Ea = 230148.18652

R = 8.314

Wf = 0.2077

n = 2.14883

Rampa0 = 0

$Rampa1 = ((Temp2 - Temp1) * \exp((t1 - TIME) / n1)) / (n1 * (1 + \exp((t1 - TIME) / n1)))$

$Rampa2 = ((Temp3 - Temp2) * \exp((t2 - TIME) / n2)) / (n2 * (1 + \exp((t2 - TIME) / n2)))$

$Rampa3 = ((Temp4 - Temp3) * \exp((t3 - TIME) / n3)) / (n3 * (1 + \exp((t3 - TIME) / n3)))$

$Rampa4 = ((Temp5 - Temp4) * \exp((t4 - TIME) / n4)) / (n4 * (1 + \exp((t4 - TIME) / n4)))$

$Rampa5 = ((Temp6 - Temp5) * \exp((t5 - TIME) / n5)) / (n5 * (1 + \exp((t5 - TIME) / n5)))$

$Rampa6 = ((Temp7 - Temp6) * \exp((t6 - TIME) / n6)) / (n6 * (1 + \exp((t6 - TIME) / n6)))$

$Rampa7 = ((Temp8 - Temp7) * \exp((t7 - TIME) / n7)) / (n7 * (1 + \exp((t7 - TIME) / n7)))$

$Rampa8 = ((Temp9 - Temp8) * \exp((t8 - TIME) / n8)) / (n8 * (1 + \exp((t8 - TIME) / n8)))$

Temp1 = 390

Temp2 = 398

Temp3 = 406

Temp4 = 414

Temp5 = 422

Temp6 = 430

Temp7 = 438

Temp8 = 446

Temp9 = 454

n1 = 0.24468

n2 = 0.69133

n3 = 0.69459

n4 = 0.26808

n5 = 0.69125

n6 = 0.76365

n7 = 0.29008

n8 = 0.69014

t1 = 25.1358

t2 = 55.37113

t3 = 85.37266

t4 = 115.14837

t5 = 145.37108

t6 = 175.3998

t7 = 205.15736

t8 = 235.37047

init Temperatura = 390

init HDPE = 50

init Liquido = 0

init Gas = 0

init Solido = 0

d/dt(Temperatura)= if TIME < 25 then Rampa0 else if TIME < 55 then Rampa1 else if TIME < 85 then Rampa2 else if TIME < 115 then Rampa3 else if TIME < 145 then Rampa4 else if TIME < 175 then Rampa5 else if TIME < 205 then Rampa6 else if TIME < 235 then Rampa7 else Rampa8

d/dt(HDPE) = if TIME < 60 then rw = 0 else-rw

d/dt(Liquido) = if HDPE = 50 then 0 else 0.8037*rw

d/dt(Gas) = 0.1963*rw

d/dt(Solido) = 0.0156*rw

Figura 50. Código de la cinética promedio de los datos de pirólisis de HDPE con ZnO al 10 % (m/m) utilizando el software Berkeley Madonna

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME =270

DT = 0.02

rw = (K*(HDPE-Wf)^n)

K = A*exp(-Ea/(R*Temperatura))

A = 1.6999E25

Ea = 230877.10547

R = 8.314

Wf = 0.2

n = 2.1389

Rampa0 = 0

Rampa1 = ((Temp2-Temp1)*exp((t1-TIME)/n1))/(n1*(1+exp((t1-TIME)/n1)))

$$\text{Rampa2} = ((\text{Temp3} - \text{Temp2}) * \exp((t2 - \text{TIME})/n2)) / (n2 * (1 + \exp((t2 - \text{TIME})/n2)))$$

$$\text{Rampa3} = ((\text{Temp4} - \text{Temp3}) * \exp((t3 - \text{TIME})/n3)) / (n3 * (1 + \exp((t3 - \text{TIME})/n3)))$$

$$\text{Rampa4} = ((\text{Temp5} - \text{Temp4}) * \exp((t4 - \text{TIME})/n4)) / (n4 * (1 + \exp((t4 - \text{TIME})/n4)))$$

$$\text{Rampa5} = ((\text{Temp6} - \text{Temp5}) * \exp((t5 - \text{TIME})/n5)) / (n5 * (1 + \exp((t5 - \text{TIME})/n5)))$$

$$\text{Rampa6} = ((\text{Temp7} - \text{Temp6}) * \exp((t6 - \text{TIME})/n6)) / (n6 * (1 + \exp((t6 - \text{TIME})/n6)))$$

$$\text{Rampa7} = ((\text{Temp8} - \text{Temp7}) * \exp((t7 - \text{TIME})/n7)) / (n7 * (1 + \exp((t7 - \text{TIME})/n7)))$$

$$\text{Rampa8} = ((\text{Temp9} - \text{Temp8}) * \exp((t8 - \text{TIME})/n8)) / (n8 * (1 + \exp((t8 - \text{TIME})/n8)))$$

$$\text{Temp1} = 390$$

$$\text{Temp2} = 398$$

$$\text{Temp3} = 406$$

$$\text{Temp4} = 414$$

$$\text{Temp5} = 422$$

$$\text{Temp6} = 430$$

$$\text{Temp7} = 438$$

$$\text{Temp8} = 446$$

$$\text{Temp9} = 454$$

$$n1 = 0.24468$$

$$n2 = 0.69133$$

$$n3 = 0.69459$$

$$n4 = 0.26808$$

$$n5 = 0.69125$$

$$n6 = 0.76365$$

$$n7 = 0.29015$$

$$n8 = 0.69014$$

```

t1 = 25.1358
t2 = 55.37113
t3 = 85.37266
t4 = 115.14837
t5 = 145.37108
t6 = 175.3998
t7 = 205.15741
t8 = 235.37047

