

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Comparación energética del combustible líquido obtenidos a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a diferentes rampas de temperaturas

Trabajo de graduación presentado por

Stefan Zachrisson Montenegro

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Comparación energética del combustible líquido obtenidos a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a diferentes rampas de temperaturas

Trabajo de graduación presentado por

Stefan Zachrisson Montenegro

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2024

Vo. Bo.

(f) 

Ing. Luis Núñez

Terna examinadora

(f) 

Ing. Luis Núñez

(f) 

Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 

Ing. Carmen Ortiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de enero de 2024

PREFACIO

Este trabajo de graduación surgió por el interés de encontrar una alternativa a la generación de residuos de origen plástico, enfocándose en el polietileno de alta densidad. Quiero agradecer a Dios por permitirme en primer lugar estudiar en una universidad que me ha permitido desarrollarme como persona y profesional, además de permitirme desarrollar un trabajo de este tipo.

Quiero agradecer a mi familia, que me ha apoyado en todo momento, formándome como persona y permitiéndome desarrollar las competencias ingenieriles en una universidad de tanto prestigio. A mis hermanos, que me han acompañado cada día por motivarme a seguir mejorando y aprendiendo. Quiero agradecer a mi novia que me ha estado apoyando, motivando y acompañando durante este proceso universitario. Agradezco también a todos mis amigos y compañeros por siempre estar dispuestos a darme una mano, acompañarme y convivir conmigo a lo largo de la carrera, viviendo momentos increíbles.

Quiero agradecer al Centro de Investigación y Desarrollo de la empresa Cementos Progreso (CETEC), por apoyarme con los análisis termogravimétricos de este trabajo de graduación. Además, quiero agradecer a Inyectores S.A. por proveerme del polietileno de alta densidad reciclado en forma de pellets que me dieron para llevar a cabo dicho trabajo.

Quiero agradecer a la Universidad del Valle de Guatemala, la cual me ha permitido desarrollarme personal y profesionalmente en diversas áreas, permitiéndome desarrollar competencias que me permitirán triunfar en mi vida. Agradezco personalmente a mi asesor, el Ing. Luis Nuñez por su apoyo, consejo, lección y motivación en el desarrollo de este trabajo. Agradezco también a mi director de carrera, el Ing. Gamaliel Zambrano, por todo su apoyo, enseñanzas, motivación y consejos, que me van a permitir desarrollarme como profesional, además de siempre tomarme en consideración para el desarrollo de proyectos en la facultad. Agradezco también a la Lic. Ana Luisa Mendizabal, por todo su apoyo durante los análisis de laboratorio necesarios y su consejo a lo largo del desarrollo de este trabajo de graduación.

Finalmente quiero agradecer a mi abuelo, el Ing. Fernando Montenegro, que a pesar de ya no estar con nosotros, fue la primera inspiración para estudiar y soñar con ser un ingeniero químico.z

ÍNDICE

PREFACIO.....	i
LISTADO DE CUADRO.....	vi
LISTADO DE FIGURAS.....	x
LISTADO DE ECUACIONES	xiii
RESUMEN.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	3
III. OBJETIVOS.....	5
IV. MARCO TEÓRICO	6
A. POLÍMEROS.....	6
1. POLIETILENO	6
2. POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)	7
3. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE).....	7
B. PODER CALORÍFICO	8
1. PODER CALORÍFICO SUPERIOR.....	8
2. PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	8
3. BOMBA CALORIMÉTRICA.....	8
C. SISTEMA	8
1. SISTEMA ABIERTO.....	9
2. SISTEMA CERRADO.....	9
D. BALANCE DE MASA.....	10
E. BALANCE DE ENERGÍA.....	10
F. MODELO Y CINÉTICA DE REACCIÓN	11
G. REACTOR.....	11
H. VELOCIDAD DE REACCIÓN	12
I. PIRÓLISIS.....	12
1. TERMÓLISIS.....	13
2. CHAR.....	13

3.	ACEITE DE PIRÓLISIS	14
4.	GASES NO CONDENSABLES	14
J.	CROMATOGRAFÍA DE GASES CON DETECTOR FID Y TCD	15
1.	PARTES DE UN CROMATÓGRAFO DE GASES	15
2.	DETECTORES	15
3.	CROMATOGRAMA	16
V.	ANTECEDENTES	17
A.	SITUACIÓN ACTUAL	17
K.	PROCESO DE PIRÓLISIS Y SUS AVANCES	17
1.	Pirólisis de polietileno de alta densidad: Revisión y progreso	17
2.	Efectos de la velocidad de calefacción en atmósferas diferentes	18
L.	PROCESO DE PIRÓLISIS EN LA UVG	20
VI.	METODOLOGÍA	21
VII.	RESULTADOS	29
A.	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	29
B.	COMPARATIVO DE RAMPAS DE TEMPERATURA Y COMBUSTIBLE LÍQUIDO RECUPERADO	29
C.	RENDIMIENTOS, CARACTERIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE PROUDCTOS	30
D.	CINÉTICA PARA CADA RAMPA DE TEMPERATURA	33
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
IX.	CONCLUSIONES	50
X.	RECOMENDACIONES	51
XI.	BIBLIOGRAFÍA	52
XII.	ANEXOS	54
A.	CÁLCULO DE MUESTRA	54
B.	DATOS ORIGINALES	56
C.	ECUACIONES	76
D.	IMAGENÉS DE EXPERIMENTACIÓN	82
E.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA	85
F.	CUADROS DE DATOS CALCULADOS	88

G. ANÁLISIS DE ERROR.....	138
---------------------------	-----

LISTADO DE CUADRO

Cuadro 1. Rendimiento promedio del combustible líquido según el gradiente de temperatura utilizado.	30
Cuadro 2. Poder calorífico promedio obtenido del combustible líquido y gas recolectado en cada gradiente de temperatura a partir del Calorímetro IKA C200 comparado con el poder calorífico de la gasolina.	31
Cuadro 3. Densidad del combustible líquido recolectado en cada gradiente de temperatura comparando con el de una gasolina comercial.	31
Cuadro 4. Compuestos presentes promedio en el líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).	31
Cuadro 5. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad 5°C cada media 30 minutos.	34
Cuadro 6. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 8°C cada media 30 minutos.	36
Cuadro 7. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 10°C cada media 30 minutos.	38
Cuadro 8. Rendimiento y obtención de masas a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad en cada rampa de temperatura.	56
Cuadro 9. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.	56
Cuadro 10. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.	59
Cuadro 11. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.	61
Cuadro 12. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.	64
Cuadro 13. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.	65
Cuadro 14. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.	67
Cuadro 15. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.	68

Cuadro 16. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos. ...	71
Cuadro 17. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos. ...	73
Cuadro 18. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad 5°C cada media 30 minutos.	78
Cuadro 19. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 8°C cada media 30 minutos.....	80
Cuadro 20. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 10°C cada media 30 minutos.....	81
Cuadro 21. Balance de masa del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.	85
Cuadro 22. Balance de masa del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.	86
Cuadro 23. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.....	87
Cuadro 24. Análisis estadístico del rendimiento de producto de pirólisis en el reactor de 50 g a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos.....	91
Cuadro 25. Análisis estadístico del rendimiento de producto de pirólisis en el reactor de 50 g a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos.....	91
Cuadro 26. Análisis estadístico del rendimiento de producto de pirólisis en el reactor de 50 g a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos.....	91
Cuadro 27. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.....	92
Cuadro 28. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.....	95
Cuadro 29. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.....	98
Cuadro 30. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.....	101
Cuadro 31. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.....	104

Cuadro 32. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.....	106
Cuadro 33. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.....	109
Cuadro 34. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.....	111
Cuadro 35. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.....	113
Cuadro 36. Poder calorífico obtenido del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 5 °C cada 30 minutos a partir del Calorímetro IKA C200.....	115
Cuadro 37. Poder calorífico obtenido del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 8 °C cada 30 minutos a partir del Calorímetro IKA C200.....	116
Cuadro 38. Poder calorífico obtenido del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 10 °C cada 30 minutos a partir del Calorímetro IKA C200.....	116
Cuadro 39. Poder calorífico obtenido del compuesto ceroso a partir del Calorímetro IKA C200.....	116
Cuadro 40. Análisis estadístico del poder calorífico del combustible líquido recolectado a los diferentes gradientes de temperatura a partir del Calorímetro IKA C200.	116
Cuadro 41. Densidad del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.....	117
Cuadro 42. Densidad del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.....	117
Cuadro 43. Densidad del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.....	117
Cuadro 44. Análisis estadístico de nla densidad del combustible líquido recolectado a los diferentes gradientes de temperatura.	118
Cuadro 45. .Compuestos presentes en el gas producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).	118
Cuadro 46. Compuestos presentes en el combustible líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 5°C cada media 30 minutos.	120

Cuadro 47. Compuestos presentes en el combustible líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 8°C cada media 30 minutos.	122
Cuadro 48. Compuestos más importantes presentes en el combustible líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 10°C cada media 30 minutos.	125
Cuadro 49. Análisis de varianza del efeto que tiene la temperatura con el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad.	128

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Estructura polietileno	6
Figura 2. Código de identificación del LPDE	7
Figura 3. Código de identificación HDPE.....	7
Figura 4. Abierto.....	9
Figura 5. Cerrado.....	10
Figura 6. Balances de masa	10
Figura 7. Esquema general de un cromatógrafo de gases.....	15
Figura 8. Esquema de detector FID y TCD	16
Figura 9 . TGs experimentales de HDPE. Efecto de la atmósfera de nitrógeno a cada una de las tres velocidades de calefacción: 5°C/min, 10°C/min y 20°C/min	18
Figura 10. TGs experimentales de HDPE. Efecto de la atmósfera de nitrógeno a cada una de las tres velocidades de calefacción: 5°C/min, 10°C/min y 20°C/min.....	19
Figura 11. TGs experimentales de HDPE. Efecto de la atmósfera de nitrógeno a cada una de las tres velocidades de calefacción: 5°C/min, 10°C/min y 20°C/min.....	19
Figura 12. Modelo del reactor empleado en pruebas elaborado en Autodesk Inventor 2016.	20
Figura 13. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) realizado con el apoyo de Cementos Progreso.	29
Figura 14. Pirólisis lenta de promedio de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) a las rampas de temperatura planteadas	29
Figura 15. Predicción de la masa de HDPE en función de la temperatura del reactor de 50g durante el proceso de pirólisis a un gradiente de 5°C cada media 30 minutos.....	35
Figura 16. Predicción de la masa de HDPE en función de la temperatura del reactor de 50g durante el proceso de pirólisis a un gradiente de 8°C cada media 30 minutos.....	37
Figura 17. Predicción de la masa de HDPE en función de la temperatura del reactor de 50g durante el proceso de pirólisis a un gradiente de 8°C cada media 30 minutos.....	39
Figura 18. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.....	40
Figura 19. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.....	40

Figura 20. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.....	41
Figura 21. Imagen del sistema utilizado para llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad.	82
Figura 22. Imagen del compuesto ceroso obtenido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad a un ritmo de 15°C cada media 30 minutos.....	82
Figura 23. Imagen del sistema recibiendo combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de 5°C cada media 30 minutos.	83
Figura 24. Imagen de los combustibles líquidos obtenidos a diferentes rampas de temperatura.	83
Figura 25. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.....	85
Figura 26. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.....	86
Figura 27. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.....	87
Figura 28. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) muestra 1, realizado con el apoyo de Cementos Progreso.	88
Figura 29. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) muestra 2, realizado con el apoyo de Cementos Progreso.	89
Figura 30. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) muestra 3, realizado con el apoyo de Cementos Progreso.	90
Figura 31. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.	94
Figura 32. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.	98
Figura 33. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.	101
Figura 34. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.	103
Figura 35. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.	106

Figura 36. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.	108
Figura 37. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.	110
Figura 38. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.	113
Figura 39. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.	115
Figura 40. Cromatograma del gas producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).	119
Figura 41. Cromatograma del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos.	121
Figura 42. Cromatograma del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 8°C cada media 30 minutos.	124
Figura 43. Cromatograma del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 10°C cada media 30 minutos.	127
Figura 44. Gráfico Normal Q-Q de los datos utilizados para el ANOVA del.....	128
Figura 45. Código de la cinética promedio del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con el gradiente de temperatura de 5 °C cada 30 minutos para utilizarlo en el software Berkeley-Madonna.	128
Figura 46. Código de la cinética promedio del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con el gradiente de temperatura de 8 °C cada 30 minutos para utilizarlo en el software Berkeley-Madonna.	132
Figura 47. Código de la cinética promedio del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con el gradiente de temperatura de 10 °C cada 30 minutos para utilizarlo en el software Berkeley-Madonna.	134

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de la masa de combustible a partir de la probeta y la probeta con combustible.....	25
Ecuación 2. Cálculo de la densidad a partir de la masa y el volumen de combustible. .	25
Ecuación 3. Ecuación de Boltzmann de temperatura en función del tiempo para hornos mufla.....	26
Ecuación 4. Ecuación de constante de descomposición de Arrhenius y de velocidad de reacción de pirólisis.....	26
Ecuación 5. Modelo cinético de descomposición energética de polietileno de alta densidad (HDPE).....	33
Ecuación 6. Modelo de temperatura para el el gradiente de 5°C cada 30 minutos	33
Ecuación 7. Modelo de temperatura para el el gradiente de 8°C cada 30 minutos	35
Ecuación 8. Modelo de temperatura para el el gradiente de 10°C cada 30 minutos	37
Ecuación 9. Tamaño de Muestra	76
Ecuación 10. Recuperado de masa combustible líquido.	76
Ecuación 11. Balance de masa del proceso de pirólisis	76
Ecuación 12. Rendimiento de los productos de pirólisis.....	77
Ecuación 13. Conversión de los productos de pirólisis	77
Ecuación 14. Ecuación de Boltzmann de temperatura en función del tiempo para hornos mufla.....	77
Ecuación 15. Ecuación de constante de descomposición de Arrhenius y de velocidad de reacción de pirólisis.....	77
Ecuación 16. Modelo de temperatura para el el gradiente de 5°C cada 30 minutos	78
Ecuación 17. Modelo de temperatura para el el gradiente de 8°C cada 30 minutos	79
Ecuación 18. Modelo de temperatura para el el gradiente de 10°C cada 30 minutos	80
Ecuación 19. Determinación de la media.	138
Ecuación 20. Determinación de la desviación estándar.	138
Ecuación 21. Determinación del intervalo de confianza al 95%.....	139
Ecuación 22. Determinación del coeficiente de variación.	140
Ecuación 23. Incertidumbre de multiplicación/división.....	140

RESUMEN

El trabajo de graduación presenta el análisis y los resultados obtenidos del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad, con la finalidad de evaluar el rendimiento del combustible en fase líquida a diferentes rampas de temperatura y comparar energéticamente el combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a diferentes rampas de temperatura.

Se realizó un análisis termogravimétrico del polietileno estudiado donde se determinó que la degradación comienza a los 386°C y termina aproximadamente a los 510°C. Utilizando un reactor pirólisis de 50g, se utilizaron 3 rampas de temperatura donde la rampa de 8°C cada 30 minutos tuvo el mayor rendimiento de combustible líquido. Desarrollando y parametrizando un modelo cinético se determinó que el tiempo de contacto y las rampas de temperatura son las principales variables que afectan en el rendimiento de los productos del proceso. Haciendo un balance energético, se requirió un total de 42,048.00 kJ para llevar a cabo cada reacción de pirólisis de HDPE, y se obtuvo un total de productos que equivalen a un potencial 2,264.70 kJ al quemarse. Se demostró que el producto líquido obtenido ($44,685.67 \pm 2.95$ J/g) a partir del proceso, tiene potencial de ser combustible apto para la combustión, con un alto poder calorífico comparable con el de la gasolina comercial (rango de 44,000 - 46,000 J/g).

I. INTRODUCCIÓN

El uso de fuentes de energía renovable se ha convertido en una necesidad cada vez más importante a medida que la población crece y la tecnología se moderniza. La producción de energía a nivel mundial el combustible fósil representa el 76.71% del total producido (Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023).

A medida que la población y la industrialización de la sociedad moderna crecen, también lo hace la demanda de fuentes de energía. Sin embargo, como fue mencionado anteriormente, actualmente gran parte de la energía requerida se obtiene de combustibles fósiles, los cuales tienen impactos negativos en la extracción, transporte, uso y son sujetos a volatilidad (Nunez, 2022). Por esta razón, se están evaluando fuentes alternativas de energía para poder satisfacer la demanda futura y prevenir una posible crisis en el suministro, así como para adaptarse a la tendencia de migrar hacia fuentes de energía renovables.

El HDPE o polietileno de alta densidad, es un polímero ampliamente utilizado en la industria debido a su resistencia química y mecánica, lo que lo hace ideal para aplicaciones en envases, tuberías y materiales de construcción. Sin embargo, su uso y eliminación inadecuados pueden tener graves consecuencias ambientales debido a su larga vida útil y su lenta degradación. Por lo tanto, la pirólisis de HDPE se ha propuesto como una posible solución para su gestión y reciclaje. En esta técnica, el HDPE se somete a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo que lo descompone en una mezcla de productos líquidos, sólidos y gaseosos, que pueden ser utilizados como combustibles o materias primas para la producción de otros productos químicos. A diferencia de la combustión convencional, la pirólisis no requiere oxígeno y no necesita que los productos tengan un alto poder calorífico. La pirólisis de HDPE tiene el potencial de ser una opción sostenible y rentable para su gestión y recuperación de recursos

Para saber si un proceso es energéticamente viable, se debe hacer un análisis energético. El análisis energético toma en cuenta las entradas y salidas de energía en el sistema a estudiar, es decir, requiere de un balance de energía para determinar si la energía producida es mayor a la energía usada. Es importante definir el consumo energético ya

que permite definir la viabilidad energética del proceso. El poder calorífico es la energía por unidad de masa que puede generar un combustible a partir de su combustión. Expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y un comburente, que debe ser la energía que mantenía unida a los átomos en la molécula del compuesto, menos la energía de la formación de nuevas materias por la formación de gases durante la combustión (Hougen, Watson, & Ragatz, 1967). Esta energía es la que se utiliza para determinar la energía producida (obtenida) a partir de la pirólisis de HDPE.

El proceso de termo-conversión de los polímeros por pirólisis es complejo y requiere de un modelo matemático muy robusto. Este debe tomar en cuenta factores muy importantes, como la reacción de pirólisis directamente con el reactivo, las reacciones del sólido residual en fase heterogénea y las reacciones en fase gaseosa de los compuestos volátiles (Miller & Bellan, 1997). El uso de una cinética que permita describir el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad da la posibilidad de determinar cómo se está llevando a cabo la reacción con el tiempo y demostrar el efecto que tienen las diferentes rampas de temperatura. Además, la cinética permite determinar el impacto que tienen las variables del proceso en el rendimiento de los productos obtenidos.

II. JUSTIFICACIÓN

El polietileno de alta densidad representa uno de los mayores contaminantes en los últimos 10 años. Su bajo costo de producción y amplia gama de usos hace que sea el polímero con mayor volumen de producción en el mundo, ya que se utiliza para producir objetos cotidianos como botellas, envases, cascos, juguetes, tuberías entre otros de alto uso en la industria. Sin embargo, la gran popularidad y facilidad de producción de este plástico ha causado un impacto ambiental crítico pues el tiempo para su degradación supera los 150 años (Welle, 2005). Por esto es necesario proponer un proyecto que aproveche los residuos generados por su uso, de manera que contribuya al mejoramiento del ambiente. A nivel mundial se producen 390.7 millones de toneladas de plásticos, de los cuales el HDPE representa al 46% de los plásticos producidos mundialmente. A esto se debe agregar que solo el 9% de los plásticos a nivel mundial se logra reciclar con éxito, derivado de restos de comida, grasas y compuestos mezclados que no permiten su reciclaje (OCDE, 2022).

En Guatemala se consumen un total de 358 mil toneladas anuales de polímeros y tan solo el polietileno de alta densidad representa el primer puesto en consumo con un 17.24% del total. A esto se debe agregar que cuenta con el acuerdo gubernativo 164-2021, que menciona que deben de clasificarse los desechos orgánicos y no orgánicos para su reciclaje, pero, la capacidad instalada para el reciclaje de plásticos es de solo el 7.8% del total producido, de manera que el 92.2% de los plásticos reunidos para su tratamiento van directo a los vertederos (Gonzalez, 2021).

Aquí surge la pirólisis de polietileno de alta densidad como alternativa, donde cualquier contaminación alimenticia, biológica o de áreas de salud, no van a tener un efecto en el proceso, de manera que se puede obtener combustibles útiles a partir incluso de residuos contaminados. A pesar de la importancia de esta alternativa, no se encontraron estudios que evalúen el rendimiento de cada uno de los productos obtenidos a diferentes rampas de temperatura, su efecto energéticamente, ni su potencial como combustible útil en Guatemala. Es por eso que en este trabajo se muestran los parámetros que no se lograron encontrar en los estudios mencionados anteriormene, pretendiendo ser un trabajo de referencia para escalar el proceso, proponer políticas de tratamiento, rampas de

temperatura a utilizar para la obtención de mejores rendimientos o incluso hacer estudios técnicos y económicos para su aplicación.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Comparar energéticamente el combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a diferentes rampas de temperatura.