```

```

init Temperatura = 390
init HDPE = 45
init Liquido = 0
init Gas = 0
init Solido = 0

```

```

d/dt(Temperatura)= if TIME < 25 then Rampa0 else if TIME < 55 then Rampa1 else
if TIME < 85 then Rampa2 else if TIME < 115 then Rampa3 else if TIME < 145
then Rampa4 else if TIME < 175 then Rampa5 else if TIME < 205 then Rampa6
else if TIME < 235 then Rampa7 else Rampa8

d/dt(HDPE) = if TIME < 60 then rw = 0 else-rw

d/dt(Liquido) = if HDPE = 45 then 0 else 0.8437*rw

d/dt(Gas) = 0.1432*rw

d/dt(Solido) = 0.0131*rw

```

Figura 51. Código de la cinética promedio de los datos de pirólisis de HDPE con ZSM-5 al 10 % (m/m) utilizando el software Berkeley Madonna

```

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME =270

```


$$DT = 0.02$$

$$rw = (K*(HDPE-Wf)^n)$$

$$K = A*\exp(-Ea/(R*Temperatura))$$

$$A = 1.7144E25$$

$$Ea = 199716.36328$$

$$R = 8.314$$

$$Wf = 0.5$$

$$n = 2.15155$$

$$Rampa0 = 0$$

$$Rampa1 = ((Temp2-Temp1)*\exp((t1-TIME)/n1))/(n1*(1+\exp((t1-TIME)/n1)))$$

$$Rampa2 = ((Temp3-Temp2)*\exp((t2-TIME)/n2))/(n2*(1+\exp((t2-TIME)/n2)))$$

$$Rampa3 = ((Temp4-Temp3)*\exp((t3-TIME)/n3))/(n3*(1+\exp((t3-TIME)/n3)))$$

$$Rampa4 = ((Temp5-Temp4)*\exp((t4-TIME)/n4))/(n4*(1+\exp((t4-TIME)/n4)))$$

$$Rampa5 = ((Temp6-Temp5)*\exp((t5-TIME)/n5))/(n5*(1+\exp((t5-TIME)/n5)))$$

$$Rampa6 = ((Temp7-Temp6)*\exp((t6-TIME)/n6))/(n6*(1+\exp((t6-TIME)/n6)))$$

$$Rampa7 = ((Temp8-Temp7)*\exp((t7-TIME)/n7))/(n7*(1+\exp((t7-TIME)/n7)))$$

$$Rampa8 = ((Temp9-Temp8)*\exp((t8-TIME)/n8))/(n8*(1+\exp((t8-TIME)/n8)))$$

$$Temp1 = 330$$

$$Temp2 = 338$$

$$Temp3 = 346$$

$$Temp4 = 354$$

$$Temp5 = 362$$

$$Temp6 = 370$$

$$Temp7 = 378$$

Temp8 = 386

Temp9 = 394

n1 = 0.24468

n2 = 0.69133

n3 = 0.69459

n4 = 0.26808

n5 = 0.69125

n6 = 0.76365

n7 = 0.29015

n8 = 0.69014

t1 = 25.1358

t2 = 55.37113

t3 = 85.37266

t4 = 115.14837

t5 = 145.37108

t6 = 175.3998

t7 = 205.15741

t8 = 235.37047

init Temperatura = 330

init HDPE = 45

init Liquido = 0

init Gas = 0

init Solido = 0

$d/dt(\text{Temperatura}) = \text{if TIME} < 25 \text{ then Rampa0 else if TIME} < 55 \text{ then Rampa1 else}$
 $\text{if TIME} < 85 \text{ then Rampa2 else if TIME} < 115 \text{ then Rampa3 else if TIME} < 145$
 $\text{then Rampa4 else if TIME} < 175 \text{ then Rampa5 else if TIME} < 205 \text{ then Rampa6}$
 $\text{else if TIME} < 235 \text{ then Rampa7 else Rampa8}$

$d/dt(\text{HDPE}) = \text{if TIME} < 60 \text{ then rw} = 0 \text{ else-rw}$

$d/dt(\text{Liquido}) = \text{if HDPE} = 45 \text{ then } 0 \text{ else } 0.7630 * \text{rw}$

$d/dt(\text{Gas}) = 0.1948 * \text{rw}$

$d/dt(\text{Solido}) = 0.0422 * \text{rw}$

F. Análisis de error

Ecuación 1. Cálculo de la media

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

Donde:

X_i : Conjunto de observaciones

N : Número de observaciones

Fuente: (Anderson et al., 2012)

$$\bar{X} = \frac{78.60 + 79.00 + 79.80}{3}$$

$$\bar{X} = 79.13 \% \text{ (m/m)}$$

Este cálculo se realizó empleando datos del Cuadro 21 de datos originales, para determinar la media del rendimiento de producto líquido de pirólisis y se realizó de igual forma para la media de los datos de producto gaseoso, sólido de pirólisis, densidad y poder calorífico.

Ecuación 2. Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

Donde:

X_i : Conjunto de observaciones

$\bar{X}$: Media

N : Número de observaciones

Fuente: (Anderson et al., 2012)

$$\sigma = \sqrt{\frac{(78.60 - 79.13)^2 + (79.80 - 79.13)^2 + (79.00 - 79.13)^2}{3 - 1}}$$

$$\sigma = 0.61 \% \text{ (m/m)}$$

Este cálculo se realizó empleando datos del Cuadro 21 de datos originales, para determinar la desviación estándar del rendimiento de producto líquido de pirólisis y se realizó de igual forma para la media de los datos de producto gaseoso, sólido de pirólisis, densidad y poder calorífico.

Ecuación 3. Intervalo de confianza al 95 %

$$IC = \bar{X} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Donde:

$\bar{X}$: Media

t : Valor de área en distribución t – student (según grados de libertad)

σ : Desviación estándar

N : Número de observaciones

Fuente: (Anderson et al., 2012)

$$IC = 79.13 \% \text{ (m/m)} \pm (4.303) \frac{0.61 \%}{\sqrt{3}}$$

$$IC = 79.13 \pm 1.52 \% \text{ (m/m)}$$

$$IC = [77.62 - 80.65] \% \text{ (m/m)}$$

Para 2 grados de libertad y 95 % de confianza. Este cálculo se realizó empleando datos del Cuadro 21 de datos originales, para determinar el intervalo de confianza del rendimiento de producto líquido de pirólisis y se realizó de igual forma para la media de los datos de producto gaseoso, sólido de pirólisis, densidad y poder calorífico.

Ecuación 4. Coeficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100$$

Donde:

$\bar{X}$: Media

σ : Desviación estándar

Fuente: (Anderson et al., 2012)

$$CV = \frac{0.61 \% (m/m)}{79.13 \% (m/m)} * 100$$

$$CV = 0.77 \% (m/m)$$

Este cálculo se realizó empleando datos del Cuadro 21 de datos originales, para determinar el coeficiente de variación del rendimiento de producto líquido de pirólisis y se realizó de igual forma para la media de los datos de producto gaseoso, sólido de pirólisis, densidad y poder calorífico.

Ecuación 5. Incertidumbre de suma y resta

$$S_y = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2 \dots}$$

Donde:

S_a : Incertidumbre del valor a, b, c ...

Fuente: (Anderson et al., 2012)

$$S_y = \sqrt{(0.1g)^2 + (0.1g)^2}$$

$$S_y = 0.14 g$$

Este cálculo se realizó empleando datos del Cuadro 20 de datos originales para la incertidumbre del producto gaseoso de pirólisis y se realizó de igual forma para la media de los datos de producto gaseoso, sólido de pirólisis, densidad y poder calorífico.

Ecuación 6. Incertidumbre de multiplicación y división

$$\frac{S_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{S_c}{c}\right)^2 \dots}$$

Donde:

S_a : Incertidumbre del valor a, b, c ...

a, b, c... : Valor de cada medida

y : Valor del resultado del cálculo

Fuente: (Anderson et al., 2012)

$$S_y = (7.886g/mL) \sqrt{\left(\frac{0.001 g}{7.886 g}\right)^2 + \left(\frac{0.05 mL}{10 mL}\right)^2}$$

$$S_y = 0.039 \text{ g/mL}$$

Este cálculo se realizó empleando datos del Cuadro 29 de datos originales, para determinar la incertidumbre de la densidad del producto líquido de pirólisis y se realizó de igual forma para la media de los datos de producto gaseoso, sólido de pirólisis, densidad y poder calorífico.

G. Figuras e imágenes de experimentación

Figura 52. Certificado de análisis de reactivo óxido de zinc (1)



INDUSTRIAS ELECTRO QUIMICAS S.A.

AV. ELMER FAUCETT 1920 - CALLAO 07041 - PERU -
Teléfono 014-4300 Fax: 072-0118 *www.ieqsa.com.pe* E-mail: ieqsa@ieqsa.com.pe

CERTIFICADO DE ANÁLISIS # 20240324

Cilente _____

Lote # 20240203

Descripción Óxido de Zinc Sello de Oro USP

INFORMACIÓN DE EMBARQUE

Fecha Febrero 13, 2024

NAVE JENS MAERSK

Factura # F001 - 00011512

Pedido # 1002432

Cantidad 21.0000 t

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Elemento	Especificación %	Min	Max	Producción Prom.
As	0.0001 MAX	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Cd	0.0010 MAX	0.0002	0.0005	0.0003
Cl	0.0005 MAX	0.0004	0.0004	0.0004
Cu	0.0002 MAX	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Fe	0.0005 MAX	0.0002	0.0002	0.0002
Mn	0.0001 MAX	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Ni	0.0001 MAX	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
PbO	0.0020 MAX	0.0011	0.0018	0.0014
ZnO	99.9 MIN	99.9000	99.9000	99.9000
S	0.0007 MAX	0.0001	0.0001	0.0001
Ti	0.0005 MAX	0.0005	0.0005	0.0005
Total Impurezas	0.1 MAX	0.1000	0.1000	0.1000