B. Objetivos específicos

1. Determinar la temperatura de descomposición del polietileno de alta densidad con una prueba termogravimétrica para llevar a cabo un proceso de pirólisis a las temperaturas adecuadas.
2. Llevar a cabo un proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad para recabar datos de temperatura, cantidad de producto y tiempo de operación para la comparación del modelo cinético, energético y de recuperación de combustible líquido útil.
3. Desarrollar un modelo cinético de la pirólisis de polietileno de alta densidad a diferentes rampas de temperaturas empleando el software Berckley-Madonna para comparar la recuperación del combustible líquido a las diferentes rampas de temperaturas empleadas.

IV. MARCO TEÓRICO

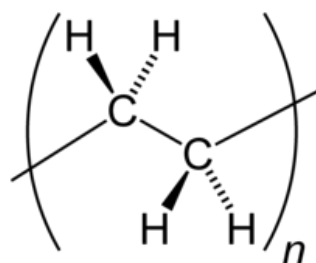
A. POLÍMEROS

Son materiales compuestos por monómeros que mediante reacciones químicas forman enlaces entre sí, formando cadenas largas. Estos materiales se utilizan principalmente como envases y textiles, pero estos se usan como alternativa al vidrio, madera, metal entre otros materiales. Estos compuestos se pueden desarrollar naturalmente como es el caso del almidón o artificialmente como el polietileno (PE), polipropileno (PP) y otros ejemplos. Su producción se popularizó a partir de la segunda guerra mundial, a partir de su uso para textiles (Tonelli & Srinivasarao, 2001).

1. POLIETILIENO

Es un polímero de la familia olefínica, Estos se obtienen mediante la polimerización de olefinas, es decir, alquenos. Este es el químicamente más simple entre todos los polímeros y se representa con la formula $(-CH_2-CH_2-)_n$. El bajo precio de este plástico lo hace uno de los más comunes y simples de fabricar. Es un tipo de polímero con una cadena lineal no ramificada compuesta de etilenos conectados entre sí (Tonelli & Srinivasarao, 2001).

Figura 1. Estructura polietileno



Es químicamente inerte y se produce por reacciones de polimerización. Las aplicaciones de este tipo de polímero son: bolsas, envases, contenedores y tubos hasta juguetes y piezas mecánicas. El polietileno se divide por características en polietileno de

baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés) y polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés).

2. POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)

Este tipo de polímero de la familia de los etilenos (olefínicos) se caracteriza por tener una densidad molecular baja, este plástico está formado por estructuras muy ramificadas, lo cual le confiere una menor densidad. Este tipo de productos se caracterizan por su flexibilidad, además de su resistencia a altas temperaturas y ser un compuesto inerte. Este material es reciclable y se le asigna el código de identificación de plástico No. 4 (Tonelli & Srinivasarao, 2001).

Figura 2. Código de identificación del LPDE



3. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

Este polímero también de la familia de etilenos (olefínicos) se caracteriza por tener una densidad molecular baja, debido a que está conformado por cadenas de etilenos sin ramificación, lo que le confiere una mayor densidad. Los productos derivados de estos polímeros, se caracterizan por su rigidez y su resistencia térmica y química. Su resistencia a la temperatura es menor que la del LDPE. Se caracteriza por ser un material ligero y fácil de transportar. Este material es reciclable y se le asigna el código de identificación de plástico No. 2 (Tonelli & Srinivasarao, 2001).

Figura 3. Código de identificación HDPE



B. PODER CALORÍFICO

Es la energía por unidad de masa que puede generar un combustible a partir de su combustión. Expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y un comburente, que debe ser la energía que mantenía unida a los átomos en la molécula del compuesto, menos la energía de la formación de nuevas materias por la formación de gases durante la combustión. El poder calorífico se mide siempre por unidad de masa oxidada, esto se hace a partir de bombas calorimétricas (Hougen, Watson, & Ragatz, 1967).

1. PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Se da cuando la reacción se produce en un sistema aislado, donde el vapor de agua se condensa y se contabiliza la energía térmica que tiene presente. Este es el mayor de los poderes caloríficos (Hougen, Watson, & Ragatz, 1967).

2. PODER CALORÍFICO INFERIOR

Se da cuando la reacción se produce en un sistema abierto, donde el vapor de agua no se toma en cuenta, y no se considera el poder calorífico presente en el mismo, por ende este es un poder calorífico menor (Hougen, Watson, & Ragatz, 1967).

3. BOMBA CALORIMÉTRICA

Es un instrumento que permite determinar el poder calorífico de combustible sólido y líquido de manera constante. En ocasiones es necesario corregir el valor de poder calorífico mediante la determinación de la denominada energía de extraños, en la que intervienen los medios de ignición, las sustancias auxiliares a la combustión y la formación y disolución de ácidos nítrico y sulfúrico, que pueden ser cuantificados mediante valoración o conociendo el análisis elemental de la muestra (Hougen, Watson, & Ragatz, 1967).

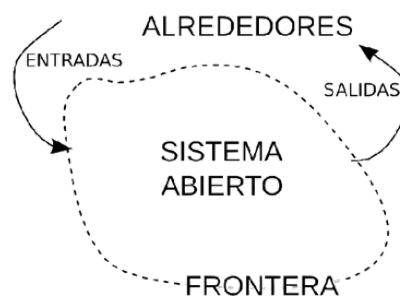
C. SISTEMA

Es el primer concepto que debemos dominar, ya que a partir del sistema podemos realizar el balance de masa. Un sistema es simplemente una zona específica o total de un proceso a estudiar, es decir, es la zona de estudio en nuestro problema o proyecto (Smith, Van Ness, Abbott, & Swihart, 2018).

1. SISTEMA ABIERTO

Sistema es aquel cuyo rasgo fundamental es que permite el libre intercambio de información, materia o energía entre su interior y el entorno, sin presentar barreras ni impedimentos al flujo. El concepto de «sistema abierto» se emplea en distintos ámbitos del saber humano y es particularmente estudiado por la física en los sistemas termodinámicos (Smith, Van Ness, Abbott, & Swihart, 2018).

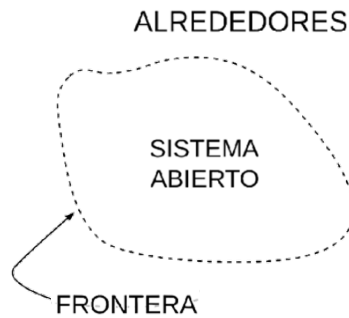
Figura 4. Sistema abierto



2. SISTEMA CERRADO

Un sistema cerrado es un sistema físico que no interactúa con otros agentes físicos situados fuera de él y por lo tanto no está conectado casualmente ni relacionado con nada externo a él. Una propiedad importante de los sistemas cerrados en mecánica clásica es que las ecuaciones de evolución temporal, llamadas ecuaciones del movimiento de dicho sistema solo dependen de variables y factores contenidas en el sistema. Para un sistema de ese tipo por ejemplo la elección del origen de tiempos es arbitraria y por tanto las ecuaciones de evolución temporal son invariantes respecto a las traslaciones temporales. En muchas de las teorías cosmológicas aceptadas actualmente, el Universo es considerado como como un sistema cerrado (Smith, Van Ness, Abbott, & Swihart, 2018).

Figura 5. Sistema cerrado



D. BALANCE DE MASA

Este se basa en la aplicación práctica de la ley de conservación de la materia, la cual indica que toda la masa que entra a un sistema sale o se acumula, según el tipo de sistema que se tenga. En otras palabras, la masa no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Los balances de masa son importantes, ya que permiten describir lo que sucede en procesos, tomando en cuenta las concentraciones, cantidades, temperaturas y características del mismo. Estos suelen describirse utilizando cajas negras, con las cuales se puede asociar las operaciones dentro de procesos (Treybal, 1968).

Figura 6. Representación en balances de masa



E. BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía es una relación de la energía que entra y sale de un sistema, es decir, se trata del estudio de los cambios energéticos de un sistema. La aplicación del balance de energía es importante para comprender procesos y transformaciones físicas en diferentes áreas de la industria. Este tipo de balance hace uso de la entalpía, energía interna, trabajo y entropías para describir el cambio de energía. Un balance de energía es una contabilidad de los aportes y del consumo de energía por parte de un sistema a estudiar. Se trata de conocer los cambios del nivel de energía de un sistema (Smith, Van Ness, Abbott, & Swihart, 2018).

F. MODELO Y CINÉTICA DE REACCIÓN

El proceso de termoconversión de los polímeros por pirólisis es complejo y requiere de un modelo matemático muy robusto. Este debe tomar en cuenta factores muy importantes, como la reacción de pirólisis directamente con el reactivo, las reacciones del sólido residual en fase heterogénea y las reacciones en fase gaseosa de los compuestos volátiles (Diebold, 1994). Además, este modelo debería considerar la participación de múltiples compuestos en diferentes fases, tanto individualmente como en sistemas heterogéneos, y los efectos de los fenómenos de transferencia de materia y calor. Para modelar la reacción de pirólisis de biomasa se han empleado simplificaciones como la independencia en la degradación a lo largo de las múltiples reacciones en mecanismos de primer orden ramificados y la proposición de especies químicas de referencia. A esto se debe agregar que hay planteamientos que permitan simplificar la comprensión de dicha reacción, entre ellos la constante de degradación de Arrhenius. En algunos estudios se han sugerido reacciones endotérmicas y exotérmicas para la producción de compuestos volátiles condensables y biocarbón, respectivamente (Miller & Bellan, 1997).

G. REACTOR

Un reactor químico es un equipo en el que se va a llevar a cabo una reacción química, y es diseñado para maximizar la conversión del producto útil y la selectividad de esa reacción para reducir su costo lo más posible. Por lo general se busca conocer el tamaño y el tipo de reactor, así como el método de operación (Levitt, 1979). Se requiere de un reactor capaz de soportar los 500 °C y dimensiones que no superen las de la apertura de la mufla utilizada (25x33x18cm). Existen tres tipos de reactores, reactores por lotes, reactores semicontinuos y reactores continuos.

1. REACTORES POR LOTES (TIPO BATCH)

Los reactores por lotes o de tipo batch se caracterizan por ser alimentados todos los reactivos al inicio de la producción, y luego se permite que la reacción química se desarrolle. Se debe mencionar que se debe de mantener y controlar las condiciones de operación, ya que estas pueden jugar un factor importante en el desarrollo del proceso y parámetros de calidad de producto (Levenspiel, 1962).

2. REACTORES SEMICONTINUOS

En este tipo de reactores se combinan tanto las operaciones de los reactores por lotes y continuos. Algunos reactivos se agregan al inicio de la reacción y otros se van introduciendo en momentos específicos o de manera continua para poder cumplir con los parámetros de la reacción deseada. De manera que estos reactores tienen mayor flexibilidad y control en comparación con los reactores por lotes puros. Estos sistemas también requieren de control de procesos de manera que se pueda tener la reacción deseada y los productos que cumplan con la calidad establecida (Levenspiel, 1962).

3. REACTORES CONTINUOS

Este tipo de reactores son en los que el ingreso de reactivos se da de manera continua, esto sucede una vez la reacción química alcanza el equilibrio deseado, al mismo tiempo se libera y permite la extracción o recolección de productos continuamente. Este tipo de reactor necesita de un control de procesos exhaustivo, ya que debe de mantener las condiciones para cumplir con las especificaciones del producto. Son reactores que una vez alcanzan el equilibrio son fáciles de controlar, siempre y cuando no haya cambios abruptos en el sistema (Levenspiel, 1962).

H. VELOCIDAD DE REACCIÓN

La velocidad de reacción se refiere a la tasa de cambio de la concentración de una especie química con respecto al tiempo en una reacción química. En un sistema de reacción química, las velocidades de reacción pueden variar dependiendo de la estequiometría y los mecanismos específicos de la reacción. La teoría de velocidad de reacción por pasos sugiere que las reacciones químicas pueden ocurrir en etapas discretas o pasos, y la velocidad global de la reacción está determinada por el paso más lento, conocido como el paso limitante o paso lento (Levenspiel, 1962).

I. PIRÓLISIS

El proceso de pirólisis en sí, refiere a la degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, evitando las reacciones de combustión que generan gases de efecto invernadero. Es lo que se denomina como un tipo especial de termólisis. Este proceso se puede aplicar a todo tipo de materia orgánica, excepto metales y vidrios. Durante el proceso a dicha materia se ve involucrada en cambios de composición química de la

materia, que produce combustibles en estado líquido, gaseoso y sólido. La temperatura de descomposición química depende de los materiales a descomponer, varían de temperaturas de 200 °C hasta 1,000 °C. Según la temperatura a la que se trabaje, se obtendrán diferentes proporciones de los combustibles, esto también se ve afectado por el tiempo de contacto. Los combustibles se caracterizan por ser de cadenas cortas, lo que permite que tengan un poder calorífico más alto (Student Energy, 2022).

Este proceso consiste en un método de degradación termoquímica de la materia en ausencia de oxígeno. Como producto de la degradación, se obtienen productos en tres fases: líquida, gaseosa y sólida. Los principales factores que determinan las proporciones en las cuales se obtiene cada una de las fases son la temperatura y tiempo por el cual la materia es expuesta a dicha temperatura (Bidgwater, 2012).

1. TERMÓLISIS

Son las reacciones en las que compuestos se separan en otros al someterse a cambios abruptos de temperatura. Estos se dan cuando un cuerpo aumenta su temperatura por encima del nivel crítico, lo que genera el rompimiento de los enlaces y separación de átomos o moléculas (Student Energy, 2022).

2. CHAR

Se refiere al producto sólido obtenido a partir del proceso de pirólisis. La obtención de dicho producto se ve favorecida en el proceso de pirólisis lenta. Dentro de las aplicaciones que posee el char están:

- Fuente de combustible sólido
- Enmienda agrícola
- Medio de absorción (como carbón activado).

Un factor que se debe de tomar en cuenta es que las propiedades del material no son constantes, ya que en su mayoría se ven afectadas por factores de contaminación o de composición. En el caso del polietileno de alta densidad, las características pueden variar dependiendo del nivel de pureza que tiene dicho polímero, pues este se puede dividir en diferentes clases, como fue mencionado anteriormente. Las propiedades afectadas por estos factores incluyen: el poder calorífico, composición elemental y área superficial.

Siendo esta última, la que define la reactividad química del producto y su combustión (Abdullah, Sulaiman, & Aliasak, 2013).

3. ACEITE DE PIRÓLISIS

Se refiere al producto de la condensación de los vapores producidos por la reacción de pirólisis. Estos se caracterizan por ser combustibles y contar con cadenas simples de hidrocarburos que se pueden extraer para obtener un compuesto útil. Sus potenciales usos están:

- Extracción de compuestos de interés.
- Combustibles.

Dado a las características del polietileno de alta densidad, el aceite obtenido tiene alto poder calorífico y un bajo grado de oxidación. De manera que este tiene un alto potencial para utilizarse en motores de combustión interna, de manera que pueden ser una fuente de energía para procesos industriales. (Ranzi, Amaral, & Frassoldati, *Mathematical Modeling of Fast Biomass Pyrolysis and Bio-Oil Formation. Note II: Secondary Gas-Phase Reactions and Bio-Oil Formation*, 2017).

4. GASES NO CONDENSABLES

Bajo esta denominación se clasifican a todos los gases liberados durante la degradación termoquímica de la biomasa, como resultado de las reacciones que sufren los vapores que originan el bioaceite. En ocasiones, se ha evidenciado la formación de sulfuro de hidrógeno cuando la fuente de biomasa posee trazas de azufre en su composición (Yakub, y otros, 2015). Esta fase cuenta con varios potenciales, los principales suponen su uso como fuente de combustible o químicos, luego de reacciones catalíticas. En cualquiera de los casos, es necesario garantizar un contenido mínimo de bioaceite presente en el flujo de gases para evitar problemas de corrosión en los equipos involucrados, especialmente en motores de combustión interna (Hossain & Davies, 2013). Es importante destacar que su formación se ve favorecida al aumentar la temperatura de reacción y disminuir el tiempo de residencia de los mismos en el reactor (Bidgwater, 2012).

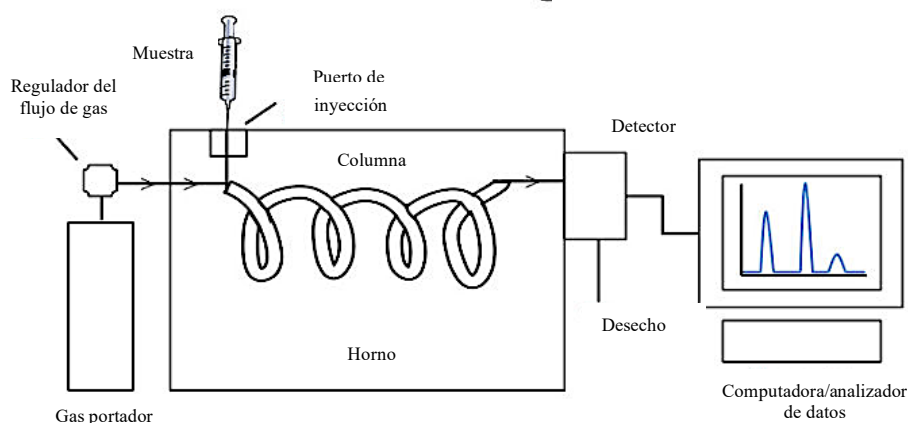
J. CROMATOGRAFÍA DE GASES CON DETECTOR FID Y TCD

Es una técnica que incluye la volatilización de la muestra de un volumen específico que se hace pasar por una columna cromatográfica. Se da una elución de la columna hacia un detector haciendo uso de un gas inerte. En esta la fase móvil no interactúa con el analito (por ser inerte). Esto se lleva a cabo para identificar cuantitativamente la proporción másica de una mezcla de compuestos orgánicos o acuosos. Esto es importante ya que permite identificar, cuantificar y determinar compuestos y moléculas complejas, además de obtener sus propiedades físicas (Heftman, 2004).

1. PARTES DE UN CROMATÓGRAFO DE GASES

- Gas portador
- Sistema de inyección
- Columna
- Horno
- Detector
- Ordenador (Sistema de análisis)

Figura 7. Esquema general de un cromatógrafo de gases



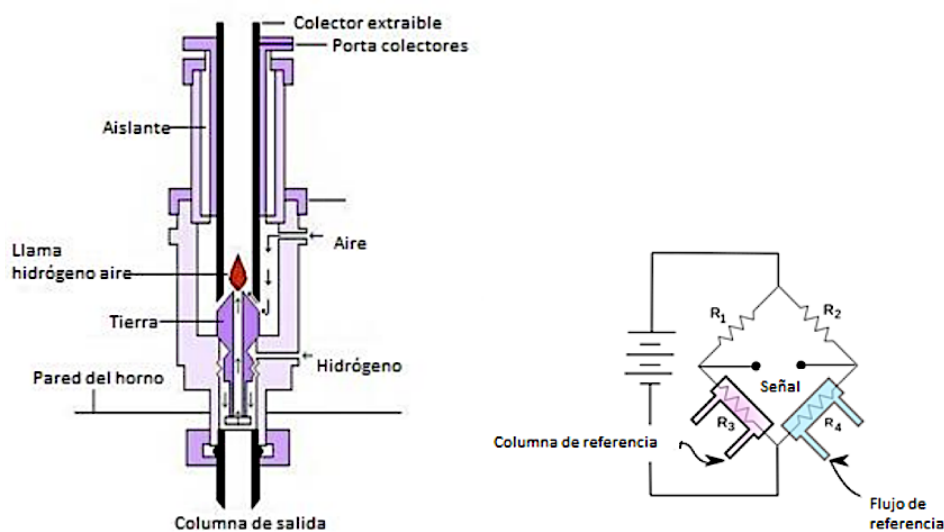
(Harris, 2007).

2. DETECTORES

El cromatógrafo compara el tiempo de retención de los compuestos en el cromatograma con una biblioteca digital interna para identificar los posibles compuestos

presentes. El tiempo de retención está relacionado con el punto de ebullición del compuesto. El impacto electrónico es una forma simple de romper las moléculas y generar señales de tiempos de retención, pero no es efectivo para determinar compuestos en mezclas complejas. Los detectores FID y TCD son usados en diferentes tipos de análisis de fases orgánicas y acuosas, y en la fase gaseosa se utilizan ambos detectores (Skoog, 2010).

Figura 8. Esquema de detector FID y TCD



(Skoog, 2010).

3. CROMATOGRAMA

Son representaciones gráficas de la separación de los componentes de una mezcla. La cromatografía es una técnica analítica utilizada para separar, identificar y cuantificar los componentes individuales de una muestra. Los componentes de la muestra se separan en la columna cromatográfica basándose en sus propiedades de interacción con la fase estacionaria y el gas portador. Los compuestos más volátiles son definidos primero, seguidos por los menos volátiles. Esto se puede observar en el cromatograma, donde el eje horizontal generalmente representa el tiempo o el volumen de elución, mientras que el eje vertical representa la intensidad de la señal detectada. Cada pico en el cromatograma corresponde a un componente separado de la muestra. La forma y la altura de los picos proporcionan información sobre la cantidad y la pureza de los componentes presentes (Anderson, Sweeney, & Williams, 2012)

V. ANTECEDENTES

A. SITUACIÓN ACTUAL

Informe Demanda y Mercado del HDPE por Grand View Research

Demanda global actual (2019) de HDPE: 78.1 millones de toneladas.

Demanda global de HDPE proyectada en 2025: 108.3 millones de toneladas.