OTRAS CARACTERÍSTICAS

Item	Especificación	Min	Max	Producción Prom.
Área superficial método BET (m2/g)	3.5 - 7	3.8000	4.7000	4.4667
Granulometría (malla # -325) (%) ¹	99.9 MIN	99.9770	99.9800	99.9780
Humedad (%) ¹	0.2 MAX	0.0900	0.0900	0.0900
Materia volátil (%) ¹	0.2 MAX	0.1100	0.1100	0.1100
Pérdida por ignición (%) ¹	0.2 MAX	0.1400	0.1600	0.1500
Peso específico (g/cm3)	5.6	5.6000	5.6000	5.6000
Sales soluble en agua (%) ¹	0.10 MAX	0.0900	0.0900	0.0900
Solubilidad en HCl (%) ¹	99.9 MIN	99.9760	99.9780	99.9767
pH ¹	7.3 - 7.5	7.4000	7.4000	7.4000

¹ Según Norma DIN 50908 (Método de análisis en óxido de Zinc)
² Según Norma ASTM D 280 Método "A"
 Complies with USP and European Pharmacopoeia



Aprobado por Ing. BACA SANCHEZ JOHNNY JESUS
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD

FECHA DE CERTIFICADO
Febrero 13, 2024

Este documento no debe ser reproducido, salvo previa autorización escrita del laboratorio.

1 / 3

CC-PD-003-FR-001
Rev. 00
RCMCC011

Fuente: (IEQSA, 2024)

En la Figura 52 se observa el certificado de análisis del reactivo óxido de zinc empleado como catalizador en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

Figura 53. Certificado de análisis de reactivo óxido de zinc (2)



INDUSTRIAS ELECTRO QUIMICAS S.A.

AV. ELMER FAUCETT 1920 - CALLAO 07041 - PERU -
Teléfono 614-4300 Fax. 672-0118 * www.ieqsa.com.pe * E-mail: ieqsa@ieqsa.com.pe

CERTIFICADO DE ANÁLISIS # 20240324

Pedido # 1002432

Cliente _____

Lote # **20240203**

Paleta o Bolsón Número	Producción Fecha a/m/d	Expiración Fecha a/m/d
1434	2024/02/09	2027/02/09
1435	2024/02/09	2027/02/09
1436	2024/02/09	2027/02/09
1437	2024/02/09	2027/02/09
1438	2024/02/09	2027/02/09
1439	2024/02/09	2027/02/09
1440	2024/02/09	2027/02/09
1441	2024/02/09	2027/02/09
1442	2024/02/09	2027/02/09
1443	2024/02/09	2027/02/09
1444	2024/01/19	2027/01/19
1445	2024/02/09	2027/02/09
1446	2024/02/09	2027/02/09
1447	2024/02/09	2027/02/09
1448	2024/02/09	2027/02/09
1449	2024/02/09	2027/02/09
1450	2024/02/09	2027/02/09
1451	2024/02/09	2027/02/09
1452	2024/02/09	2027/02/09
1453	2024/02/09	2027/02/09
1454	2024/02/09	2027/02/09

2 / 3

RCMCC011

Fuente: (IEQSA, 2024)

En la Figura 53 se observa el certificado de análisis del reactivo óxido de zinc empleado como catalizador en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

Figura 54. Certificado de análisis de reactivo óxido de zinc (3)


INDUSTRIAS ELECTRO QUIMICAS S.A.
AV. ELMER FAUCETT 1920 - CALLAO 07041 - PERU -
 Teléfono 514-4300 Fax. 572-0118 *www.ieqsa.com.pe * E-mail: ieqsa@ieqsa.com.pe
CERTIFICADO DE ANÁLISIS # 20240324

Ciente _____

Lote # **20240203**

Descripción **Oxido de Zinc Sello de Oro USP**

	Análisis	USP 40	BP / Ph EUR	Resultado USP 40 - BP / Ph EUR
A)	Oxido de Zinc	(99.0 - 100.5) %	(99.0 - 100.5) %	Ok
B)	De plomo	No debe producir turbidez o precipitado al adicionar gotas de Cromato de potasio	Max. 50 ppm	Ok
C)	Hierro y Otros metales pesados	Se forman precipitados blancos en las dos alícuotas, (al adicionar Ferrocianuro de potasio y Sulfuro de sodio).	Hierro Max. 200 ppm	Ok
D)	Antimonio	Max. 5 ppm	Max. 5 ppm	Ok
E)	Cadmio	-	Max. 10 ppm	Ok
F)	Alcalinidad	No debe producir coloración al adicionar gotas de fenoltaleína. Si al filtrar se produce un color rojo, se requiere no más de 0.3 ml de HCl 0.1 N	No debe producir coloración al adicionar gotas de fenoltaleína. Si al filtrar se produce un color rojo, se requiere no más de 0.3 ml de HCl 0.1 M	Ok
G)	Pérdida por ignición	Max. 1 %	Max. 1 %	Ok
H)	Identificación A	Cuando es calentado fuertemente asume color amarillento que desaparece con el enfriamiento	Cuando es calentado fuertemente asume color amarillento que desaparece con el enfriamiento	Ok
I)	Carbonato y color de la solución	No debe producir efervescencia y la solución resultante es transparente e incolora al adicionar ácido sulfúrico 2 N.	No debe producir efervescencia ni coloración al diluirse con ácido clorhídrico	Ok
J)	Apariencia - Solubilidad	-	Apariencia: Polvo muy fino, inodoro, amorfo de color blanco o blanco amarillento, sin partículas arenosas. Solubilidad: Prácticamente insoluble en agua y en etanol (96%). Se disuelve en soluciones ácidas.	Ok
K)	Identificación B	Al diluir con ácido clorhídrico 3 N Se disuelve.	Al diluir con ácido clorhídrico diluido Se disuelve.	Ok

3 / 3
RCMCC011

Fuente: (IEQSA, 2024)

En la Figura 54 se observa el certificado de análisis del reactivo óxido de zinc empleado como catalizador en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

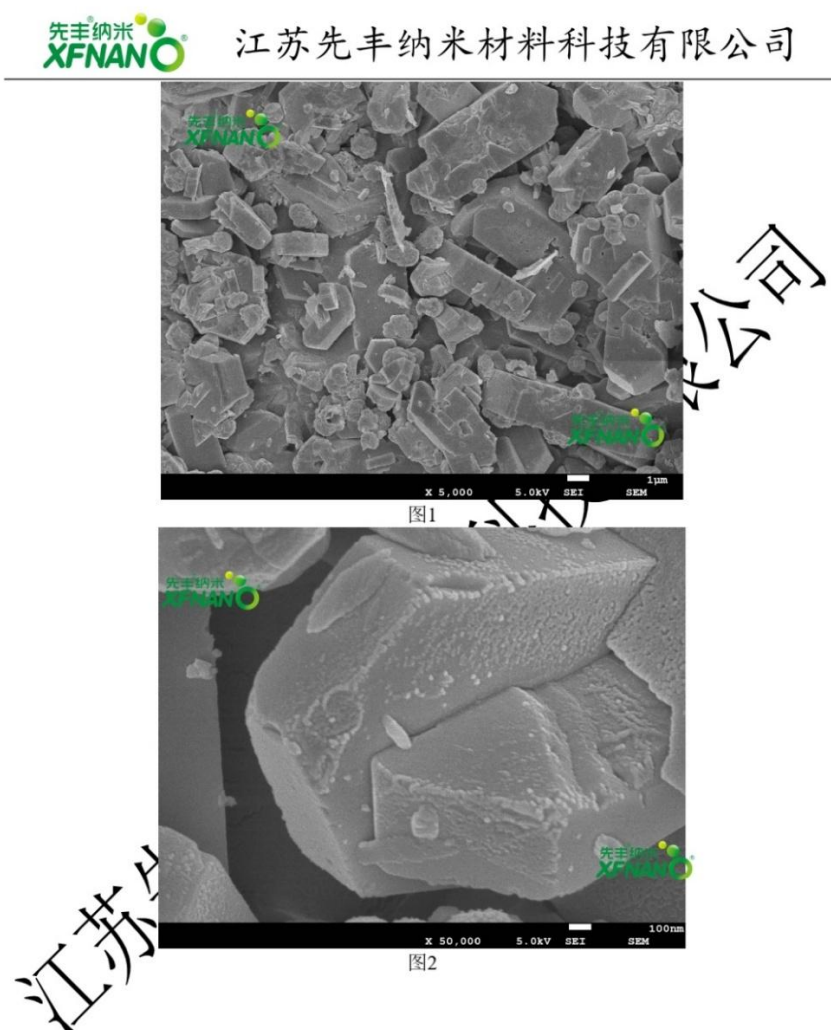
Figura 55. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (1)

 江苏先丰纳米材料科技有限公司		
XFF04- ZSM-5		
1 技术参数 (Properties)		
名称	Product name	ZSM-5
化学组成	Composition	$[\text{Na}^+_{\text{n}} (\text{H}_2\text{O})_{16}] [\text{Al}_n\text{Si}_{96-n} \text{O}_{192}] \text{-MFI}$
粒径	Particle size (μm)	<10 μm
硅铝比	n (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	38, 70, 170, 350-400, 500 可选
比表面积	Specific surface area (m ² /g)	330-400
孔体积	Pore volume (mL/g)	0.15-0.35
孔径	Pore size (nm)	0.53-0.58
堆积密度	g/cm ³	0.68
Na ₂ O 含量	wt%	<0.08
孔道结构	porous structure	MFI 结构, 具有三维孔道, 包括一套十元环直孔道和一套与之相互垂直的正弦十元环孔道, 孔口呈椭圆形 MFI structure with three-dimensional channels, including a set of ten-ring straight channel and a set of mutually perpendicular sine ten-ring channel, and the orifice is oval
2 表征测试图 (Characterizations)		
江苏先丰纳米材料科技有限公司 地址: 南京市国家级江北新区步月路 29 号 9 栋 邮编: 210033 电话 Tel: 400-025-3200(免长途费) 传真 Fax: 025-68256991 Jiangsu XFNANO Materials Tech Co., Ltd Add: Nanjing City, Jiangsu Province, China Zip: for 210033 E-mail: sale@xfnano.com http://www.xfnano.com		

Fuente: (XFNANO, 2024)

En la Figura 55 se observa el certificado de propiedades del catalizador zeolitas ZSM-5 de la marca ZFNANO empleado en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

Figura 56. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (2)