- Se espera que el mercado global de HDPE alcance los 88.763 millones de dólares en 2025.
- En 2019, Asia Pacífico fue la región con mayor participación en el mercado del HDPE, con una participación del 44,7% en términos de ingresos.
- Se espera que el segmento de tuberías y accesorios de HDPE tenga la mayor tasa de crecimiento en el mercado, con una tasa de crecimiento compuesta anual del 4,7% entre 2020 y 2025.
- La creciente demanda de HDPE en aplicaciones como envases de alimentos, productos químicos y farmacéuticos, y la creciente demanda de tuberías de HDPE en sectores como el agua y el gas son los principales factores impulsores del crecimiento del mercado.

La producción se ve impulsada por el crecimiento de la industria de envase y construcción, además del rápido crecimiento económico y la demanda de productos plásticos en países como China e India. Esto ha generado un crecimiento de la región Asia Pacífico hasta liderar el mercado y la producción de HDPE a nivel mundial.

K. PROCESO DE PIRÓLISIS Y SUS AVANCES

1. Pirólisis de polietileno de alta densidad: Revisión y progreso

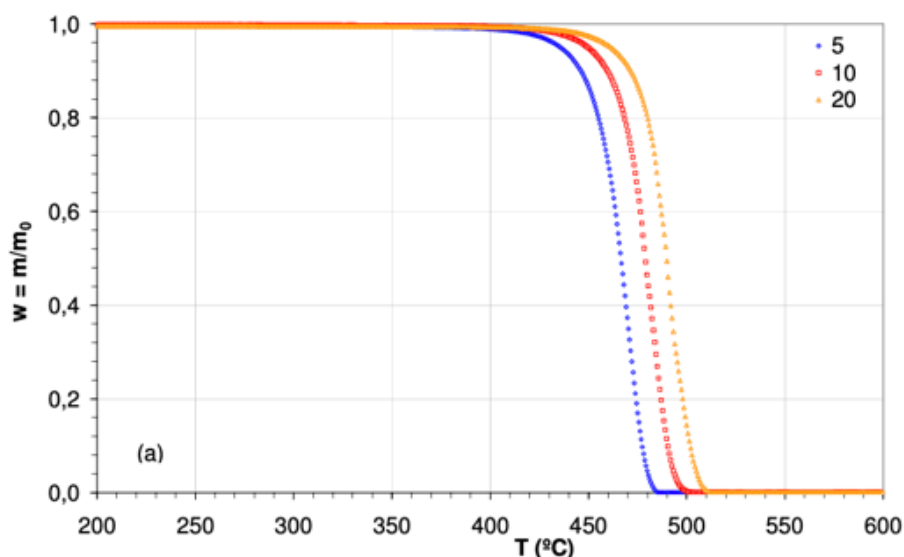
La conversión termoquímica es una alternativa innovadora al vertido y la incineración de residuos plásticos que elimina varios problemas sociales y ambientales y proporciona una fuente de energía respetuosa con el medio ambiente. En esta investigación, el HDPE

se degradó térmicamente en un reactor por lotes de pirólisis que produjo un alto contenido de líquido (60 %) y fracciones de gas (37 %). Además, el análisis composicional mediante GC-MS de la fracción líquida mostró que es un producto tipo combustible de alta combustión (Obeid & Janajreh, 2014).

2. Efectos de la velocidad de calefacción en atmósferas diferentes.

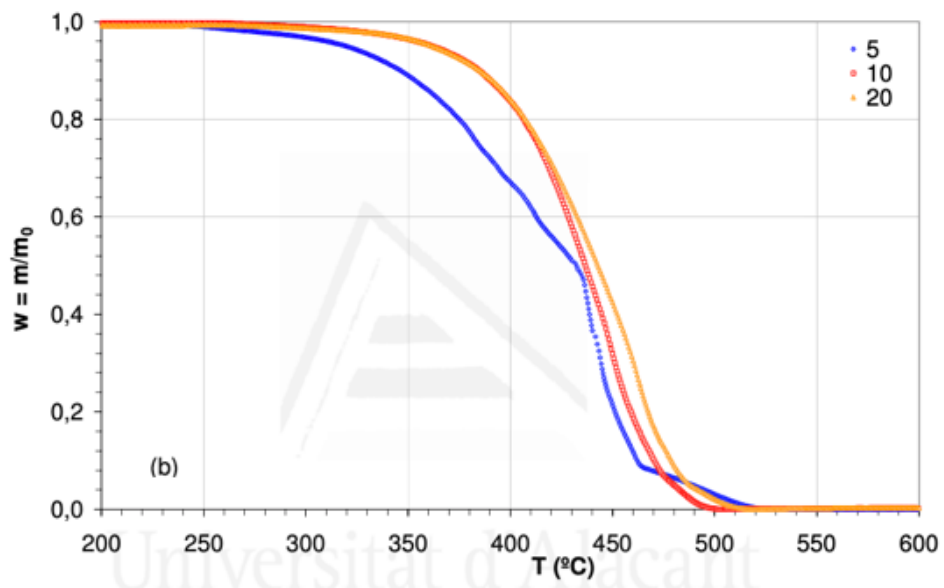
El proceso de pirólisis rápida a diferentes atmósferas y diferentes rampas de temperatura demuestra una obtención de líquidos completamente diferente, además de que en las atmósferas inertes y oxidativas el residuo sólido final es despreciable. El proceso en atmósfera con nitrógeno se lleva a cabo entre los 400°C y 500 °C. En la atmósfera con oxígeno se reduce notablemente la temperatura necesaria para comenzar la descomposición a 250 °C, terminando siempre a 500 °C. Se debe de tomar en cuenta que con una velocidad de 5°C/min puede que haya reacciones con el oxígeno. En el caso de la atmósfera mezclada se tiene un comienzo también en la misma escala anterior, más se obtiene mayor cantidad de char (Aracil Saez, 2008).

Figura 9 . TGs experimentales de HDPE. Efecto de la atmósfera de nitrógeno a cada una de las tres velocidades de calefacción: 5°C/min, 10°C/min y 20°C/min



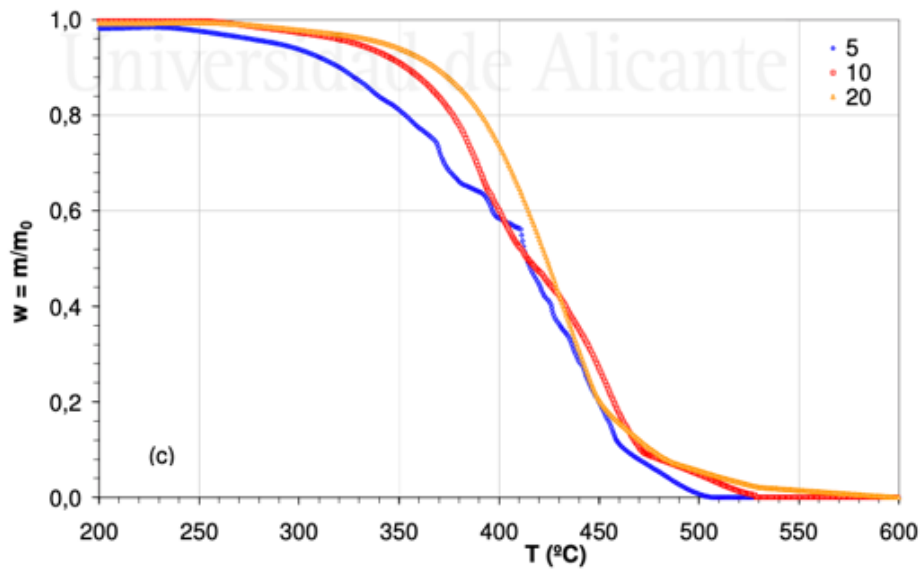
(Aracil Saez, 2008).

Figura 10. TGs experimentales de HDPE. Efecto de la atmósfera de nitrógeno a cada una de las tres velocidades de calefacción: 5°C/min, 10°C/min y 20°C/min



(Aracil Saez, 2008).

Figura 11. TGs experimentales de HDPE. Efecto de la atmósfera de nitrógeno a cada una de las tres velocidades de calefacción: 5°C/min, 10°C/min y 20°C/min



(Aracil Saez, 2008).

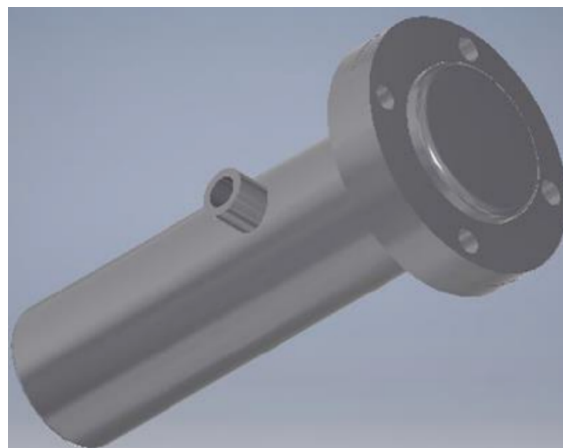
L. PROCESO DE PIRÓLISIS EN LA UVG

Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípites de palma africana DELI x AVROS a nivel laboratorio y su escalamiento.

Para el estudio técnico se utilizó un reactor de acero inoxidable 304 DN 50 de 21cm de largo, uniéndose la tapa con una brida DN 50 de 9.5cm de diámetro. Este cuenta con una apertura de 13mm de diámetro con un acople de 1/4" soldado al reactor, que tiene chimento donde se da el escape de los gases hacia el sistema de condensación (Castellanos, y otros, 2017).

En este megaproyecto se determinó que las condiciones para favorecer la fase sólida (carbón) son humedades iniciales cercanas al 50% (m/m) para el estípites, calentando hasta 500 °C y manteniendo esta temperatura durante 30 minutos. Se realizó siete pruebas de pirólisis con el sistema propuesto y se confirmó la producción de los materiales reportados por la literatura (sólido, líquido y gaseoso), en una proporción cercana al 33% de cada uno. Se verificó la producción de un gas inflamable en la fase no condensable. De la misma manera, se produjo una fase líquida conformada de dos fracciones (acuosa y orgánica) y, finalmente una fase sólida (Castellanos, y otros, 2017).

Figura 12. Modelo del reactor empleado en pruebas elaborado en Autodesk Inventor 2016.



(Castellanos, y otros, 2017)

VI. METODOLOGÍA

A. CÁLCULO DE TAMAÑO DE MUESTRA

1. Establecer los parámetros con los que se van a trabajar
 - Margen de error del 5.0%
 - Un valor de $Z_{\alpha/2}$ con una confianza del 95%, este valor debe ser de 1.96.
 - Desviación estándar poblacional estimada de 4.0%
2. Establecer el tamaño de la muestra a analizar
 - Se obtiene el valor de 4 corridas.

B. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

1. Contacto a Cementos Progreso
 - Se contactó a Cementos Progreso por medio de Luis Velásquez, de manera que se permita hacer el análisis termogravimétrico de los plásticos obtenidos.
 - Una vez enviados se debe esperar a que se realicen los análisis termogravimétricos para que posteriormente se nos envíen los resultados.
 - Una vez teniendo los resultados se puede estipular la temperatura de operación del reactor de pirólisis de 50 g escala laboratorio.

C. DETERMINACIÓN DE RAMPAS DE TEMPEARTURA

- Con base en investigaciones de papers de investigación se planteó utilizar rampas de temperatura en un rango de operación entre 5°C y 20°C cada 30 minutos de manera que haya variabilidad en los datos y se pueda definir el efecto que tiene.
- Realizar una prueba una rampa de 20°C cada 30 minutos, que genera de un taponamiento del reactor y sobrepresiones en el mismo de manera que es mejor descartar su operación.
- Realizar una prueba con una rampa de 15°C cada 30 minutos, esto genera un compuesto ceroso en vez de un combustible líquido.
- Dado la experimentación se determinó que era mejor establecer las corridas de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y de 10°C cada 30 minutos.

D. PIRÓLISIS EN REACTOR DE 50 g ESCALA LABORATORIO

1. Equipo y materiales requeridos

- 1 balanza semi-analítica Ohaus, modelo Value 300 Xtreme, con un rango de 0 a 2000 g e incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 reactor de pirólisis de 50 g de lecho fijo
- 1 horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200 °C.
- 1 sistema de condensación de vidrio.
- 1 bomba de agua de pecera de 120 W.
- 1 sistema de chimenea de acero inoxidable del reactor de pirólisis.
- 2 pedazos de cañuela de 15 cm de largo y 10 cm de diámetro.
- 1 espátula de metal
- 1 sistema de soporte (soporte y pinzas)
- 1 beaker de 500 mL.
- 1 beaker de 250 mL
- 1 cubeta plástica con capacidad de 20L.
- 2 mangueras plásticas
- 4 frascos de vidrio
- 50 mL de n-hexano con 96% de pureza, marca Merck.
- 50 mL de acetona 99.3% de pureza.

2. Preparación de la muestra

- Como materia prima se utiliza polietileno de alta densidad obtenido de la molienda por medio de la trituradora de plásticos.
- Con la balanza semi-analítica y el beaker de 500 mL medir la masa de materia prima del proceso de pirólisis.
- Abrir el reactor de pirólisis removiendo la tapa del mismo.
- Alimentar el reactor con el polietileno de alta densidad con ayuda de la espátula de metal y cerrar el reactor colocando la unión de grafito.
- No sobre cargar el reactor, de manera que se evite la salida de materia prima por la chimenea.

- Tarar los 4 frascos de vidrio, que se utilizarán para almacenar el producto, determinar su masa y hacer el balance de másico y energético del proceso.

3. Montaje del sistema de pirólisis

- Utilizar el horno mufla, el cuál es la fuente de energía del sistema de pirólisis y el sistema de condensación.
- Introducir el reactor cargado con la materia prima en el horno mufla.
- Colocar el sistema de chimenea del reactor, colocándolo a través del agujero ubicado en la parte superior de la mufla y roscando el mismo con el reactor.
- Colocar los aislantes de cañuela en la parte superior del mismo, para evitar que se solidifique el reflujo tapando el sistema de chimenea.
- Montar el sistema de condensación para los gases de chimenea.
- Utilizando el soporte y las pinzas, colocar con cuidado el contenedor de vidrio.
- Llenar de agua la cubeta plástica y sumergir la bomba de agua de pecera.
- Unir la bomba de agua de pecera con el contenedor de vidrio con la manguera plástica y utilizar la otra para dirigir lo que sale del condensador de regreso a la cubeta. Asegurar las mangueras en un arreglo a contracorriente con respecto a los gases de chimenea.
- A la salida del condensador colocar el beaker de 250 mL para recuperar los productos condensados.
- Unir el extremo de la salida de chimenea con el sistema de pirólisis para condensar los gases provenientes del mismo.

4. Corrida de pirólisis

- Iniciar la corrida conectando la bomba de agua de pecera a la corriente para comenzar a circular el agua de enfriamiento del condensador.
- Medir la temperatura del agua de enfriamiento con el termómetro láser.
- Encender la mufla presionando el botón de encendido ubicado en el panel de control.
- Colocar una temperatura inicial desde el panel de control de 110 °C.
- Una vez la mufla haya alcanzado esa temperatura, aumentar la temperatura del horno a una tasa de 20 °C cada 20 minutos, lo que equivale a 1 °C/min.
- Medir la temperatura en la chimenea a la salida de la mufla y a la entrada del condensador con el termómetro láser.

- Recuperar los productos a medida que vaya aumentando la temperatura, procurar separar el agua del combustible (el agua es lo primero en evaporarse en este sistema).
- Una vez que no se pueda recuperar producto del condensador, apagar la mufla, apagar la bomba de agua de pecera para detener la condensación y recuperar el producto líquido correspondiente a la fracción pesada en los frascos de vidrio.
- Luego de recuperar el producto líquido, se debe desmontar el sistema de condensación, descargando el agua del condensador en la cubeta y lavando con agua y acetona el condensador para remover los remanentes del producto en el sistema.
- De manera de evitar dañar el sistema, se debe de armar el reactor dentro de la mufla con la chimenea puesta y descargar hasta el siguiente día de manera que su temperatura se regule.

5. Recuperación y cuantificación de los productos.

- Se utiliza la tara realizada de los recipientes para determinar la masa de cada uno de los productos.
- En el caso de los productos líquidos se debe hacer por diferencia la determinación de la masa recolectada.
- En el caso del producto sólido se debe abrir el reactor y con ayuda de una espátula de metal remover el producto de pirólisis del reactor recolectar en un frasco de vidrio.
- Una vez recolectado, se mide la masa del mismo, para cuantificar la cantidad de producto sólido y realizar el balance de masa.
- Este proceso se debe hacer en quintuplicado, para poder hacer un análisis Q, dado el caso haya datos dudosos en la serie recolectada.

E. DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE LÍQUIDO OBTENIDO

- Se debe de pesar una probeta vacía.
- Una vez pesada la probeta, se debe de agregar el combustible líquido a estudiar, de manera que llene un volumen establecido (5 mL) y pesarlo.
- Una vez pesado, se apunta y se debe hacer una diferencia entre la masa de la probeta con el líquido a estudiar y con la probeta vacía.

Ecuación 1. Cálculo de la masa de combustible a partir de la probeta y la probeta con combustible.

$$\begin{aligned}m_{Combustible} &= m_{probeta+combustible} - m_{probeta} \\m_{Combustible} &= 32.1259g - 25.1259g \\m_{Combustible} &= 7.1667g\end{aligned}$$

- Por último, se debe de dividir la masa restante, que es la del líquido entre el volumen de líquido presente.

Ecuación 2. Cálculo de la densidad a partir de la masa y el volumen de combustible.

$$\begin{aligned}\rho_{Combustible} &= \frac{m_{Combustible}}{V_{Combustible}} \\ \rho_{Combustible} &= \frac{7.1667g}{10mL} = 0.71667 \text{ g/mL} \\ \rho_{Combustible} &= 716.67 \frac{g}{m^3}\end{aligned}$$

F. MODELO ENERGÉTICO Y CINÉTICO CON BERKELEY-MADONNA

1. Análisis de datos obtenidos

- Una vez hecho el procedimiento de pirólisis se debe determinar los datos que se pueden utilizar para el diseño del modelo energético y el modelo cinético que permita describir el reactor.
- Se debe de plantear un sistema de ecuaciones diferenciales que describa el comportamiento del polietileno de alta densidad dentro del reactor, de manera que se pueda posteriormente acomodar a un reactor en “batch” y un reactor continuo.
- Desarrollar un método gráfico de interpretación de los datos de manera que se pueda describir la información obtenida del reactor.
- Para el análisis de temperatura se realizó la ecuación de Boltzmann modificada para hornos mufla:

Ecuación 3. Ecuación de Boltzmann de temperatura en función del tiempo para hornos mufla.

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{te-t}{m}}}$$

Donde:

T = Temperatura del sistema

T₁ = Temperatura en el momento 1

T₂ = Temperatura en el momento 2

te = Constante

m = Constante

(Fernández, 2020).

- Posteriormente se debe ajustar los datos obtenidos de la temperatura en función del tiempo.
- Una vez se tengan ajustados los datos, se debe hacer una análisis de masa contra tiempo a partir de la constante descomposición de Arrhenius y la velocidad de reacción:

Ecuación 4. Ecuación de constante de descomposición de Arrhenius y de velocidad de reacción de pirólisis.

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

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

Donde:

k = Constante de degradación de Arrhenius

W = Masa instantánea dentro del reactor

W_f = Masa final de producto sólido dentro del reactor

n = Orden de reacción

r_w = Velocidad de cambio de masa del reactor en función del tiempo (velocidad del proceso de pirólisis)

A = Constante de frecuencia

E_a = Energía de activación

T = Temperatura obtenida de la ecuación modificada de Boltzmann para muflas mencionada anteriormente

R = constante de los gases ideales (8.314 kJ/kmol*K)

- Una vez planteado el modelo para llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad se procede a ajustar el modelo a los datos experimentales, determinando los parámetros cinéticos para cada gradiente de temperatura.

G. ANÁLISIS PODER CALORÍFICO COMBUSTIBLE LÍQUIDO

- Se prepara el calorímetro IKA 200C de manera que se pueda empezar a evaluar.
- Pesar 0.1g de Ácido Benzoico para calibrar el sistema.
- Llevar a cabo el proceso y determinar el poder calorífico del ácido benzoico, comparándolo con el valor teórico.
- Una vez calibrado, se procede a pesar 0.1g de líquido combustible obtenido, el cual se prepara e ingresa al calorímetro.
- Se obtiene el poder calorífico.