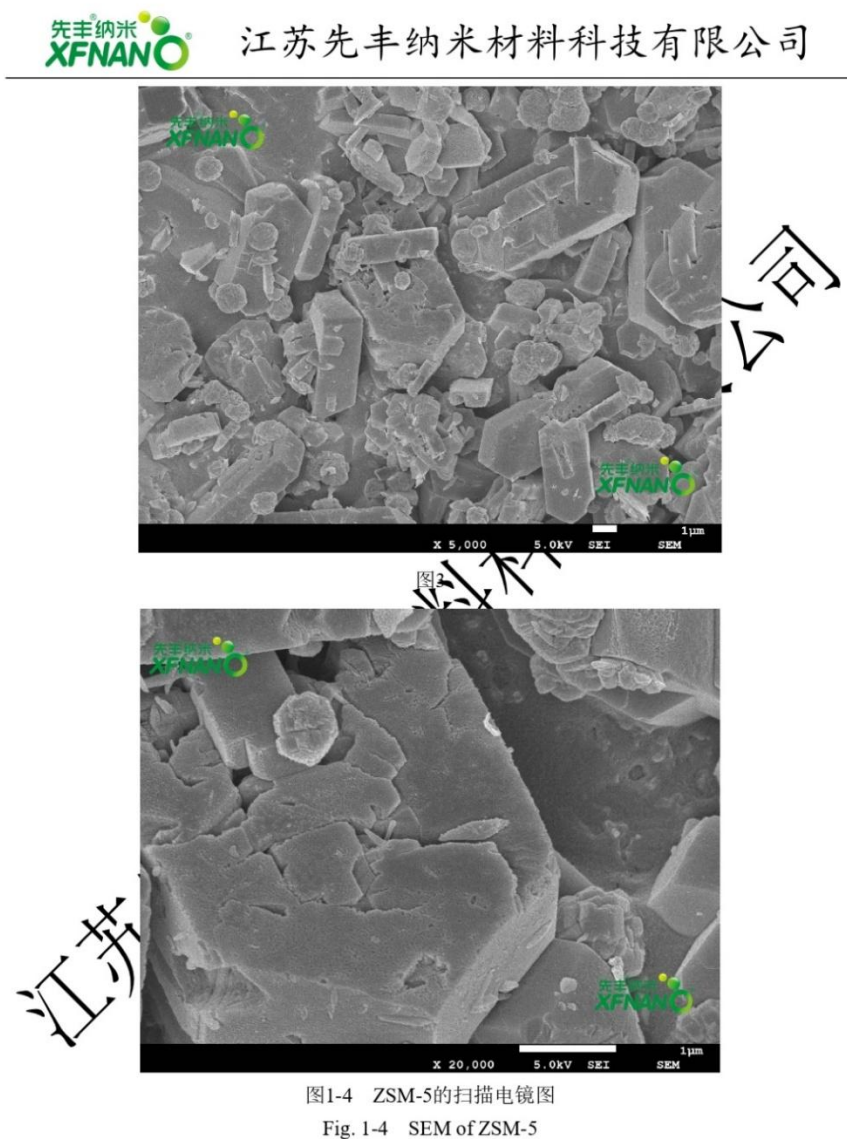
江苏先丰纳米材料科技有限公司
地址：南京市国家级江北新区步月路 29 号 9 栋
邮编：210033
电话 Tel: 400-025-3200(免长途费)
传真 Fax: 025-68256991

Jiangsu XFNANO Materials Tech Co., Ltd
Add: Nanjing City, Jiangsu Province, China
Zip: for 210033
E-mail: sale@xfnano.com
<http://www.xfnano.com>

Fuente: (XFNANO, 2024)

En la Figura 56 se observa el certificado de propiedades del catalizador zeolitas ZSM-5 de la marca ZFNANO empleado en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

Figura 57. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (3)



江苏先丰纳米材料科技有限公司
地址：南京市国家级江北新区步月路 29 号 9 栋
邮编：210033
电话 Tel: 400-025-3200(免长途费)
传真 Fax: 025-68256991

Jiangsu XFNANO Materials Tech Co., Ltd
Add: Nanjing City, Jiangsu Province, China
Zip: for 210033
E-mail: sale@xfnano.com
<http://www.xfnano.com>

Fuente: (XFNANO, 2024)

En la Figura 57 se observa el certificado de propiedades del catalizador zeolitas ZSM-5 de la marca ZFNANO empleado en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

Figura 58. Certificado de análisis de zeolitas ZSM-5 (4)



江苏先丰纳米材料科技有限公司

3 应用领域 (Application Fields)

由于独特的孔道和酸性特征，ZSM-5 分子筛已被广泛应用于石油化工、煤化工和精细化工等领域，如催化裂化、柴油降凝、催化脱蜡、择形催化、直馏汽油提高辛烷值的芳构化，甲苯歧化、二甲苯异构化、甲醇转化制汽油、甲醇脱水制二甲醚及低碳烃芳构化、C3-C4 馏分叠合制汽油等方面。

Due to its unique pore structure and acidity characteristics, ZSM-5 zeolite has been widely used in petrochemical, coal chemical industry and fine chemical industry, such as catalytic cracking, diesel pouring, catalytic dewaxing, shape-selective catalysis and straight-run gasoline to increase octane Value aromatization, toluene disproportionation, xylene isomerization, methanol conversion to gasoline, dehydration of methanol to dimethyl ether and low-carbon hydrocarbon aromatization, C3-C4 fraction laminated gasoline, etc.

4 使用须知 (Notice for use)

本品无毒害，使用不当可能引起呼吸道、眼部轻微刺激，直接接触会引起皮肤干燥。建议使用时佩戴口罩和手套。

This product is non-toxic, but improper use may cause respiratory tract, eye irritation and direct contact can cause dry skin. Wear masks and gloves when using it.

5 储存 (Storage)

常温干燥避光保存，最长保质期 12 个月。

Sealed, avoid light, and keep at normal temperature. Expiry date: 12 months .

声明：我司保证技术报告中的信息的准确性，但不保证材料的普适性，也不负责由此导致的任何损失。提供的参数为统计数据，允许少量浮动。且我司提供的技术报告都是面向所有客户，报告中的表征图片请勿擅自截图使用。

Disclaimer: XFNANO LLC believes that the information in this Technical Data Sheet is accurate and represents the best and most current information available to us. XFNANO Material makes no representations or warranties either express or implied, regarding the suitability of the material for any purpose or the accuracy of the information contained within this document. Accordingly, XFNANO Material will not be responsible for damages resulting from use of or reliance upon this information. Please do not use screenshots of any characteristic graphs in this report without permission.

2021/08/18 Ed.5

江苏先丰纳米材料科技有限公司
地址：南京市国家级江北新区步月路 29 号 9 栋
邮编：210033
电话 **Tel:** 400-025-3200(免长途费)
传真 **Fax:** 025-68256991

Jiangsu XFNANO Materials Tech Co., Ltd
Addr: Nanjing City, Jiangsu Province, China
Zip: for 210033
E-mail: sale@xfnano.com
<http://www.xfnano.com>

Fuente: (XFNANO, 2024)

En la Figura 58 se observa el certificado de propiedades del catalizador zeolitas ZSM-5 de la marca ZFNANO empleado en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

Figura 59. Muestras de botes de HDPE a emplear para la experimentación



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

En la Figura 59 se observan los botes de HDPE blanco (antes de cortarse) a emplearse como muestra para los procesos de pirólisis.

Figura 60. Muestra de HDPE cortado a emplear para la experimentación



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 60 se observa una muestra de 50 g de HDPE blanco (después de cortarse) a emplearse como muestra para los procesos de pirólisis. Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

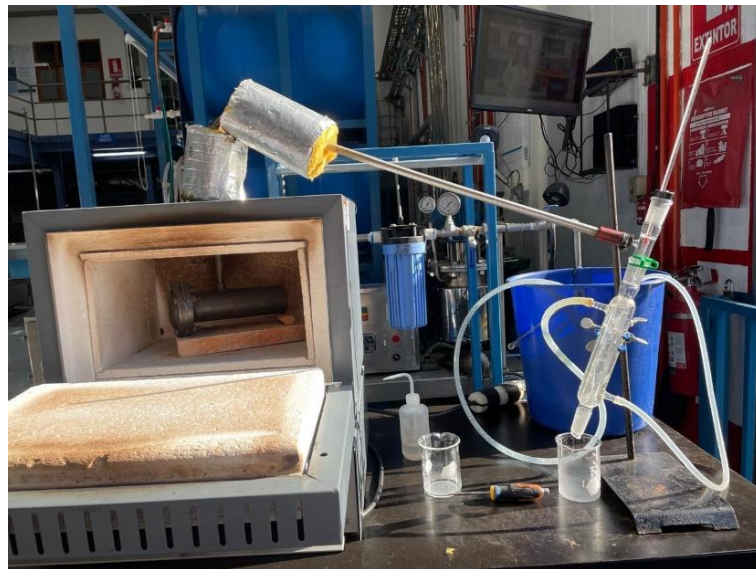
Figura 61. Muestra de char obtenido de pirólisis



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 61 se observa el char (producto sólido) obtenido de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE). Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 62. Sistema de pirólisis



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 62 se observa el sistema de pirólisis armado con el reactor dentro de una mufla, sistema de chimenea acoplado a un condensador. Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 63. Producto líquido obtenido de pirólisis de HDPE



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 63 se observa el producto líquido recolectado de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE). Esto se llevó a cabo en Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 64. Producto líquido obtenido de pirólisis de HDPE con ZnO al 10 % m/m



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 64 se observa el producto líquido recolectado de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con ZnO al 10 % (m/m). Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 65. Producto líquido obtenido de pirólisis de HDPE con zeolitas ZSM- 5 al 10 % m/m



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 65 se observan el producto líquido recolectado de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con ZnO al 10 % (m/m). Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 66. Determinación de densidad de producto líquido de pirólisis



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 66 se observa la determinación del peso de una muestra de producto líquido de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE), para la determinación de la densidad, llevada a cabo en el laboratorio de investigación del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 67. Determinación del poder calorífico en calorímetro IKA C200



Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 67 se observa la determinación del poder calorífico de una muestra de producto líquido obtenido de pirólisis de HDPE, empleando un calorímetro marca IKA C200 (ver ficha técnica en Cuadro 43), en el laboratorio de investigación del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 42. Datos de placa de mufla

Parámetro	Valor
Marca	Thermo Scientific
Modelo	Thermolyne F6010
Temperatura máxima (°C)	1200
Capacidad cámara (volumen) (L)	14
Dimensiones internas (cm)	25 × 33 × 18
Dimensiones externas (cm)	51 × 48.5 × 53.3
Consumo de potencia (W)	2920
Uniformidad de temperatura (°C)	± 2.2
Peso (kg)	60.8
Voltaje de entrada (V)	240
Frecuencia (Hz)	50/60
Tipo de enchufe	US: NEMA 6-15

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 42 se observan los datos de placa de la mufla empleada como fuente de calor para el sistema de pirólisis.