H. ANÁLISIS CARACTERÍSTICO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO

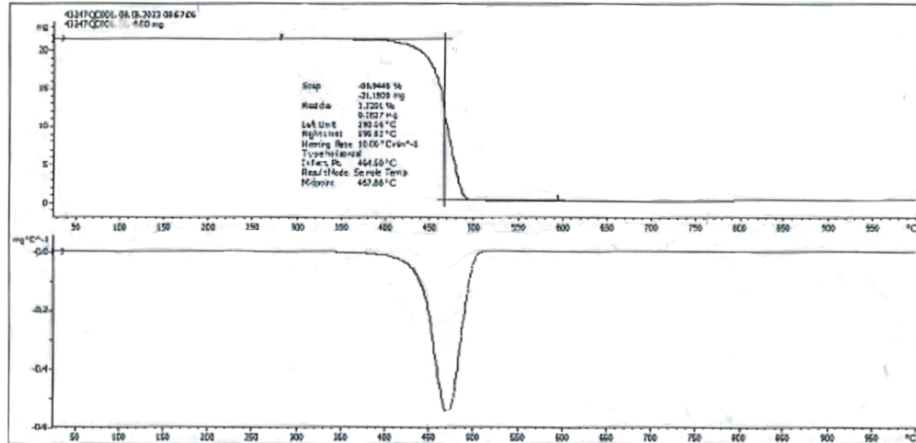
- Para el análisis cromatográfico del producto líquido, se analizó por separado la fracción ligera de la fracción pesada.
- Para la fracción ligera se realizó una filtración utilizando telas para recuperar inicialmente la fracción pesada y tomar unas muestras de la misma.
- Luego de la filtración con telas se realizó una filtración al vacío para terminar la filtración de la fracción ligera y finalmente se introdujeron en viales con la ayuda de jeringas de plástico y microfiltros.
- Para la fracción pesada, se midió la masa inicial de producto y se diluyó en 10 mL de cloroformo (haciendo una dilución de 0.25 g de muestra en 5 mL de cloroformo).
- Luego de diluir el producto de la fracción pesada se introdujo en viales con la ayuda de jeringas de plástico y microfiltros.
- Una vez se tuvo las muestras en viales, separando las muestras de la fracción ligera de la fracción pesada se analizaron el cromatógrafo de gases.
- Para la fracción ligera se utilizó una columna HP5 calentando a 60°C durante 2 minutos, luego calentando a una tasa de 3°C/min hasta 250°C por 5 minutos utilizando un flujo de 1 mL/min.

- Para la fracción pesada se utilizó una columna DB-Wax bajo las mismas condiciones de operaciones que con la columna HP5.
- Posteriormente se analizó los cromatogramas obtenidos para ambas fracciones con el cromatograma y el informe proporcionado por el equipo.
- Por otra parte, para la fracción pesada se realizó un análisis de los compuestos obtenidos en el informe, depurando ciertos compuestos y comparando con la base de datos del software ChemStation y con datos de la literatura para seleccionar compuestos que sean más acordes al proceso y la materia prima utilizada.
- Finalmente, para la fracción pesada se realizó un análisis del porcentaje de abundancia de cada compuesto sin tomar en cuenta el solvente para determinar la fracción de cada uno en la muestra.
- Se realizó el análisis de la fracción ligera en triplicado y el análisis de la fracción pesada en duplicado.

VII. RESULTADOS

A. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Figura 13. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) realizado con el apoyo de Cementos Progreso.

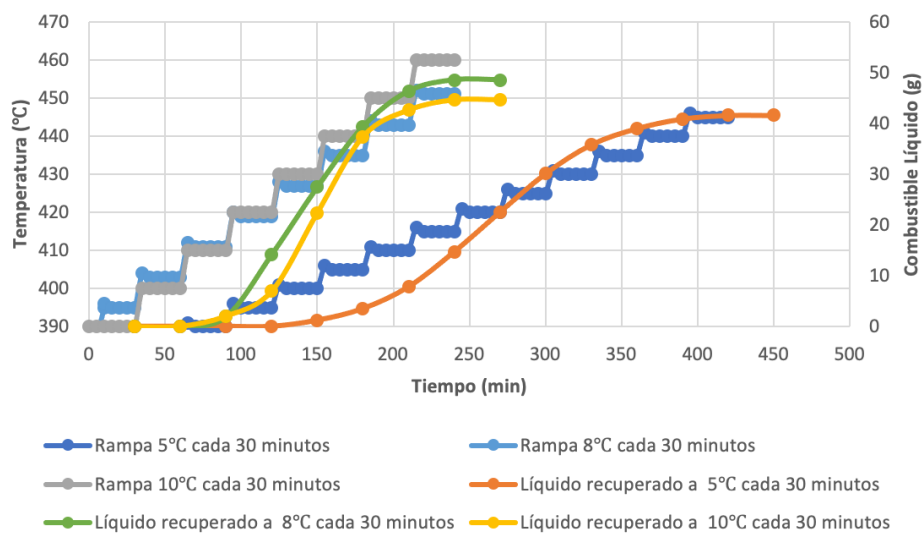


(Fuente: CETEC).

Se muestra el análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

B. COMPARATIVO DE RAMPAS DE TEMPERATURA Y COMBUSTIBLE LÍQUIDO RECUPERADO

Figura 14. Pirólisis lenta de promedio de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) a las rampas de temperatura planteadas



(Fuente: Propia).

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales promedio) del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a las rampas de temperatura de 5°C cada media 30 minutos, 8°C cada media 30 minutos y 10°C cada media 30 minutos en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos del líquido obtenido a través del tiempo para la rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos mientras que la temperatura se ve en color azul. En la curva verde se observan los datos experimentales obtenidos del líquido obtenido a través del tiempo para la rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos, mientras que la temperatura durante esta rampa se ve en la curva celeste. En la curva amarillo se observan los datos experimentales obtenidos del líquido obtenido a través del tiempo para la rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos, mientras que la temperatura durante esta rampa se ve en la curva gris.

C. RENDIMIENTOS, CARACTERIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE PRODUCTOS

Cuadro 1. Rendimiento promedio del combustible líquido según el gradiente de temperatura utilizado.

Gradiente de temperatura	Rendimiento combustible líquido (% g/g)	Rendimiento combustible gaseoso (% g/g)	Rendimiento combustible sólido (% g/g)
5 °C cada 30 minutos	83.20 ± 0.26	16.00 ± 0.24	0.80 ± 0.12
8 °C cada 30 minutos	94.93 ± 0.28	2.60 ± 0.21	0.27 ± 0.19
10 °C cada 30 minutos	89.13 ± 0.27	9.80 ± 0.32	1.00 ± 0.13

Se muestran los rendimientos de los combustibles obtenidos a partir de la **Ecuación 13** en la sección de ecuaciones.

Cuadro 2. Poder calorífico promedio obtenido del combustible líquido y gas recolectado en cada gradiente de temperatura a partir del Calorímetro IKA C200 comparado con el poder calorífico de la gasolina.

Gradiente de temperatura	Poder calorífico (J/g)	Poder calorífico promedio (J/g)	Rango poder calorífico gasolina (J/g)
5 °C cada 30 minutos	45,155.30 ± 1.71	44,685.67 ± 2.95	44,000.00 - 46,000.00
8 °C cada 30 minutos	45,272.70 ± 1.73		
10 °C cada 30 minutos	43,629.00 ± 1.69		
Compuesto Ceroso	35,551.10 ± 1.71	35,551.10 ± 1.71	
Gas	46,788.80 ± 3.23	46,788.80 ± 3.23	

Datos obtenidos utilizando el Calorímetro IKA C200 y la caracterización del gas. El poder calorífico del gas se calculó en base a la composición, utilizando valores teóricos de los compuestos presentes en el mismo.

Cuadro 3. Densidad del combustible líquido recolectado en cada gradiente de temperatura comparando con el de una gasolina comercial.

Gradiente de temperatura	Densidad (kg/m ³)	Densidad gasolina (kg/m ³)	% de Diferencia
5 °C cada 30 minutos	716.67 ± 0.03	720.00	0.46 ± 0.50
8 °C cada 30 minutos	721.45 ± 0.03		0.20 ± 0.52
10 °C cada 30 minutos	718.21 ± 0.03		0.25 ± 0.47

Se muestran las densidades del combustible líquido obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de ± 0.0001g y una probeta marca ValueWare de 25mL con una incertidumbre de ± 1mL.

Cuadro 4. Compuestos presentes promedio en el líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.911	0.18	Heptano
2	4.299	0.43	1-Nonano
3	4.481	0.59	Nonano
4	7.024	1.54	1-Deceno
5	7.306	1.68	Decano

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
6	10.713	2.81	1-Undeceno
7	11.063	2.59	Undecano
8	14.920	3.72	1-Dodeceno
9	15.293	3.51	Dodecano
10	19.237	4.27	1-Trideceno
11	19.605	4.09	Tridecano
12	23.472	4.46	1-Tetradeceno
13	23.822	4.53	Tetradecano
14	27.520	4.64	1-Pentadeceno
15	27.852	4.66	Pentadecano
16	31.386	4.37	1-Hexadeceno (Z)
17	31.705	4.88	Hexadecano
18	35.071	3.76	1-Heptadeceno
19	35.366	4.69	Heptadecano
20	38.582	3.46	5-Octadeceno
21	38.864	4.82	Octadecano
22	41.926	2.9	1-Nonadeceno
23	42.194	4.49	Nonadecano
24	45.123	1.94	1-Nonadeceno
25	45.383	4.02	Octacosano
26	48.175	1.32	1-Nonadeceno
27	48.421	3.6	Heneicosano
28	51.109	0.99	1-Nonadeceno
29	51.332	3.46	Eicosano
30	53.920	0.27	9-Tricoseno
31	54.125	2.16	Octacosano
32	56.809	2.01	Tetracosano
33	59.397	1.26	Pentadecano
34	61.890	0.97	Heneicosano
35	64.300	0.59	Octacosano
36	66.729	0.34	Heptacosano

Datos obtenidos utilizando el Espectrofotómetro GC-Masas con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle de Guatemala.

D. CINÉTICA PARA CADA RAMPA DE TEMPERATURA

Ecuación 5. Modelo cinético de descomposición energética de polietileno de alta densidad (HDPE).

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

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

Donde:

k = Constante de degradación de Arrhenius

W = Masa instantánea dentro del reactor

W_f = Masa final de producto sólido dentro del reactor

n = Orden de reacción

r_w = Velocidad de cambio de masa del reactor en función del tiempo (velocidad del proceso de pirólisis)

A = Constante de frecuencia

E_a = Energía de activación

T = Temperatura obtenida de la ecuación modificada de Boltzmann para muflas mencionada anteriormente

R = constante de los gases ideales (8.314 kJ/kmol*K)

Ecuación 6. Modelo de temperatura para el el gradiente de 5°C cada 30 minutos

$$T = T_1 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}$$

Donde:

$$R1 = \frac{(T_2 - T_1)e^{\frac{ta-t}{a}}}{a\left(1 + e^{\frac{ta-t}{a}}\right)} \quad R2 = \frac{(T_3 - T_2)e^{\frac{tb-t}{b}}}{b\left(1 + e^{\frac{tb-t}{b}}\right)} \quad R3 = \frac{(T_4 - T_3)e^{\frac{tc-t}{c}}}{c\left(1 + e^{\frac{tc-t}{c}}\right)} \quad R4 = \frac{(T_5 - T_4)e^{\frac{td-t}{d}}}{d\left(1 + e^{\frac{td-t}{d}}\right)}$$

$$R5 = \frac{(T_6 - T_5)e^{\frac{te-t}{e}}}{e\left(1 + e^{\frac{te-t}{e}}\right)} \quad R6 = \frac{(T_7 - T_6)e^{\frac{tf-t}{f}}}{f\left(1 + e^{\frac{tf-t}{f}}\right)} \quad R7 = \frac{(T_8 - T_7)e^{\frac{tg-t}{g}}}{g\left(1 + e^{\frac{tg-t}{g}}\right)} \quad R8 = \frac{(T_9 - T_8)e^{\frac{th-t}{h}}}{h\left(1 + e^{\frac{th-t}{h}}\right)}$$

$$R9 = \frac{(T_{10} - T_9)e^{\frac{ti-t}{i}}}{i\left(1 + e^{\frac{ti-t}{i}}\right)} \quad R10 = \frac{(T_{11} - T_{10})e^{\frac{tj-t}{j}}}{j\left(1 + e^{\frac{tj-t}{j}}\right)} \quad R11 = \frac{(T_{12} - T_{11})e^{\frac{tk-t}{k}}}{k\left(1 + e^{\frac{tk-t}{k}}\right)}$$

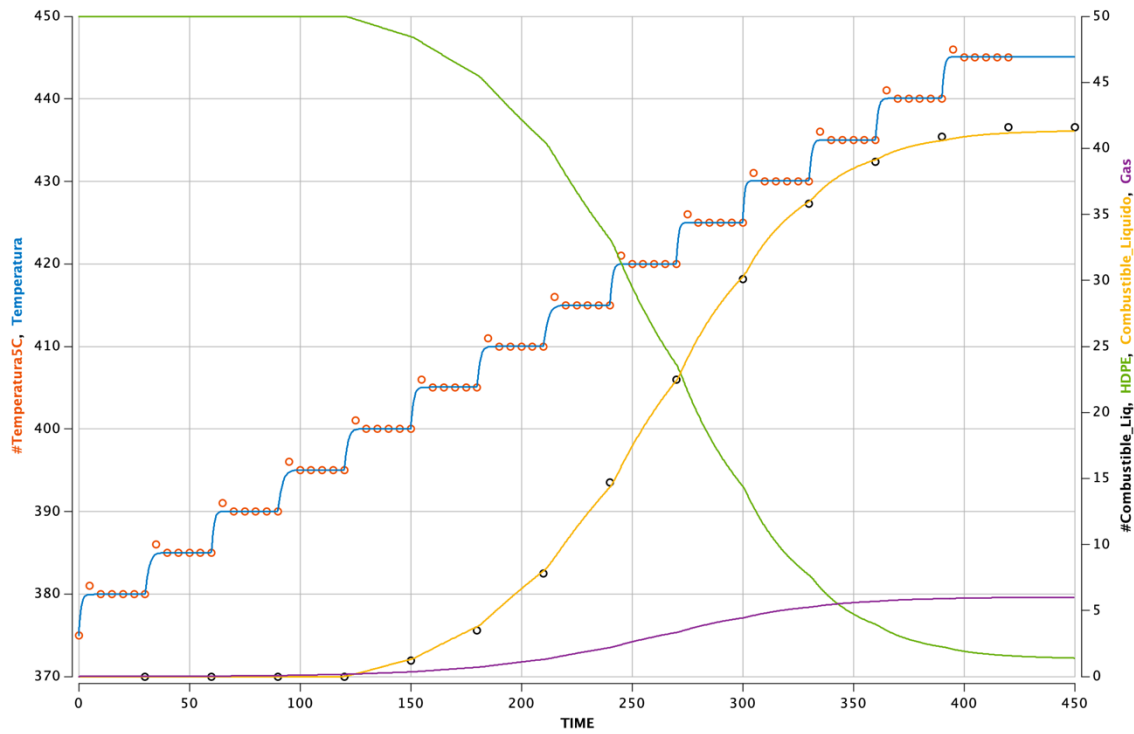
$$R12 = \frac{(T_{13} - T_{12})e^{\frac{tl-t}{l}}}{l\left(1 + e^{\frac{tl-t}{l}}\right)} \quad R13 = \frac{(T_{14} - T_{13})e^{\frac{tm-t}{m}}}{m\left(1 + e^{\frac{tm-t}{m}}\right)} \quad R14 = \frac{(T_{15} - T_{14})e^{\frac{tn-t}{n}}}{n\left(1 + e^{\frac{tn-t}{n}}\right)}$$

Cuadro 5. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad 5°C cada media 30 minutos.

Constante	Valor
X	6.7779×10^{20}
Ea	189007.99871
R	8.314
W_f	1.2
z	1.52944
a	0.78
b	1.30
c	0.81
d	1.47
e	1.15
f	0.94
g	1.02
h	1.51
i	0.83
j	0.69
k	0.60
l	0.87
m	0.74
n	0.41
ta	0.41
tb	30.73
tc	60.44
td	90.8
te	120.62
tf	150.52
tg	180.53
th	210.81
ti	240.45
tj	270.37
tk	300.33
tl	330.47
tm	360.47

Muestra las constantes que utilizadas para el modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 5°C cada media 30 minutos. De manera que se pueda aplicar en el modelo cinético en el software Berkeley-Madonna.

Figura 15. Predicción de la masa de HDPE en función de la temperatura del reactor de 50g durante el proceso de pirólisis a un gradiente de 5°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia).

Se muestra el análisis cinético para el reactor de 1 g. Se utilizó el software Berkeley Madonna, se muestra en el eje X el tiempo en minutos, en el eje Y izquierdo la temperatura en °C y en el eje Y derecho la masa. La curva amarilla corresponde a la masa de combustible líquido generado según la cinética, la curva morada representa el gas generado según la cinética, la curva verde representa la temperatura en base a la cinética y la verde el polietileno de alta densidad siendo consumida en base a la cinética. Los puntos negros representan el combustible líquido generado experimentalmente, los naranjas la temperatura experimental.

Ecuación 7. Modelo de temperatura para el el gradiente de 8°C cada 30 minutos

$$T = T_1 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8$$

Donde:

$$R1 = \frac{(T_2 - T_1)e^{\frac{ta-t}{a}}}{a\left(1 + e^{\frac{ta-t}{a}}\right)} \quad R2 = \frac{(T_3 - T_2)e^{\frac{tb-t}{b}}}{b\left(1 + e^{\frac{tb-t}{b}}\right)} \quad R3 = \frac{(T_4 - T_3)e^{\frac{tc-t}{c}}}{c\left(1 + e^{\frac{tc-t}{c}}\right)} \quad R4 = \frac{(T_5 - T_4)e^{\frac{td-t}{d}}}{d\left(1 + e^{\frac{td-t}{d}}\right)}$$

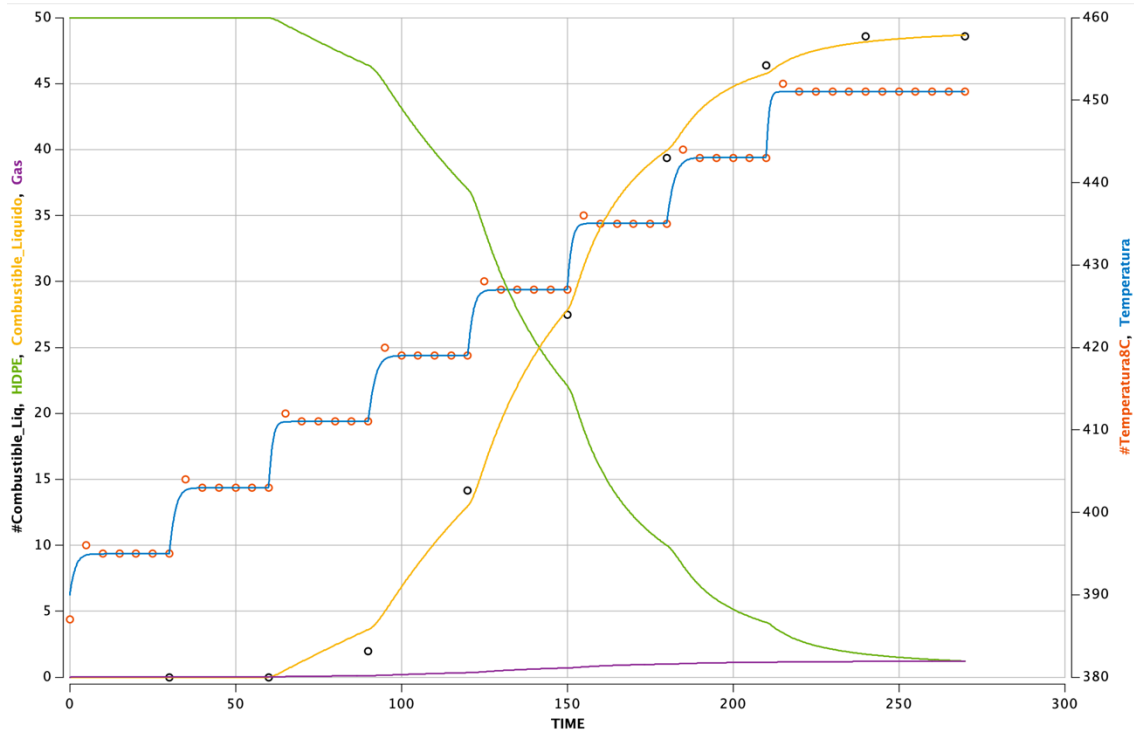
$$R5 = \frac{(T_6 - T_5)e^{\frac{te-t}{e}}}{e\left(1 + e^{\frac{te-t}{e}}\right)} \quad R6 = \frac{(T_7 - T_6)e^{\frac{tf-t}{f}}}{f\left(1 + e^{\frac{tf-t}{f}}\right)} \quad R7 = \frac{(T_8 - T_7)e^{\frac{tg-t}{g}}}{g\left(1 + e^{\frac{tg-t}{g}}\right)} \quad R8 = \frac{(T_9 - T_8)e^{\frac{th-t}{h}}}{h\left(1 + e^{\frac{th-t}{h}}\right)}$$

Cuadro 6. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 8°C cada media 30 minutos.

Constante	Valor
X	1.1531×10^{25}
Ea	234033.41612
R	8.314
W _f	0.3
z	2.15304
a	1.23
b	1.30
c	0.81
d	1.47
e	1.15
f	0.94
g	1.63
h	0.6
ta	0.65
tb	30.71
tc	60.44
td	90.80
te	120.62
tf	150.52
tg	180.87
th	210.32

Muestra las constantes que utilizadas para el modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 8°C cada media 30 minutos. De manera que se pueda aplicar en el modelo cinético en el software Berkeley-Madonna.

Figura 16. Predicción de la masa de HDPE en función de la temperatura del reactor de 50g durante el proceso de pirólisis a un gradiente de 8°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia).

Se muestra el análisis cinético para el reactor de 50 g. Se utilizó el software Berkeley Madonna, se muestra en el eje X el tiempo en minutos, en el eje Y izquierdo la temperatura en °C y en el eje Y derecho la masa. La curva amarilla corresponde a la masa de combustible líquido generado según la cinética, la curva morada representa el gas generado según la cinética, la curva verde representa la temperatura en base a la cinética y la verde el polietileno de alta densidad siendo consumida con base en la cinética. Los puntos negros representan el combustible líquido generado experimentalmente, los naranjas la temperatura experimental.

Ecuación 8. Modelo de temperatura para el el gradiente de 10°C cada 30 minutos

$$T = T_1 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8$$

Donde:

$$R1 = \frac{(T_2 - T_1)e^{\frac{ta-t}{a}}}{a\left(1 + e^{\frac{ta-t}{a}}\right)} \quad R2 = \frac{(T_3 - T_2)e^{\frac{tb-t}{b}}}{b\left(1 + e^{\frac{tb-t}{b}}\right)} \quad R3 = \frac{(T_4 - T_3)e^{\frac{tc-t}{c}}}{c\left(1 + e^{\frac{tc-t}{c}}\right)} \quad R4 = \frac{(T_5 - T_4)e^{\frac{td-t}{d}}}{d\left(1 + e^{\frac{td-t}{d}}\right)}$$

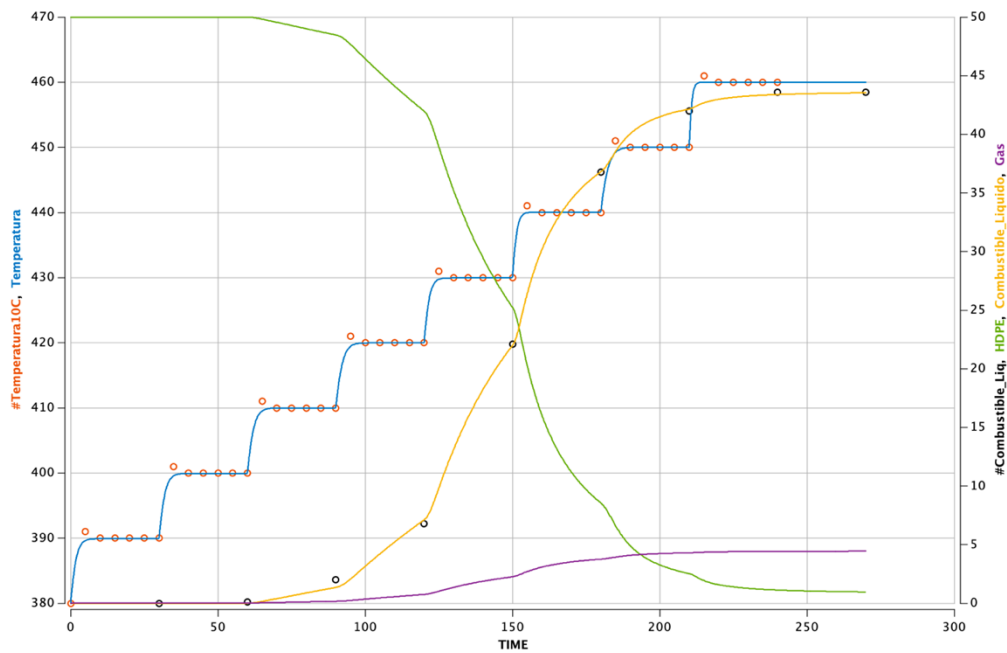
$$R5 = \frac{(T_6 - T_5)e^{\frac{te-t}{e}}}{e\left(1 + e^{\frac{te-t}{e}}\right)} \quad R6 = \frac{(T_7 - T_6)e^{\frac{tf-t}{f}}}{f\left(1 + e^{\frac{tf-t}{f}}\right)} \quad R7 = \frac{(T_8 - T_7)e^{\frac{tg-t}{g}}}{g\left(1 + e^{\frac{tg-t}{g}}\right)} \quad R8 = \frac{(T_9 - T_8)e^{\frac{th-t}{h}}}{h\left(1 + e^{\frac{th-t}{h}}\right)}$$

Cuadro 7. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 10°C cada media 30 minutos

Constante	Valor
X	1.672×10^{25}
Ea	230544.17109
R	8.314
W _f	0.8
z	1.8089
a	1.23
b	1.30
c	1.39
d	1.47
e	1.15
f	0.94
g	1.63
h	0.60
ta	0.65
tb	30.71
tc	60.76
td	90.80
te	120.62
tf	150.52
tg	180.87
th	210.32

Muestra las constantes que utilizadas para el modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 8°C cada media 30 minutos. De manera que se pueda aplicar en el modelo cinético en el software Berkeley-Madonna.

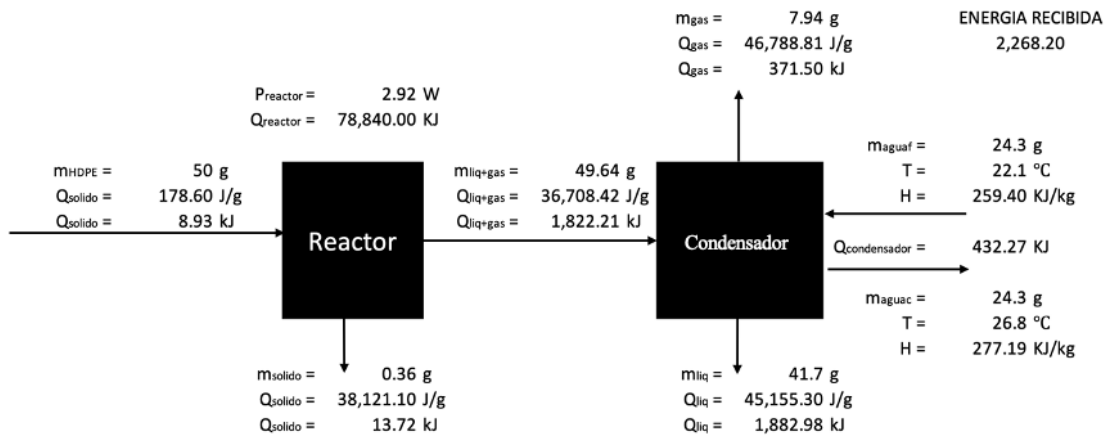
Figura 17. Predicción de la masa de HDPE en función de la temperatura del reactor de 50g durante el proceso de pirólisis a un gradiente de 8°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia).

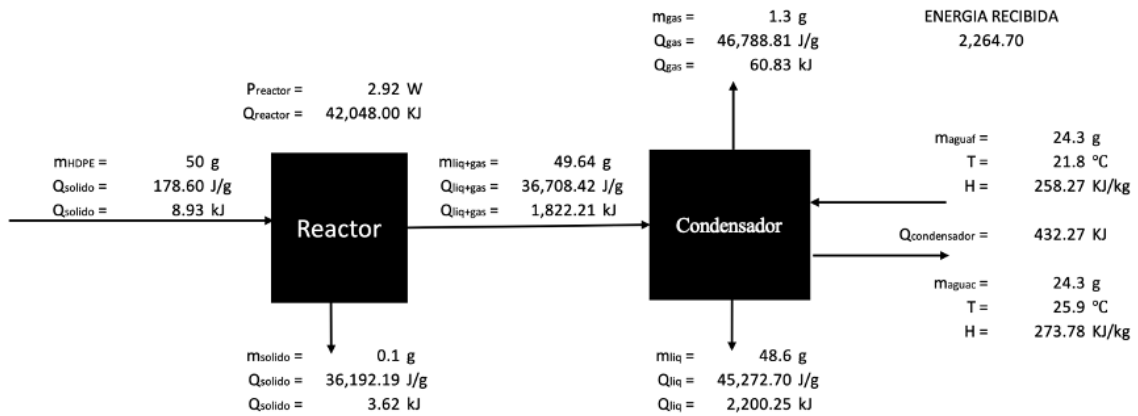
Se muestra el análisis cinético para el reactor de 50 g. Se utilizó el software Berkeley Madonna, se muestra en el eje X el tiempo en minutos, en el eje Y izquierdo la temperatura en °C y en el eje Y derecho la masa. La curva amarilla corresponde a la masa de combustible líquido generado según la cinética, la curva morada representa el gas generado según la cinética, la curva verde representa la temperatura en base a la cinética y la verde el polietileno de alta densidad siendo consumida en base a la cinética. Los puntos negros representan el combustible líquido generado experimentalmente, los naranjas la temperatura experimental.

Figura 18. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.



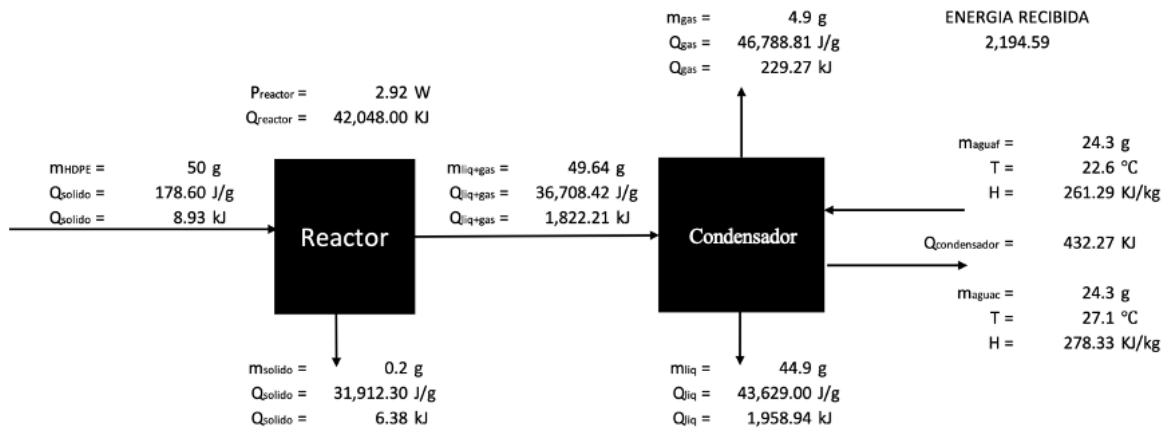
Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales y se tiene tabulados en el **Cuadro 21**.

Figura 19. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.



Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales y se tiene tabulados en el **Cuadro 22**.

Figura 20. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.



Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 10 de la sección de datos originales y se tiene tabulados en el Cuadro 23.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo de graduación se tuvo como objetivo principal el comparar energéticamente el combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a diferentes rampas de temperatura. De manera que se pudiera llegar a cumplir con dicho objetivo primero se llevaron a cabo las pruebas termogravimétricas de manera que se pudiera determinar las temperaturas de pirólisis. Cabe resaltar que para asegurar un trabajo estadísticamente viable se calculó el tamaño de la muestra utilizando la **Ecuación 1**, de manera que se determinó que todas las pruebas se debían hacer en triplicado. Esto se hizo con ayuda de CETEC de Cementos Progreso. Como se observa en las **Figuras 13, 14 y 15**, el polímero utilizado empieza a mostrar su descomposición a partir de los 385°C y termina alrededor de los 510°C. Esto comprueba teóricamente el proceso de pirólisis, ya que a medida que la temperatura se eleva, se van rompiendo los enlaces de las cadenas constituyentes del polímero. Esto genera que la descomposición de todas las cadenas largas se termine a los 510°C. Al comparar estos valores con los que se utilizaron en la práctica como se observa en las **Figuras 16, 17 y 18** la temperatura de inicio del proceso de pirólisis fue a los 395°C y terminó alrededor de los 470°C. La variación que se observa es debido a que en el caso de los datos otorgados por CETEC se llevó a cabo el proceso con un gradiente de temperatura de 10 °C cada 30 minutos, mientras que en la práctica se llevó a cabo un proceso de pirólisis lento con rampas de temperatura de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos, de manera que el proceso estaba orientado a obtener la mayor cantidad de combustible líquido.

Utilizando como base la prueba termogravimétrica realizada por parte de CETEC se realizaron las pruebas prácticas que se observan en las **Figuras 16, 17 y 18**. Dados los resultados de dichos procesos se llevó a cabo un análisis de rendimiento en cuanto a la obtención de combustible líquido por medio de la masa inicial de compuesto. El rendimiento fue de $83.20 \pm 0.26\%$ de para el gradiente de 5° cada 30 minutos, mientras que fue de $97.14 \pm 0.28\%$ para el gradiente de 8°C cada 30 minutos y de $89.13 \pm 0.27\%$ para el gradiente de 10°C cada 30 minutos. Esto se observa en el **Cuadro 2**, donde se ve que el máximo de rendimiento promedio se alcanzó haciendo uso el gradiente de

temperatura de 8°C cada 30 minutos. Esto demuestra que el comportamiento de los productos líquidos obtenidos durante el proceso de pirólisis depende de la velocidad a la que se calienta el material y el tiempo de residencia a altas temperaturas. En una prueba llevando a cabo el calentamiento a 15°C cada 30 minutos se obtuvo un líquido ceroso, de manera que se demostró que cuando se calienta rápidamente un material durante el proceso de pirólisis, la temperatura en el interior del material aumenta rápidamente, lo que lleva a una descomposición térmica más rápida de los compuestos orgánicos presentes. Esto genera que las cadenas más pesadas presentes en el polímero (HDPE) se elven y posteriormente se condense, generando la agrupación de un compuesto semisólido-aromático. A esto se debe agregar que la velocidad de reacción química es rápida, de manera que los compuestos no tiene el tiempo de dispersarse y se reorganicen en estado líquido, generando una reacción entre los compuestos provocando la formación de un compuesto ceroso.

A esto se debe agregar que durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad se obtuvo un rendimiento mayor al 83.20% de combustible líquido, lo que demuestra que el proceso tiene una alta del combustible útil y que su obtención aumenta a medida que se aumenta la temperatura. Se observa también que el recuperado sólido es menor al $1.00 \pm 0.12\%$ lo que demuestra que al utilizar polietileno de alta densidad se tiene un alto rendimiento del combustible líquido y del gaseoso, el cual en todos los casos supero $2.60 \pm 0.21\%$, estos tienen el potencial para ser utilizados, ya que como se observa en el **Cuadro 3**, el poder calorífico promedio del gas es de $46,788.81 \pm 3.2$ J/g, de manera que muestra mejores capacidades para producir energía pero se obtiene en mucha menor cantidad. Es interesante observar también que el HDPE al ser un polímer obtenido a partir del petróleo, el componente principal del gas es el propano, el cual es proveniente del petróleo y también se obtiene durante su refinación.

Cabe resaltar que al comparar los **Cuadros 15, 16 y 17**, nos damos cuenta que el coeficiente de variación para la recuperación el combustible líquido fue menor a medida que aumentaba la temperatura siendo de 2.33% para la rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos, mientras que de 1.97% para la rampa de 8°C cada 30 minutos y de 1.88% de 10°C cada 30 minutos. Esto implica que la variación de la cantidad de combustible recuperado disminuye cuando se manejan temperaturas más altas, a pesar de esto se debe

resaltar que al tener un coeficiente de variación menor al 5% en todos los casos, estadísticamente muestran que el proceso es repetitivo para cada una de las rampas de temperatura (Anderson, Sweeney, & Williams, 2012).

El aumento del rango de la rampa de temperatura resulta en la formación de productos líquidos con un color más oscuro. Por otro lado, con el resto de pruebas se demostró que si el material se calienta lentamente durante la pirólisis, se le proporciona más tiempo para descomponerse gradualmente. Esto se puede observar en el **Cuadro 6**, en el cual se observan los compuestos principales presentes en el líquido combustible obtenido a una rampa de temperatura de de 5°C cada 30 minutos.

A partir de los datos de temperatura, cantidad de producto y tiempo de operación se propuso la realización de un modelo cinético que prediga el comportamiento de la reacción de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a las diferentes rampas de temperatura. Esto se llevó a cabo haciendo uso del software Berkeley-Madonna, basándose en la ecuación de Boltzmann modificada para muflas, pues en una mufla se lleva a cabo el proceso de calentamiento. también del tiempo. Se observa que en los primeros minutos de cualquier rampa de temperatura durante el proceso de pirólisis no hay tanta producción de combustible líquido, así como que la masa generada con el paso del tiempo y aumento de temperatura no son constantes. Debido a esto es que el modelo se diseña por partes, pues el modelo contempla el cambio de temperatura y el decaimiento de masa por medio de Arrhenius, por lo que el comportamiento de la misma es variable y también por lo que las constantes de cada tramo van cambiando hasta acoplarse a los datos experimentales. Esto se puede observar en las **Figuras 19, 20 y 21**, donde el comportamiento de la masa de HDPE disminuye a medida que aumentan los productos útiles como el combustible líquido, gaseoso y sólido.

Es importante mencionar en cuanto a los modelos cinéticos determinados que el orden de reacción depende directamente del ritmo, composición y rendimiento del combustible líquido obtenido. Esto es notorio debido a que en el gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos el orden es de 1.52944, mientras que para el de 8°C cada 30 minutos es de 2.15304 y por último para el de 10°C cada 30 minutos es de 1.80899. Se logra observar que este valor aumenta a medida que aumenta el rendimiento de combustible líquido obtenido y su composición es de cadenas más cortas, apoyado por los **Cuadros 32, 33 y**

34. Dando como resultado la demostración del efecto de la temperatura directamente en la cinética de la reacción, donde un aumento de la temperatura puede tener un efecto en el aumento del rendimiento, pero un aumento excesivo de la misma puede llegar a desfavorecer el tiempo de contacto. Al desfavorecer el tiempo de contacto se está generando una gasificación de compuestos pesados, lo cual conlleva al aumento en compuestos de cadenas largas y pesadas que dificultan una buena combustión. Esto se ve apoyado también por el análisis de varianzas (ANOVA) en el **Cuadro 34**, donde se observa que el efecto de la temperatura, el tiempo y la interacción entre las variables tiene un efecto significativo en el rendimiento de combustible líquido obtenido. Esto se hizo con una significancia de 0.05, permitiendo además describir al 98.28% de los datos en un sistema multicomponentes, esto visto con el R^2 de multicomponentes obtenido. Además de esto, como se observa en la **Figura 43**, los datos se comportan normalmente, de manera que se puede asumir normalidad estadística, demostrando que el ANOVA realizado es correcto.

Al comparar los modelos mencionados anteriormente, el modelo que representa el proceso a un gradiente de 5°C cada 30 minutos, se muestra en la **Figura 19**, al comparar este con los de 8°C cada 30 minutos (**Figura 20**) y de 10°C cada 30 minutos (**Figura 21**), se logra observar que a medida que disminuye el gradiente de temperatura hay una mayor cercanía del modelo a los datos experimentales. Esto se debe a que el modelo tiene una mayor cantidad de partes, y estas partes se apegan en cada tramo a los datos de temperatura y de masa estudiados, lo cual permite acercarse mucho más al valor real. Además, se observa que entre el modelo del proceso de pirólisis de 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos no hay una diferencia significativa en el punto de inflexión del modelo y el tiempo transcurrido en la misma, pero muestra un cambio significativo en la recuperación de combustible líquido. Esto también puede deberse a condiciones ambientales, pues el tubo que permite llevar el fluido al condensador para la recuperación del líquido no cuenta en toda su extensión con aislante térmico, lo que a menores temperaturas significa una mayor pérdida de compuesto y también a un mayor tiempo necesario para la recuperación del mismo.

También es importante mencionar que la ecuación trata de predecir la temperatura del reactor en función del tiempo y dado a que los cambios de gradientes fueron a tiempos

constantes, se permitió llegar a un modelo que se acerca mucho a los datos experimentales. Se debe resaltar qué para poder llegar a una mayor cercanía de datos, se recomienda realizar un análisis y realizar un modelo de transferencia de calor dentro del reactor. Este análisis debería de tomar en cuenta tanto el calor generado por la conducción de la superficie del reactor como por convección dentro del mismo. A esto debemos agregar también que el modelo no toma en consideración los aspectos de condensado del combustible útil ni el tramo de transporte del fluido por el tubo de acero inoxidable hacia el condensador.

El análisis también buscaba determinar el poder calorífico del líquido combustible obtenido a partir de diferentes rampas de temperatura. Al hacer esto se obtuvieron como se observa en el **Cuadro 3**, el poder calorífico calculado para el combustible líquido obtenido a partir de la rampa de 5°C cada 30 minutos fue de $45,155.3 \pm 1.7$ J/g, mientras que para la rampa de 8°C cada 30 minutos fue de $45,272.7 \pm 1.7$ J/g y finalmente la de la rampa de 10°C cada 30 minutos fue de $43,629.0 \pm 1.7$ J/g. Al comparar dichos valores con los de la gasolina comercial, los cuales oscilan entre 44,000 y 46,000 J/g, podemos observar que el combustible líquido obtenido se de las rampas de 5°C cada 30 minutos y 8°C cada 30 minutos tiene las mismas características y dado estos valores podría usarse como alternativa para un motor de combustión. Además de esto se comparó la densidad del combustible líquido obtenido y la del combustible comercial la cual es de 720 kg/m³. Al comparar el combustible líquido obtenido en cada rampa de temperatura se obtuvo una densidad de 716.67 ± 0.03 kg/m³ para la rampa de de 5°C cada 30 minutos, de 721.40 ± 0.03 kg/m³ para la rampa de 8°C cada 30 minutos y de 718.21 ± 0.03 kg/m³ para la rampa de de 10°C cada 30 minutos. Al comparar se obtiene una diferencia porcentual del 0.45 ± 0.50 %, 0.20 ± 0.52 % y 0.25 ± 0.47 % respectivamente. Se debe resaltar que los líquidos mencionados no cuentan con sales precipitadas en el líquido, mientras que el combustible de la rampa de 10°C cada 30 minutos arrastró sales debido al aumento en la rampa de temperatura y cuenta con una apariencia más oscura. A esto se debe agregar que al tener un promedio de poder calorífico de $44,685.67 \pm 2.95$ J/g, se logra demostrar que el valor energético del compuesto es alto y es cercano al de la gasolina comercial, además de que el combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) tiene una densidad cercana al combustible comercial.