Cuadro 43. Datos de placa de calorímetro IKA C200

Parámetro	Valor
Marca	IKA
Modelo	C200
Tensión de alimentación	100–240 V (AC), 50/60 Hz
Potencia de entrada (W)	300
Temperatura de operación (°C)	10–35
Rango de medición (°C)	14–40
Resolución de temperatura (K)	0.0001
Rango de calor medible (J/g)	0–40,000
Precisión (J/g)	±1
Dimensiones (mm)	400 × 400 × 400
Peso (kg)	21 kg

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 43 se observan los datos de placa del calorímetro marca IKA modelo C200 empleado para determinar el poder calorífico de las muestras.

Cuadro 44. Datos de placa de balanza

Parámetro	Valor
Marca	OHAUS
Modelo	V31XH2
Temperatura de operación (°C)	0–40
Rango de medición (g)	0.1–2000
Voltaje (V)	9
Incertidumbre (g)	±0.1

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 44 se observan los datos de placa de la balanza empleada para determinar el peso de los productos de pirólisis.

Cuadro 45. Datos de placa de balanza analítica

Parámetro	Valor
Marca	OHAUS
Modelo	PX623/E
Temperatura de operación (°C)	10–30
Rango de medición (g)	0.001–620
Voltaje (V)	12
Incertidumbre (g)	±0.001

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En el Cuadro 45 se observan los datos de placa de la balanza analítica empleada para determinar el peso de los productos de pirólisis para el cálculo de densidad.

H. Glosario

- **Alcanos:** Hidrocarburos saturados compuestos únicamente por enlaces simples carbono-carbono y carbono-hidrógeno.
- **Alquenos:** Hidrocarburos insaturados que contienen al menos un doble enlace carbono-carbono en su estructura.
- **Alquilación:** Reacción química en la que un grupo alquilo (una cadena hidrocarbonada) se transfiere de una molécula a otra, generalmente a un hidrocarburo. En catálisis y petroquímica, la alquilación se utiliza para producir compuestos más ramificados y con mayor octanaje en combustibles, o para modificar cadenas de hidrocarburos en procesos de craqueo y reformado.
- **Aromáticos:** Hidrocarburos que contienen uno o más anillos bencénicos en su estructura molecular.
- **Carbonización:** Transformación de material orgánico en carbono o compuestos carbonosos por acción del calor en ausencia de oxígeno.
- **Char:** Residuo sólido rico en carbono obtenido tras la degradación térmica de materia orgánica.
- **Conversión:** Fracción o porcentaje de reactivo inicial que se transforma en productos durante una reacción química.
- **Craqueo térmico:** Proceso de descomposición de cadenas largas de hidrocarburos en fracciones más pequeñas mediante la aplicación de altas temperaturas sin catalizador.
- **Energía libre de Gibbs:** Magnitud termodinámica que indica la capacidad de un sistema para realizar trabajo útil a temperatura y presión constantes.
- **Entropía:** Medida del grado de desorden o aleatoriedad en un sistema termodinámico.
- **HDPE:** Polietileno de alta densidad, polímero termoplástico derivado del etileno, caracterizado por su alta densidad y resistencia mecánica. Se utiliza ampliamente en envases, tuberías y películas plásticas debido a su durabilidad y resistencia química.
- **Olefinación:** Reacción química mediante la cual se generan olefinas (alquenos) a partir de compuestos saturados u otros precursores, generalmente promovida por catalizadores, en la que se forman dobles enlaces carbono-carbono.
- **Pellets:** Pequeñas partículas compactas de material sólido, generalmente cilíndricas o esféricas.
- **Polímeros:** Macromoléculas formadas por la unión repetida de unidades más pequeñas llamadas monómeros. Los polímeros pueden ser naturales (como el almidón o el caucho) o sintéticos (como el polietileno o el polipropileno) y se utilizan en una gran variedad de aplicaciones industriales, comerciales y científicas debido a sus propiedades físicas y químicas versátiles.
- **Rendimiento:** Relación entre la cantidad de producto obtenido en una reacción o proceso y la cantidad teórica máxima que podría obtenerse, expresada generalmente

en porcentaje. Representa la eficiencia con la que una materia prima se transforma en el producto deseado, considerando pérdidas, subproductos o limitaciones operativas.

- **Selectividad:** Proporción de un producto deseado formado respecto a todos los productos generados en una reacción química.
- **TGA:** Sigla de Análisis Termogravimétrico, es una técnica de caracterización térmica en la que se mide la variación de la masa de una muestra en función de la temperatura o del tiempo, bajo una atmósfera controlada (inerte u oxidante). Se utiliza para estudiar procesos como descomposición térmica, estabilidad térmica, contenido de humedad, cinética de reacción y porcentaje de cenizas en materiales.
- **ZnO:** Óxido de zinc, compuesto inorgánico utilizado como catalizador o aditivo en procesos químicos.
- **ZSM:** Un tipo de zeolita sintética desarrollada por la compañía Mobil Oil. Estas zeolitas poseen una estructura microporosa y alta acidez, lo que las hace catalizadores muy eficientes en procesos petroquímicos, como el craqueo catalítico e isomerización.
- **ZSM-5:** Tipo de zeolita microporosa de aluminosilicato con estructura pentasil. Es un catalizador sólido muy usado en craqueo y alquilación, debido a su alta selectividad y capacidad de inducir reacciones de deshidrogenación y aromatización.
- **β -scission:** Ruptura de un enlace en la posición beta de un radical libre, que genera moléculas más pequeñas durante la degradación de polímeros o hidrocarburos.