Se le determinó el poder calorífico también a el compuesto ceroso obtenido el cual fue de $35,551.1 \pm 1.7$ J/g, para facilitar la determinación la aplicación que puede llegar a tener el mismo. Los combustibles líquidos obtenidos se observan en la **Figura 19**, debidamente identificadas. En esta figura se puede observar a simple vista por el cambio de color del producto obtenido. Además, se observa que a medida que la rampa de temperatura supera los 8°C cada 30 minutos el color se deteriora más y apoyado por el **Cuadro 3**, sus características como combustibles bajan. Se recomienda llevar a cabo una cromatografía de gases para caracterizar los diferentes compuestos presentes en el combustible líquido obtenido a las diferentes rampas de temperatura.

Al observar la composición obtenida a partir de la caracterización por medio de cromatografía GC-masas, se logra observar que están compuestos principalmente de cadenas de carbono simplificada. Este es un dato importante ya que permite asociar los productos líquidos obtenidos a cadenas de combustión con alto poder calorífico, lo cual ya fue mencionado anteriormente. A esto se debe agregar que como se muestra en la composición del gas obtenido de dicho proceso en el **Cuadro 31**, el propano y ciclopropano son los principales constituyentes, representando alrededor del 56.59% del mismo. Estos compuestos suelen ser combustibles comerciales, cuyo poder calorífico es elevado. Cuando se comparan las **Figuras 41, 42 y 43**, se logra observar la composición de los combustibles líquidos obtenidos contienen los mismos compuestos, pero lo que varía es cantidad presente en cada uno. A esto se debe agregar que los estas variaciones van ligadas a la rampa de temperatura empleada, donde el comportamiento del cromatograma se desvía al cambiarlas. En la **Figura 41**, se observa una distribución aproximadamente Gausseana, donde los compuestos presentes en se distribuyen a lo largo de la misma lo que demuestra que la presencia de estructuras grandes y pequeñas son aproximadamente equitativas en el compuesto. En la **Figura 42**, el cromatograma se desplaza hacia la izquierda de manera que hay mayor presencia de compuestos pequeños, es decir que el tamaño de las cadenas disminuye, además, muestra que estas son más cercanas a las estructuras de octanos, de manera que el octanaje del combustible de la rampa de 8°C cada 30 minutos es más alto. Por último, se observa en la **Figura 43**, que el comportamiento del cromatograma es más equitativo a lo largo del eje del tiempo de retención, pero también que disminuye el tamaño de los picos del centro, esto muestra que hay un conjunto de estructuras grandes y pequeñas en el combustible líquido. El

tamaño de los picos muestra que hay gran cantidad de compuestos con cadenas pequeñas, , pero hay estructuras grandes que lo contrarrestan y por ello es que su octanaje es menor y por lo mismo su poder calorífico es menor.

Al obtener los valores de poder calorífico de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad, se procedió a hacer un balance de masa y energía para cada uno de los sistemas. En el caso del gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos, se obtuvo el balance que se muestra en la **Figura 22**, en este se observa que el reactor requirió de 78,840.00 kJ de energía para llevar a cabo el proceso de catálisis térmica. Esta energía requerida se definió a partir de la potencia que requiere la mufla para llevar a cabo el calentamiento y el tiempo de utilización. Esto al compararlo con el valor energético obtenido en total; el cual representa la suma del combustible sólido, líquido y gaseoso, el cual es de 2,268.20 kJ y se observa como la energía recibida en el proceso, demostrando que energéticamente no es viable utilizar este gradiente. En la **Figura 23**, se observa el balance de masa y energía del proceso a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos, en este se muestra que se suministraron 42,048.00 kJ para llevar a cabo el proceso de pirólisis, y se obtuvo un total de 2,264.70 kJ de energía recibida a partir del proceso, demostrando que este gradiente tampoco es eficiente energéticamente, pero si es más eficiente que el gradiente de 5°C cada 30 minutos. Por último, tenemos el gradiente de 10°C cada 30 minutos, cuyo balance de masa y energía se observa en la **Figura 24**, en este se observa que el reactor necesitó de 42,048.00 kJ de energía y se obtuvo a partir del proceso un total de 2,194.59 kJ, siendo este menos eficiente que el proceso a un gradiente de 8°C cada 30 minutos, pero más eficiente que el gradiente de 5°C cada 30 minutos.

Al establecer las rampas de la forma que se hizo esto permitió garantizar un calentamiento y un tiempo de contacto homogéneo durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad. El efecto que tiene el implementar diferentes rampas de temperatura se logra observar a partir de la **Figura 14**. Esto, como se observa al comparar esta figura con las **Figuras 18, 19 y 20** demuestra que la energía necesaria varía a partir de las rampas de temperaturas empleadas. El utilizar una rampa de temperatura alta permite que el proceso se lleve a cabo más rápido, de manera que disminuye el consumo de energía, pero al mismo tiempo puede generar una mayor degradación de la materia

prima, es decir una. Esto es importante ya que permite denotar que la selección de una correcta rampa de temperatura permite hacer el proceso más viable. Se denota también el efecto de la rampa de temperatura en la generación de producto, pues a medida que hay mayor tiempo de contacto se obtiene un menor tamaño de hidrocarburos y por ende mayor cantidad se va como vapor no condensable. Por ello, en la misma **Figura 14** se observa que hay una mayor generación de producto en la rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos, debido a que balancea la temperatura con el tiempo de contacto requerido.

Se tiene que tomar en cuenta que el balance de masa y energía además de mostrar que el proceso muestra ser ineficiente energéticamente, muestra que el polietileno de alta densidad manejado a gradientes entre 5°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos tiene un gran rendimiento pues este oscila entre el $83.40 \pm 0.26\%$ y $97.20 \pm 0.28\%$. La relación entre la eficiencia energética va a verse definida por la escala en la que se haga el proceso, en este caso, se demuestra que no es viable, dado a que estamos trabajando a una escala laboratorio. Se recomienda estudiar el escalamiento del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad de manera que se pueda definir la escala en la que el proceso se vuelve viable energéticamente. Es importante tomar en cuenta que dado a que el poder calorífico del combustible líquido obtenido es cercano al de un combustible comercial como la gasolina, hace recomendable el estudiar métodos de reducción de consumo de energía durante su obtención.

IX. CONCLUSIONES

- Se determinó el rango de temperatura de degradación del polietileno de alta densidad (HDPE), empezando a 385°C y terminando a 510°C, de manera que se llevó a cabo el proceso de pirólisis lenta a partir de los 395°C y se terminó a los 470°C.
- Se obtuvo un rendimiento de obtención de combustible líquido del $83.20 \pm 0.26\%$ para el gradiente de 5°C/30 min, del $97.13 \pm 0.28\%$ para el gradiente de 8°C cada 30 minutos y del $89.20 \pm 0.27\%$ para el gradiente de 10°C cada 30 minutos. Comprobando que el mayor rendimiento se obtiene en el gradiente de 8°C cada 30 minutos.
- Al desarrollar y comparar los modelos cinéticos generados para cada rampa de temperatura se observa que se obtuvieron valores superiores en las constantes cinéticas para la energía de activación y orden de reacción a medida que se aumentaba la rampa de temperatura de 5°C/30 min, 8°C/30 min y 10°C/30 min. El orden de reacción aumenta a medida que aumenta el rendimiento y disminuye el tamaño de las cadenas presentes en el combustible líquido.
- Al determinar el análisis fisicoquímico del producto líquido a diferentes temperaturas mediante cromatografía de gases-masas, se determinó que tiene un alto poder calorífico promedio de $44,685.67 \pm 2.95$ J/g utilizando el calorímetro IKA C200, siendo este cercano al de un combustible comercial el cual es de 44,000 - 46,000 J/g.

X. RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo un estudio de las aplicaciones que puede tener el compuesto ceroso obtenido a partir del proceso de pirólisis de HDPE a una rampa de 15°C cada 30 minutos.
- Realizar un estudio térmico del sistema de pirólisis utilizado para determinar pérdidas en el sistema y proponer mejoras para el aprovechamiento de la energía.
- Realizar una evaluación económica del proceso de pirólisis de HDPE a partir de los resultados obtenidos en este trabajo de graduación, para determinar los posibles beneficios de realizar dicho proceso.
- Evaluar la destilación del combustible líquido para determinar la aplicación de las fracciones purificadas obtenidas de la pirólisis de polietileno de alta densidad.
- Realizar una evaluación técnica del proceso de pirólisis rápida de polietileno de alta densidad para determinar los rendimientos y productos con una rampa de temperatura acelerada.
- Evaluar el efecto del nitrógeno para generar un ambiente inerte en el inicio de la reacción sobre los productos obtenidos, sus composiciones y poder calorífico.
- Realizar un estudio técnico de catalizadores a emplear en el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad para potencialmente disminuir la energía necesaria para llevarlo a cabo.
- Realizar un estudio técnico del impacto que tienen los contaminantes presentes en HDPE en el proceso de pirólisis.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, N., Sulaiman, F., & Aliasak, Z. (2013). *A case study of pyrolysis of oil palm wastes in Malaysia*. AIP Conference Proceedings, 1528(1), 331-336.
- Aracil Saez, I. (2008). *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Avellaneda, F. A. (2010). *Producción y Caracterización de biodiesel de palma y aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con reactor helicoidal*. Cataluña: Universitat Rovira Virgil.
- Daintith, J. (2016). *A Dictionary of Chemistry*. Oxford, New York: Oxford.
- Fernández, A. (2020). *Análisis preliminar de modelos de pirólisis de biomasa para generación de combustibles a partir de residuos*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética.
- Hossain, A., & Davies, P. (2013). *Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines - A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, 165- 189
- Hougen, O. A., Watson, K. M., & Ragatz, R. A. (1967). *Chemical Process Principles*. Washington: John Wiley & Sons, Inc.
- Levitt, B. P. (1979). *Química Física práctica de Findlay*. Londres: Reverté.
- Meier, D., van de Beld, B., Bridgwater, A. V., Elliott, D. C., Oasmaa, A., & Preto, F. (2013). *State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries*. Renewable Sustainable Energy Review, 20, 619-641.

- Miller, R., & Bellan, J. (1997). *A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics*. *Combustion Science Technology*, 126(1-6), 97-137.
- Obeid, F., & Janajreh, I. (2014). *High Density Polyethylene Pyrolysis: Review and Progress*. Abu Dhaby: Masar Institute of Science and Technology.
- Ranzi, E., Amaral, P. E., & Frassoldati, A. (2017). *Mathematical Modeling of Fast Biomass Pyrolysis and Bio-Oil Formation. Note II: Secondary Gas-Phase Reactions and Bio-Oil Formation*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(4), 2882-2896. doi:10.1021/acssuschemeng.6b03098
- Skoog, D. A. (2014). *Fundamentos de Química Analítica*. Ciudad de México: CENGAGE Learning.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & Swihart, M. T. (2018). *Chemical Engineering Thermodynamics*. New York: McGrawHill.
- Student Energy. (2022). *Pyrolysis*. Obtenido de Student Energy: <https://studentenergy.org/conversion/pyrolysis/>
- Tonelli, A. E., & Srinivasarao, M. (2001). *Polymers from the Inside Out*. Nueva York: Wiley-Interscience. Obtenido de <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/82-polimeros.html>
- Treybal, R. E. (1968). *Mass-Transfer Operations*. Nueva York: Advisory Board.
- Welle, F. (2005). *Post-consumer contamination in high density polyethylene (HDPE) milk bottles and the design of a bottle recycling process*. Londres: Food Addit Contam.
- Yakub, M., Abdalla, A., Feroz, K., Suzana, Y., Ibraheem, A., & Chin, S. (2015). *Pyrolysis of Oil Palm Residues in a Fixed Bed Tubular Reactor*. *Journal of Power and Energy Engineering*, 3, 185-193.

XII. ANEXOS

A. CÁLCULO DE MUESTRA

1. Establecer los parámetros con los que se van a trabajar

- Margen de error del 5.0%
- Un valor de $Z_{\alpha/2}$ con una confianza del 95%, este valor debe ser de 1.96.
- Desviación estándar poblacional estimada de 4.0%

2. Cálculo del tamaño de la muestra.

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

Se muestra el cálculo del tamaño de muestra haciendo uso de la **Ecuación 9** en la sección de ecuaciones.

3. Ejemplo del cálculo de la masa de combustible recuperado.

$$M_R = 120.9 \text{ g} - 119.8 \text{ g}$$

$$M_R = 1.1 \pm 0.1 \text{ g}$$

Este cálculo se lleva a cabo utilizando la **Ecuación 10** en la sección de ecuaciones. Este cálculo se llevó de la misma manera para las rampas de temperatura de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos.

4. Ejemplo del cálculo del rendimiento de los productos del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad.

$$\%producto = \frac{41.60}{50.00} * 100\%$$

$$\%producto = 83.20 \pm 0.26\%$$

Este cálculo se llevó de la misma manera para los combustibles líquido, sólido y gaseoso en las rampas de temperatura de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30

minutos y 10°C cada 30 minutos. Se utilizó la **Ecuación 12** en la sección de ecuaciones.

5. Cálculo de la conversión de productos de pirólisis.

$$\%producto = \frac{50.00 - 41.60}{50.00} * 100\%$$

$$\%producto = 16.80\%$$

Este cálculo se llevó de la misma manera para los combustibles líquido, sólido y gaseoso en las rampas de temperatura de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos. Se utilizó la **Ecuación 13** en la sección de ecuaciones.

B. DATOS ORIGINALES

Cuadro 8. Rendimiento y obtención de masas a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad en cada rampa de temperatura.

Gradiente de Temperatura	Masa inicial ($\pm 0.1g$)	Masa gas ($\pm 0.1g$)	Masa sólido ($\pm 0.1g$)	Masa combustible líquido ($\pm 0.1g$)
5 °C cada 30 minutos	50.0	8.3	0.7	41.0
	50.0	7.6	0.1	42.3
	50.0	8.1	0.4	41.5
8 °C cada 30 minutos	50.0	1.3	0.1	48.6
	50.0	1.2	0.0	48.8
	50.0	1.4	0.3	48.3
10 °C cada 30 minutos	50.0	4.5	0.0	45.5
	50.0	5.0	0.3	44.7
	50.0	5.2	1.2	43.6

En esta tabla se muestran los datos recolectados y medidos en la primera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 9. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa medida ($\pm 0.1g$)
09:55	0	375	119.8
10:00	5	381	119.8
10:05	10	380	119.8
10:10	15	380	119.8
10:15	20	380	119.8
10:20	25	380	119.8
10:25	30	380	119.8
10:30	35	386	119.8
10:35	40	385	119.8
10:40	45	385	119.8
10:45	50	385	119.8
10:50	55	385	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa medida ($\pm 0.1g$)
10:55	60	385	119.8
11:00	65	391	119.8
11:05	70	390	119.8
11:10	75	390	119.8
11:15	80	390	119.8
11:20	85	390	119.8
11:25	90	390	119.8
11:30	95	396	119.8
11:35	100	395	119.8
11:40	105	395	119.8
11:45	110	395	119.8
11:50	115	395	119.8
11:55	120	395	119.8
12:00	125	401	119.8
12:05	130	400	119.8
12:10	135	400	119.8
12:15	140	400	119.8
12:20	145	400	119.8
12:25	150	400	120.8
12:30	155	406	119.8
12:35	160	405	119.8
12:40	165	405	119.8
12:45	170	405	119.8
12:50	175	405	119.8
12:55	180	405	122.3
13:00	185	411	119.8
13:05	190	410	119.8
13:10	195	410	119.8
13:15	200	410	119.8
13:20	205	410	119.8
13:25	210	410	123.9
13:30	215	416	119.8
13:35	220	415	119.8
13:40	225	415	119.8
13:45	230	415	119.8
13:50	235	415	119.8
13:55	240	415	126.8
14:00	245	421	119.8
14:05	250	420	119.8
14:10	255	420	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa medida ($\pm 0.1g$)
14:15	260	420	119.8
14:20	265	420	119.8
14:25	270	420	127.5
14:30	275	426	119.8
14:35	280	425	119.8
14:40	285	425	119.8
14:45	290	425	119.8
14:50	295	425	119.8
14:55	300	425	127.1
15:00	305	431	119.8
15:05	310	430	119.8
15:10	315	430	119.8
15:15	320	430	119.8
15:20	325	430	119.8
15:25	330	430	125.2
15:30	335	436	119.8
15:35	340	435	119.8
15:40	345	435	119.8
15:45	350	435	119.8
15:50	355	435	119.8
15:55	360	435	122.9
16:00	365	441	119.8
16:05	370	440	119.8
16:10	375	440	119.8
16:15	380	440	119.8
16:20	385	440	119.8
16:25	390	440	119.8
16:30	395	446	121.9
16:35	400	445	119.8
16:40	405	445	119.8
16:45	410	445	119.8
16:50	415	445	119.8
16:55	420	445	120.6

Se muestran los datos recolectados y medidos en la primera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 10. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa medida (± 0.1g)
09:55	0	375	119.8
10:00	5	381	119.8
10:05	10	380	119.8
10:10	15	380	119.8
10:15	20	380	119.8
10:20	25	380	119.8
10:25	30	380	119.8
10:30	35	386	119.8
10:35	40	385	119.8
10:40	45	385	119.8
10:45	50	385	119.8
10:50	55	385	119.8
10:55	60	385	119.8
11:00	65	391	119.8
11:05	70	390	119.8
11:10	75	390	119.8
11:15	80	390	119.8
11:20	85	390	119.8
11:25	90	390	119.8
11:30	95	396	119.8
11:35	100	395	119.8
11:40	105	395	119.8
11:45	110	395	119.8
11:50	115	395	119.8
11:55	120	395	119.8
12:00	125	401	119.8
12:05	130	400	119.8
12:10	135	400	119.8
12:15	140	400	119.8
12:20	145	400	119.8
12:25	150	400	121.3
12:30	155	406	119.8
12:35	160	405	119.8
12:40	165	405	119.8
12:45	170	405	119.8
12:50	175	405	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa medida ($\pm 0.1g$)
12:55	180	405	122.4
13:00	185	411	119.8
13:05	190	410	119.8
13:10	195	410	119.8
13:15	200	410	119.8
13:20	205	410	119.8
13:25	210	410	124.7
13:30	215	416	119.8
13:35	220	415	119.8
13:40	225	415	119.8
13:45	230	415	119.8
13:50	235	415	119.8
13:55	240	415	126.3
14:00	245	421	119.8
14:05	250	420	119.8
14:10	255	420	119.8
14:15	260	420	119.8
14:20	265	420	119.8
14:25	270	420	127.4
14:30	275	426	119.8
14:35	280	425	119.8
14:40	285	425	119.8
14:45	290	425	119.8
14:50	295	425	119.8
14:55	300	425	127.7
15:00	305	431	119.8
15:05	310	430	119.8
15:10	315	430	119.8
15:15	320	430	119.8
15:20	325	430	119.8
15:25	330	430	125.5
15:30	335	436	119.8
15:35	340	435	119.8
15:40	345	435	119.8
15:45	350	435	119.8
15:50	355	435	119.8
15:55	360	435	123
16:00	365	441	119.8
16:05	370	440	119.8
16:10	375	440	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa medida ($\pm 0.1g$)
16:15	380	440	119.8
16:20	385	440	119.8
16:25	390	440	119.8
16:30	395	446	121.7
16:35	400	445	119.8
16:40	405	445	119.8
16:45	410	445	119.8
16:50	415	445	119.8
16:55	420	445	120.3

Se muestran los datos recolectados y medidos en la segunda corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 11. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1g$)
09:55	0	375	119.8
10:00	5	381	119.8
10:05	10	380	119.8
10:10	15	380	119.8
10:15	20	380	119.8
10:20	25	380	119.8
10:25	30	380	119.8
10:30	35	386	119.8
10:35	40	385	119.8
10:40	45	385	119.8
10:45	50	385	119.8
10:50	55	385	119.8
10:55	60	385	119.8
11:00	65	391	119.8
11:05	70	390	119.8
11:10	75	390	119.8
11:15	80	390	119.8
11:20	85	390	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
11:25	90	390	119.8
11:30	95	396	119.8
11:35	100	395	119.8
11:40	105	395	119.8
11:45	110	395	119.8
11:50	115	395	119.8
11:55	120	395	119.8
12:00	125	401	119.8
12:05	130	400	119.8
12:10	135	400	119.8
12:15	140	400	119.8
12:20	145	400	119.8
12:25	150	400	120.9
12:30	155	406	119.8
12:35	160	405	119.8
12:40	165	405	119.8
12:45	170	405	119.8
12:50	175	405	119.8
12:55	180	405	121.6
13:00	185	411	119.8
13:05	190	410	119.8
13:10	195	410	119.8
13:15	200	410	119.8
13:20	205	410	119.8
13:25	210	410	123.7
13:30	215	416	119.8
13:35	220	415	119.8
13:40	225	415	119.8
13:45	230	415	119.8
13:50	235	415	119.8
13:55	240	415	127
14:00	245	421	119.8
14:05	250	420	119.8
14:10	255	420	119.8
14:15	260	420	119.8
14:20	265	420	119.8
14:25	270	420	127.9
14:30	275	426	119.8
14:35	280	425	119.8
14:40	285	425	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
14:45	290	425	119.8
14:50	295	425	119.8
14:55	300	425	127.4
15:00	305	431	119.8
15:05	310	430	119.8
15:10	315	430	119.8
15:15	320	430	119.8
15:20	325	430	119.8
15:25	330	430	127.9
15:30	335	436	119.8
15:35	340	435	119.8
15:40	345	435	119.8
15:45	350	435	119.8
15:50	355	435	119.8
15:55	360	435	127.9
16:00	365	441	119.8
16:05	370	440	119.8
16:10	375	440	119.8
16:15	380	440	119.8
16:20	385	440	119.8
16:25	390	440	119.8
16:30	395	446	127.9
16:35	400	445	119.8
16:40	405	445	119.8
16:45	410	445	119.8
16:50	415	445	119.8
16:55	420	445	127.9

Se muestran los datos recolectados y medidos en la tercera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 12. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
10:15	0	395	96.1
10:20	5	395	96.1
10:25	10	395	96.1
10:30	15	395	96.1
10:35	20	395	96.1
10:40	25	395	96.1
10:45	30	395	96.1
10:50	35	403	96.1
10:55	40	403	96.1
11:00	45	403	96.1
11:05	50	403	96.1
11:10	55	403	96.1
11:15	60	403	96.1
11:20	65	411	96.1
11:25	70	411	96.1
11:30	75	411	96.1
11:35	80	411	96.1
11:40	85	411	96.1
11:45	90	411	98.1
11:50	95	419	96.1
11:55	100	419	96.1
12:00	105	419	96.1
12:05	110	419	96.1
12:10	115	419	96.1
12:15	120	419	108.3
12:20	125	427	96.1
12:25	130	427	96.1
12:30	135	427	96.1
12:35	140	427	96.1
12:40	145	427	96.1
12:45	150	427	109.4
12:50	155	435	96.1
12:55	160	435	96.1
13:00	165	435	96.1
13:05	170	435	96.1
13:10	175	435	96.1
13:15	180	435	108

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
13:20	185	443	96.1
13:25	190	443	96.1
13:30	195	443	96.1
13:35	200	443	96.1
13:40	205	443	96.1
13:45	210	443	103.1
13:50	215	451	96.1
13:55	220	451	96.1
14:00	225	451	96.1
14:05	230	451	96.1
14:10	235	451	96.1
14:15	240	451	98.3

Se muestran los datos recolectados y medidos en la primera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 13. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
10:15	0	395	96.1
10:20	5	395	96.1
10:25	10	395	96.1
10:30	15	395	96.1
10:35	20	395	96.1
10:40	25	395	96.1
10:45	30	395	96.1
10:50	35	403	96.1
10:55	40	403	96.1
11:00	45	403	96.1
11:05	50	403	96.1
11:10	55	403	96.1
11:15	60	403	96.1
11:20	65	411	96.1

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa medida (± 0.1g)
11:25	70	411	96.1
11:30	75	411	96.1
11:35	80	411	96.1
11:40	85	411	96.1
11:45	90	411	98.1
11:50	95	419	96.1
11:55	100	419	96.1
12:00	105	419	96.1
12:05	110	419	96.1
12:10	115	419	96.1
12:15	120	419	108.3
12:20	125	427	96.1
12:25	130	427	96.1
12:30	135	427	96.1
12:35	140	427	96.1
12:40	145	427	96.1
12:45	150	427	109.4
12:50	155	435	96.1
12:55	160	435	96.1
13:00	165	435	96.1
13:05	170	435	96.1
13:10	175	435	96.1
13:15	180	435	108.0
13:20	185	443	96.1
13:25	190	443	96.1
13:30	195	443	96.1
13:35	200	443	96.1
13:40	205	443	96.1
13:45	210	443	103.1
13:50	215	451	96.1
13:55	220	451	96.1
14:00	225	451	96.1
14:05	230	451	96.1
14:10	235	451	96.1
14:15	240	451	98.3

Se muestran los datos recolectados y medidos en la segunda corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como

mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 14. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
09:45	0	395	96.1
09:50	5	395	96.1
09:55	10	395	96.1
10:00	15	395	96.1
10:05	20	395	96.1
10:10	25	395	96.1
10:15	30	395	96.1
10:20	35	403	96.1
10:25	40	403	96.1
10:30	45	403	96.1
10:35	50	403	96.1
10:40	55	403	96.1
10:45	60	403	96.1
10:50	65	411	96.1
10:55	70	411	96.1
11:00	75	411	96.1
11:05	80	411	96.1
11:10	85	411	96.1
11:15	90	411	98.1
11:20	95	419	96.1
11:25	100	419	96.1
11:30	105	419	96.1
11:35	110	419	96.1
11:40	115	419	96.1
11:45	120	419	108.3
11:50	125	427	96.1
11:55	130	427	96.1
12:00	135	427	96.1
12:05	140	427	96.1
12:10	145	427	96.1
12:15	150	427	109.4
12:20	155	435	96.1
12:25	160	435	96.1

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
12:30	165	435	96.1
12:35	170	435	96.1
12:40	175	435	96.1
12:45	180	435	108.0
12:50	185	443	96.1
12:55	190	443	96.1
13:00	195	443	96.1
13:05	200	443	96.1
13:10	205	443	96.1
13:15	210	443	103.1
13:20	215	451	96.1
13:25	220	451	96.1
13:30	225	451	96.1
13:35	230	451	96.1
13:40	235	451	96.1
13:45	240	451	98.3

Se muestran los datos recolectados y medidos en la tercera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 15. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
09:55	0	375	119.8
10:00	5	381	119.8
10:05	10	380	119.8
10:10	15	380	119.8
10:15	20	380	119.8
10:20	25	380	119.8
10:25	30	380	119.8
10:30	35	386	119.8
10:35	40	385	119.8
10:40	45	385	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
10:45	50	385	119.8
10:50	55	385	119.8
10:55	60	385	119.8
11:00	65	391	119.8
11:05	70	390	119.8
11:10	75	390	119.8
11:15	80	390	119.8
11:20	85	390	119.8
11:25	90	390	119.8
11:30	95	396	119.8
11:35	100	395	119.8
11:40	105	395	119.8
11:45	110	395	119.8
11:50	115	395	119.8
11:55	120	395	119.8
12:00	125	401	119.8
12:05	130	400	119.8
12:10	135	400	119.8
12:15	140	400	119.8
12:20	145	400	119.8
12:25	150	400	120.8
12:30	155	406	119.8
12:35	160	405	119.8
12:40	165	405	119.8
12:45	170	405	119.8
12:50	175	405	119.8
12:55	180	405	122.3
13:00	185	411	119.8
13:05	190	410	119.8
13:10	195	410	119.8
13:15	200	410	119.8
13:20	205	410	119.8
13:25	210	410	123.9
13:30	215	416	119.8
13:35	220	415	119.8
13:40	225	415	119.8
13:45	230	415	119.8
13:50	235	415	119.8
13:55	240	415	126.8
14:00	245	421	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
14:05	250	420	119.8
14:10	255	420	119.8
14:15	260	420	119.8
14:20	265	420	119.8
14:25	270	420	127.5
14:30	275	426	119.8
14:35	280	425	119.8
14:40	285	425	119.8
14:45	290	425	119.8
14:50	295	425	119.8
14:55	300	425	127.1
15:00	305	431	119.8
15:05	310	430	119.8
15:10	315	430	119.8
15:15	320	430	119.8
15:20	325	430	119.8
15:25	330	430	125.2
15:30	335	436	119.8
15:35	340	435	119.8
15:40	345	435	119.8
15:45	350	435	119.8
15:50	355	435	119.8
15:55	360	435	122.9
16:00	365	441	119.8
16:05	370	440	119.8
16:10	375	440	119.8
16:15	380	440	119.8
16:20	385	440	119.8
16:25	390	440	119.8
16:30	395	446	121.9
16:35	400	445	119.8
16:40	405	445	119.8
16:45	410	445	119.8
16:50	415	445	119.8
16:55	420	445	120.6

Se muestran los datos recolectados y medidos en la primera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como

mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 16. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
09:45	0	375	119.8
09:50	5	381	119.8
09:55	10	380	119.8
10:00	15	380	119.8
10:05	20	380	119.8
10:10	25	380	119.8
10:15	30	380	119.8
10:20	35	386	119.8
10:25	40	385	119.8
10:30	45	385	119.8
10:35	50	385	119.8
10:40	55	385	119.8
10:45	60	385	119.8
10:50	65	391	119.8
10:55	70	390	119.8
11:00	75	390	119.8
11:05	80	390	119.8
11:10	85	390	119.8
11:15	90	390	119.8
11:20	95	396	119.8
11:25	100	395	119.8
11:30	105	395	119.8
11:35	110	395	119.8
11:40	115	395	119.8
11:45	120	395	119.8
11:50	125	401	119.8
11:55	130	400	119.8
12:00	135	400	119.8
12:05	140	400	119.8
12:10	145	400	119.8
12:15	150	400	121.3
12:20	155	406	119.8
12:25	160	405	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
12:30	165	405	119.8
12:35	170	405	119.8
12:40	175	405	119.8
12:45	180	405	122.4
12:50	185	411	119.8
12:55	190	410	119.8
13:00	195	410	119.8
13:05	200	410	119.8
13:10	205	410	119.8
13:15	210	410	124.7
13:20	215	416	119.8
13:25	220	415	119.8
13:30	225	415	119.8
13:35	230	415	119.8
13:40	235	415	119.8
13:45	240	415	126.3
13:50	245	421	119.8
13:55	250	420	119.8
14:00	255	420	119.8
14:05	260	420	119.8
14:10	265	420	119.8
14:15	270	420	127.4
14:20	275	426	119.8
14:25	280	425	119.8
14:30	285	425	119.8
14:35	290	425	119.8
14:40	295	425	119.8
14:45	300	425	127.7
14:50	305	431	119.8
14:55	310	430	119.8
15:00	315	430	119.8
15:05	320	430	119.8
15:10	325	430	119.8
15:15	330	430	125.5
15:20	335	436	119.8
15:25	340	435	119.8
15:30	345	435	119.8
15:35	350	435	119.8
15:40	355	435	119.8
15:45	360	435	123

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
15:50	365	441	119.8
15:55	370	440	119.8
16:00	375	440	119.8
16:05	380	440	119.8
16:10	385	440	119.8
16:15	390	440	119.8
16:20	395	446	121.7
16:25	400	445	119.8
16:30	405	445	119.8
16:35	410	445	119.8
16:40	415	445	119.8
16:45	420	445	120.3

Se muestran los datos recolectados y medidos en la segunda corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Cuadro 17. Datos originales pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
09:35	0	375	119.8
09:40	5	381	119.8
09:45	10	380	119.8
09:50	15	380	119.8
09:55	20	380	119.8
10:00	25	380	119.8
10:05	30	380	119.8
10:10	35	386	119.8
10:15	40	385	119.8
10:20	45	385	119.8
10:25	50	385	119.8
10:30	55	385	119.8
10:35	60	385	119.8
10:40	65	391	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
10:45	70	390	119.8
10:50	75	390	119.8
10:55	80	390	119.8
11:00	85	390	119.8
11:05	90	390	119.8
11:10	95	396	119.8
11:15	100	395	119.8
11:20	105	395	119.8
11:25	110	395	119.8
11:30	115	395	119.8
11:35	120	395	119.8
11:40	125	401	119.8
11:45	130	400	119.8
11:50	135	400	119.8
11:55	140	400	119.8
12:00	145	400	119.8
12:05	150	400	120.9
12:10	155	406	119.8
12:15	160	405	119.8
12:20	165	405	119.8
12:25	170	405	119.8
12:30	175	405	119.8
12:35	180	405	121.6
12:40	185	411	119.8
12:45	190	410	119.8
12:50	195	410	119.8
12:55	200	410	119.8
13:00	205	410	119.8
13:05	210	410	123.7
13:10	215	416	119.8
13:15	220	415	119.8
13:20	225	415	119.8
13:25	230	415	119.8
13:30	235	415	119.8
13:35	240	415	127
13:40	245	421	119.8
13:45	250	420	119.8
13:50	255	420	119.8
13:55	260	420	119.8
14:00	265	420	119.8

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)
14:05	270	420	127.9
14:10	275	426	119.8
14:15	280	425	119.8
14:20	285	425	119.8
14:25	290	425	119.8
14:30	295	425	119.8
14:35	300	425	127.4
14:40	305	431	119.8
14:45	310	430	119.8
14:50	315	430	119.8
14:55	320	430	119.8
15:00	325	430	119.8
15:05	330	430	127.9
15:10	335	436	119.8
15:15	340	435	119.8
15:20	345	435	119.8
15:25	350	435	119.8
15:30	355	435	119.8
15:35	360	435	127.9
15:40	365	441	119.8
15:45	370	440	119.8
15:50	375	440	119.8
15:55	380	440	119.8
16:00	385	440	119.8
16:05	390	440	119.8
16:10	395	446	127.9
16:15	400	445	119.8
16:20	405	445	119.8
16:25	410	445	119.8
16:30	415	445	119.8
16:35	420	445	127.9

Se muestran los datos recolectados y medidos en la tercera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada 30 minutos. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

C. ECUACIONES

Ecuación 9. Tamaño de Muestra

$$n = \frac{\left(Z \frac{\alpha}{2}\right)^2 * \sigma^2}{E^2}$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$ = Valor z con un 95% confianza (1.96)

E = Margen de error

σ = Desviación estándar poblacional estimada

n = Tamaño de muestra

Ecuación 10. Recuperado de masa combustible líquido.

$$M_R = M_P - M_B$$

Donde:

M_R = masa de combustible líquido recuperado.

M_P = masa de combustible pesada en beaker

M_B = masa del beaker utilizado

Ecuación 11. Balance de masa del proceso de pirólisis

$$m_{alimentación} = m_{char} + m_{líquido} + m_{gas}$$

Donde:

$m_{alimentación}$ = masa alimentada al reactor

m_{char} = masa de producto sólido

$m_{líquido}$ = masa de producto líquido

m_{gas} = masa del producto gaseoso

Ecuación 12. Rendimiento de los productos de pirólisis

$$\%producto = \frac{m_{producto}}{m_{alimentación}} * 100\%$$

Donde:

$m_{alimentación}$ = masa alimentada al reactor

$m_{producto}$ = masa de producto (sólido, líquido o gas).

Ecuación 13. Conversión de los productos de pirólisis

$$\%producto = \frac{m_{alimentación} - m_{líquido}}{m_{alimentación}} * 100\%$$

Donde:

$m_{alimentación}$ = masa alimentada al reactor

$m_{producto}$ = masa de producto líquido

Ecuación 14. Ecuación de Boltzmann de temperatura en función del tiempo para hornos mufla.

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{te-t}{m}}}$$

Donde:

T = Temperatura del sistema

T_1 = Temperatura en el momento 1

T_2 = Temperatura en el momento 2

te = Constante

m = Constante

Ecuación 15. Ecuación de constante de descomposición de Arrhenius y de velocidad de reacción de pirólisis.

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$
$$r_w = k(W - W_f)^n$$

Donde:

k = Constante de degradación de Arrhenius

W = Masa instantánea dentro del reactor

W_f = Masa final de producto sólido dentro del reactor

n = Orden de reacción

r_w = Velocidad de cambio de masa del reactor en función del tiempo (velocidad del proceso de pirólisis)

A = Constante de frecuencia

E_a = Energía de activación

T = Temperatura obtenida de la ecuación modificada de Boltzmann para muflas mencionada anteriormente

R = constante de los gases ideales (8.314 kJ/kmol*K)

Ecuación 16. Modelo de temperatura para el el gradiente de 5°C cada 30 minutos

$$T = T_1 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}$$

Donde:

$$R1 = \frac{(T_2-T_1)e^{\frac{ta-t}{a}}}{a\left(1+e^{\frac{ta-t}{a}}\right)} \quad R2 = \frac{(T_3-T_2)e^{\frac{tb-t}{b}}}{b\left(1+e^{\frac{tb-t}{b}}\right)} \quad R3 = \frac{(T_4-T_3)e^{\frac{tc-t}{c}}}{c\left(1+e^{\frac{tc-t}{c}}\right)} \quad R4 = \frac{(T_5-T_4)e^{\frac{td-t}{d}}}{d\left(1+e^{\frac{td-t}{d}}\right)}$$

$$R5 = \frac{(T_6-T_5)e^{\frac{te-t}{e}}}{e\left(1+e^{\frac{te-t}{e}}\right)} \quad R6 = \frac{(T_7-T_6)e^{\frac{tf-t}{f}}}{f\left(1+e^{\frac{tf-t}{f}}\right)} \quad R7 = \frac{(T_8-T_7)e^{\frac{tg-t}{g}}}{g\left(1+e^{\frac{tg-t}{g}}\right)} \quad R8 = \frac{(T_9-T_8)e^{\frac{th-t}{h}}}{h\left(1+e^{\frac{th-t}{h}}\right)}$$

$$R9 = \frac{(T_{10}-T_9)e^{\frac{ti-t}{i}}}{i\left(1+e^{\frac{ti-t}{i}}\right)} \quad R10 = \frac{(T_{11}-T_{10})e^{\frac{tj-t}{j}}}{j\left(1+e^{\frac{tj-t}{j}}\right)} \quad R11 = \frac{(T_{12}-T_{11})e^{\frac{tk-t}{k}}}{k\left(1+e^{\frac{tk-t}{k}}\right)}$$

$$R12 = \frac{(T_{13}-T_{12})e^{\frac{tl-t}{l}}}{l\left(1+e^{\frac{tl-t}{l}}\right)} \quad R13 = \frac{(T_{14}-T_{13})e^{\frac{tm-t}{m}}}{m\left(1+e^{\frac{tm-t}{m}}\right)} \quad R14 = \frac{(T_{15}-T_{14})e^{\frac{tn-t}{n}}}{n\left(1+e^{\frac{tn-t}{n}}\right)}$$

Cuadro 18. Constantes del modelo de tempearatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad 5°C cada media 30 minutos.

Constante	Valor
X	6.7779 × 10 ²⁰
E _a	189007.99871
R	8.314
W _f	1.2
Z	1.52944

Constante	Valor
a	0.78
b	1.30
c	0.81
d	1.47
e	1.15
f	0.94
g	1.02
h	1.51
i	0.83
j	0.69
k	0.60
l	0.87
m	0.74
n	0.41
ta	0.41
tb	30.73
tc	60.44
td	90.8
te	120.62
tf	150.52
tg	180.53
th	210.81
ti	240.45
tj	270.37
tk	300.33
tl	330.47
tm	360.47

Ecuación 17. Modelo de temperatura para el el gradiente de 8°C cada 30 minutos

$$T = T_1 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8$$

Donde:

$$R1 = \frac{(T_2-T_1)e^{\frac{ta-t}{a}}}{a\left(1+e^{\frac{ta-t}{a}}\right)} \quad R2 = \frac{(T_3-T_2)e^{\frac{tb-t}{b}}}{b\left(1+e^{\frac{tb-t}{b}}\right)} \quad R3 = \frac{(T_4-T_3)e^{\frac{tc-t}{c}}}{c\left(1+e^{\frac{tc-t}{c}}\right)} \quad R4 = \frac{(T_5-T_4)e^{\frac{td-t}{d}}}{d\left(1+e^{\frac{td-t}{d}}\right)}$$

$$R5 = \frac{(T_6-T_5)e^{\frac{te-t}{e}}}{e\left(1+e^{\frac{te-t}{e}}\right)} \quad R6 = \frac{(T_7-T_6)e^{\frac{tf-t}{f}}}{f\left(1+e^{\frac{tf-t}{f}}\right)} \quad R7 = \frac{(T_8-T_7)e^{\frac{tg-t}{g}}}{g\left(1+e^{\frac{tg-t}{g}}\right)} \quad R8 = \frac{(T_9-T_8)e^{\frac{th-t}{h}}}{h\left(1+e^{\frac{th-t}{h}}\right)}$$

Cuadro 19. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 8°C cada media 30 minutos

Constante	Valor
X	1.1531×10^{25}
Ea	234033.41612
R	8.314
W_f	0.3
z	2.15304
a	1.23
b	1.30
c	0.81
d	1.47
e	1.15
f	0.94
g	1.63
h	0.6
ta	0.65
tb	30.71
tc	60.44
td	90.80
te	120.62
tf	150.52
tg	180.87
th	210.32

Ecuación 18. Modelo de temperatura para el el gradiente de 10°C cada 30 minutos

$$T = T_1 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8$$

Donde:

$$R1 = \frac{(T_2 - T_1)e^{\frac{ta-t}{a}}}{a\left(1 + e^{\frac{ta-t}{a}}\right)} \quad R2 = \frac{(T_3 - T_2)e^{\frac{tb-t}{b}}}{b\left(1 + e^{\frac{tb-t}{b}}\right)} \quad R3 = \frac{(T_4 - T_3)e^{\frac{tc-t}{c}}}{c\left(1 + e^{\frac{tc-t}{c}}\right)} \quad R4 = \frac{(T_5 - T_4)e^{\frac{td-t}{d}}}{d\left(1 + e^{\frac{td-t}{d}}\right)}$$

$$R5 = \frac{(T_6 - T_5)e^{\frac{te-t}{e}}}{e\left(1 + e^{\frac{te-t}{e}}\right)} \quad R6 = \frac{(T_7 - T_6)e^{\frac{tf-t}{f}}}{f\left(1 + e^{\frac{tf-t}{f}}\right)} \quad R7 = \frac{(T_8 - T_7)e^{\frac{tg-t}{g}}}{g\left(1 + e^{\frac{tg-t}{g}}\right)} \quad R8 = \frac{(T_9 - T_8)e^{\frac{th-t}{h}}}{h\left(1 + e^{\frac{th-t}{h}}\right)}$$

Cuadro 20. Constantes del modelo de temperatura y descomposición energética del polietileno de alta densidad a una rampa de 10°C cada media 30 minutos

Constante	Valor
X	1.672×10^{25}
Ea	230544.17109
R	8.314
W _f	0.8
z	1.80899
a	1.23
b	1.30
c	1.39
d	1.47
e	1.15
f	0.94
g	1.63
h	0.6
ta	0.65
tb	30.71
tc	60.76
td	90.80
te	120.62
tf	150.52
tg	180.87
th	210.32

D. IMAGENÉS DE EXPERIMENTACIÓN

Figura 21. Imagen del sistema utilizado para llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad.



Se muestra la imagen del sistema utilizado para llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a las diferentes rampas de temperatura.

Figura 22. Imagen del compuesto ceroso obtenido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad a un ritmo de 15°C cada media 30 minutos.



Se muestra la imagen del sistema de condensado del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad, durante la recuperación del compuesto ceroso

Figura 23. Imagen del sistema recibiendo combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de 5°C cada media 30 minutos.



Se muestra la imagen del sistema de condensado del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad, durante la recuperación de combustible líquido, de manera que se logre facilitar la comprensión del sistema.

Figura 24. Imagen de los combustibles líquidos obtenidos a diferentes rampas de temperatura.



Se muestra la imagen de los combustibles obtenidos a partir de las diferentes rampas de temperatura, de manera que se pueda evidenciar el trabajo realizado y adem[as se denoten características físicas de los mismos.

E. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

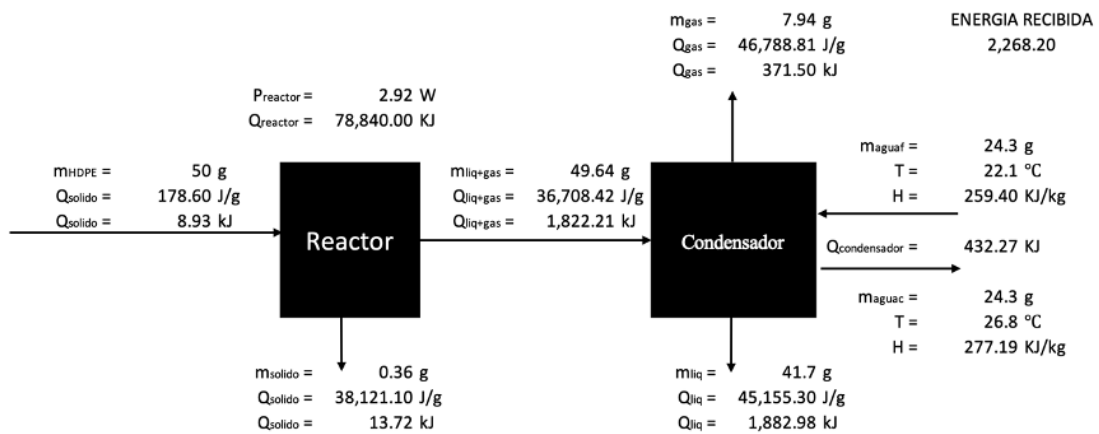
Para calcular el balance de masa del proceso de pirólisis se llevó a cabo de la siguiente forma.

$$m_{\text{alimentación}} = 0.36g + 41.70g + 7.94g$$

$$m_{\text{alimentación}} = 50.00 \pm 0.10 g$$

Este cálculo se lleva a cabo haciendo uso de la **Ecuación 11** en la sección de ecuaciones.

Figura 25. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.



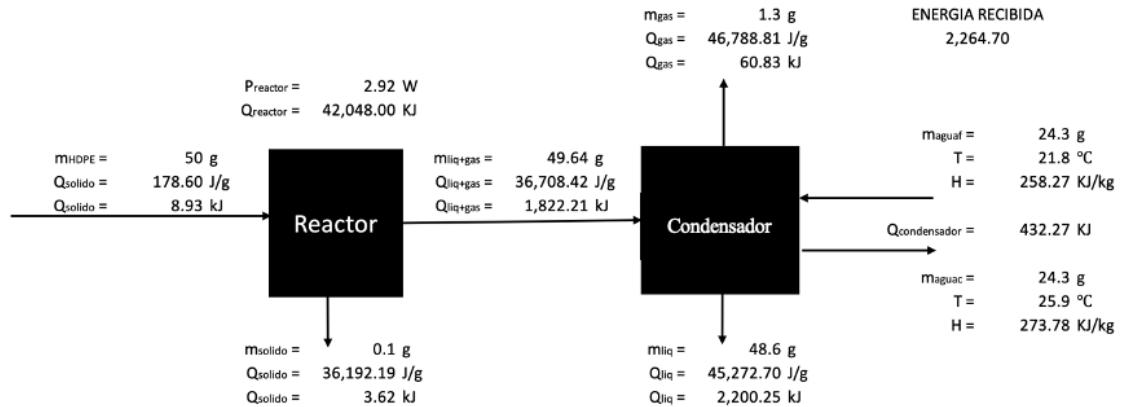
Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales y se tiene tabulados en el **Cuadro 21**.

Cuadro 21. Balance de masa del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.

Corrida	Masa inicial (g) ($\pm 0.1g$)	Masa producto gaseoso (g) ($\pm 0.1g$)	Masa producto líquido (g) ($\pm 0.1g$)	Masa producto sólido (g) ($\pm 0.1g$)
1	50.0	8.3	0.7	41.0
2	50.0	7.6	0.1	42.3
3	50.0	8.1	0.4	41.5

Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales.

Figura 26. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.



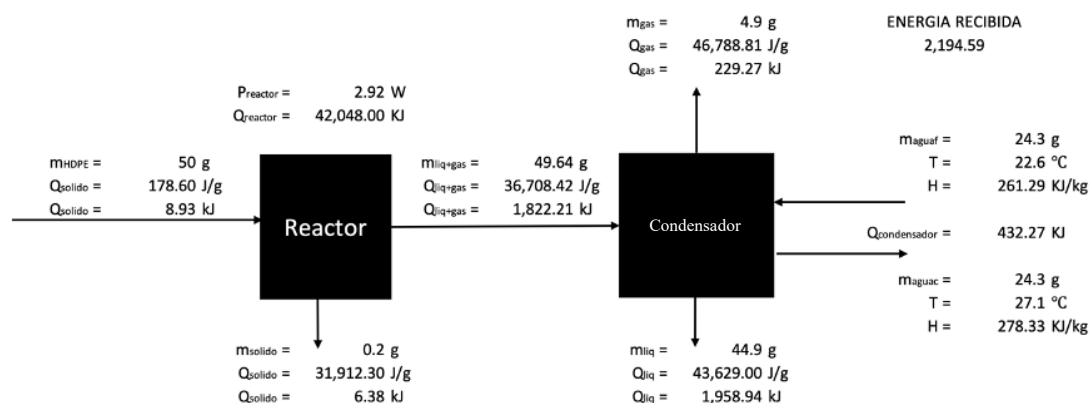
Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales y se tiene tabulados en el **Cuadro 22**.

Cuadro 22. Balance de masa del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.

Corrida	Masa inicial (g) ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa producto gaseoso (g) ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa producto líquido (g) ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa producto sólido (g) ($\pm 0.1\text{g}$)
1	50.0	1.3	0.1	48.6
2	50.0	1.2	0.0	48.8
3	50.0	1.4	0.3	48.3

Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales.

Figura 27. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.



Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales y se tiene tabulados en el **Cuadro 23**.

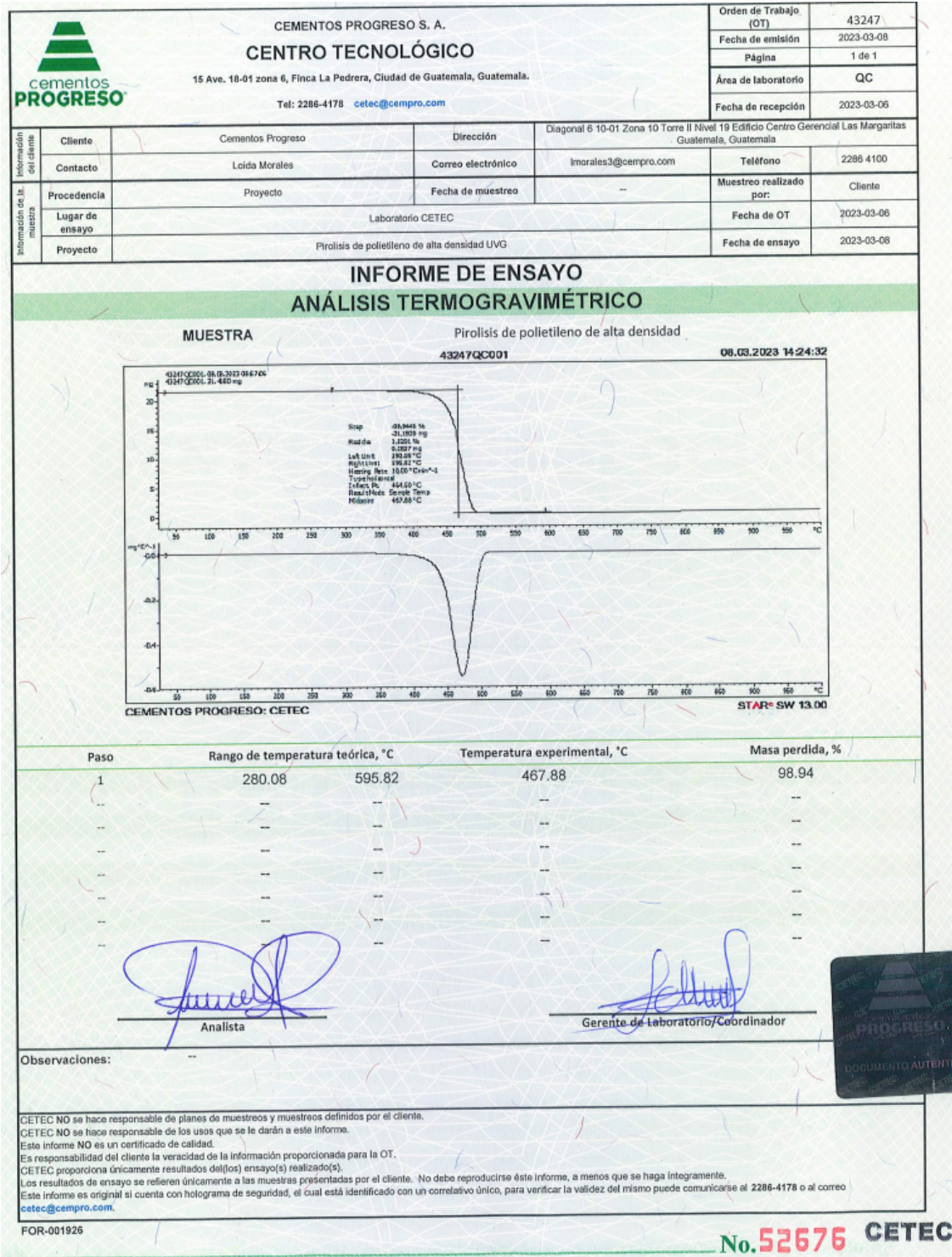
Cuadro 23. Balance de masa y energía del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.

Corrida	Masa inicial (g) ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa producto gaseoso (g) ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa producto líquido (g) ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa producto sólido (g) ($\pm 0.1\text{g}$)
1	50.0	4.5	0.0	45.5
2	50.0	5.0	0.3	44.7
3	50.0	5.2	1.2	43.6

Se muestra el balance de masa realizado. Los datos utilizados se encuentran en el **Cuadro 10** de la sección de datos originales.

F. CUADROS DE DATOS CALCULADOS

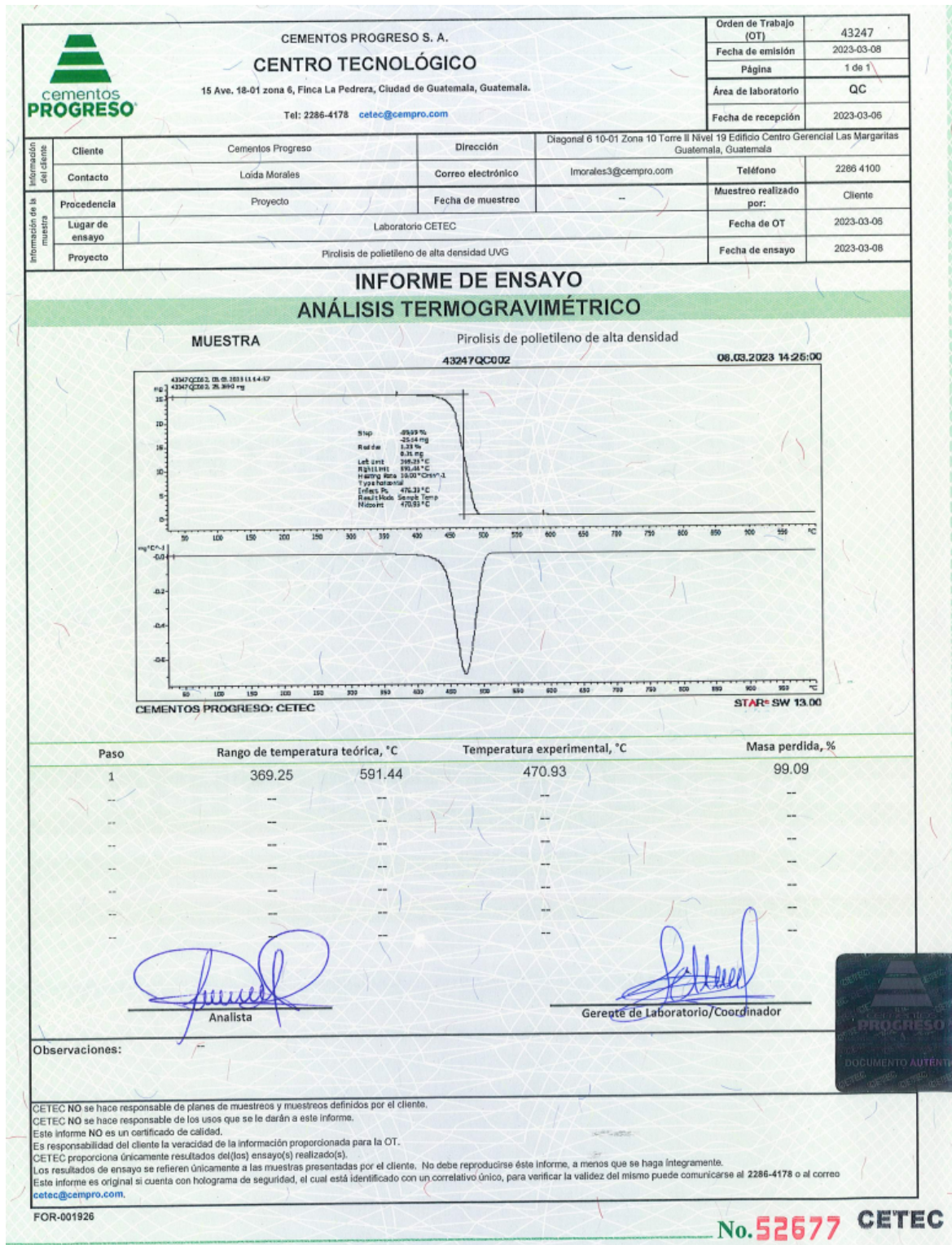
Figura 28. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) muestra 1, realizado con el apoyo de Cementos Progreso.



(Fuente CETEC).

Se muestra el análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

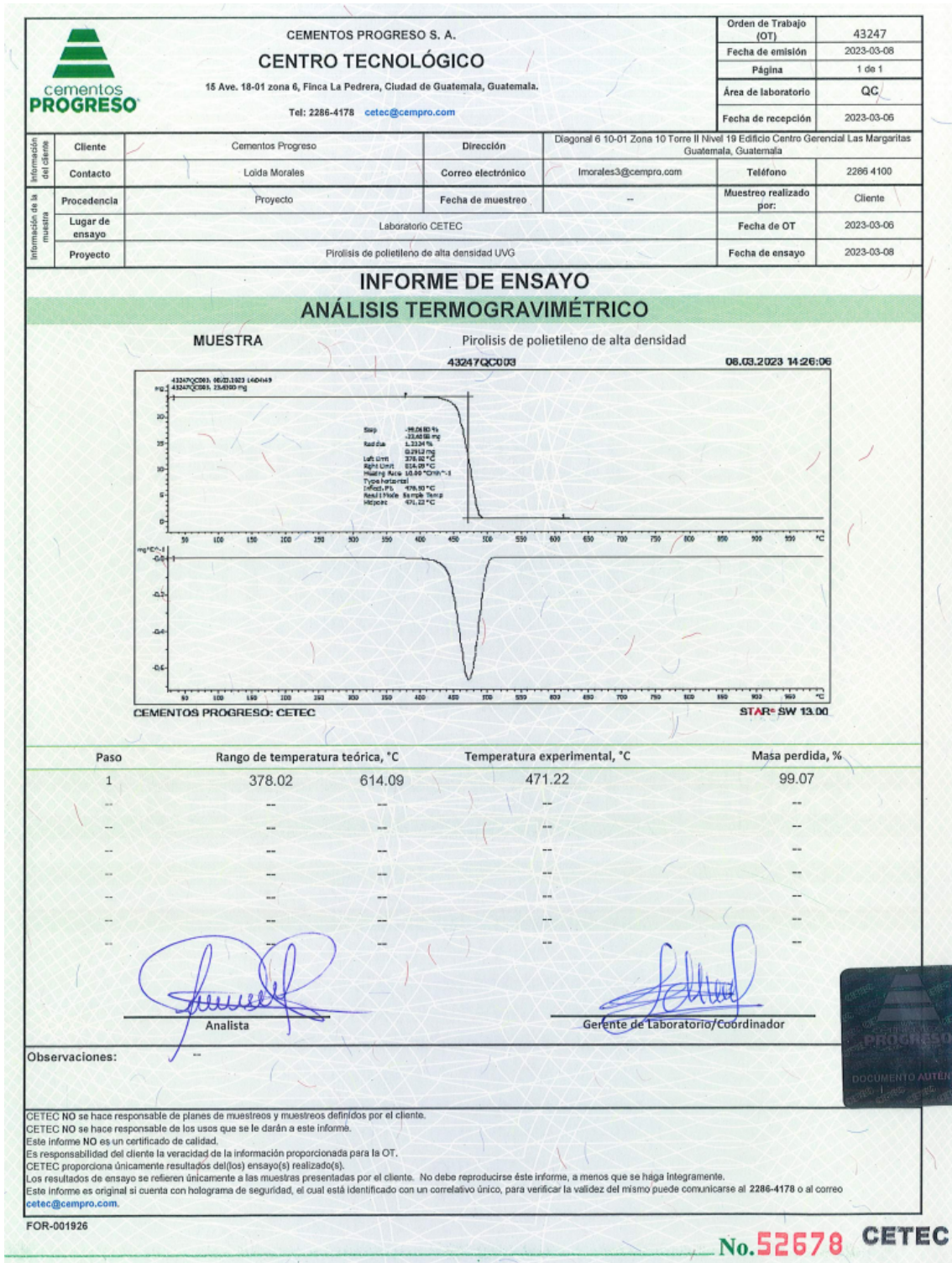
Figura 29. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) muestra 2, realizado con el apoyo de Cementos Progreso.



(Fuente CETEC).

Se muestra el análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 30. Análisis termogravimétrico de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) muestra 3, realizado con el apoyo de Cementos Progreso.



(Fuente CETEC).

Se muestra el análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 24. Análisis estadístico del rendimiento de producto de pirólisis en el reactor de 50 g a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos.

Producto	Media (%)	Desviación Estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	0.80 ± 0.12	0.03	[0.77 – 0.83]	3.75%
Líquido	83.20 ± 0.26	1.94	[81.13 – 85.27]	2.33%
Gas	16.00 ± 0.24	1.05	[14.88 – 17.12]	6.26%

Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 50 g. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 4 grados de libertad de 2.1318.

Cuadro 25. Análisis estadístico del rendimiento de producto de pirólisis en el reactor de 50 g a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos.

Producto	Media (%)	Desviación Estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	0.27 ± 0.19	0.02	[0.25 – 0.29]	7.50%
Líquido	94.93 ± 0.28	1.87	[92.94 – 96.92]	1.97%
Gas	2.60 ± 0.21	0.12	[2.47 – 2.72]	4.62%

Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 50 g. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 4 grados de libertad de 2.1318.

Cuadro 26. Análisis estadístico del rendimiento de producto de pirólisis en el reactor de 50 g a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos.

Producto	Media (%)	Desviación Estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	1.00 ± 0.13	0.07	[0.93 – 1.07]	7.00%
Líquido	89.13 ± 0.27	1.68	[88.01 – 91.59]	1.88%
Gas	9.80 ± 0.32	0.45	[9.32 – 10.28]	4.59%

Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 50 g. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 4 grados de libertad de 2.1318

Cuadro 27. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.

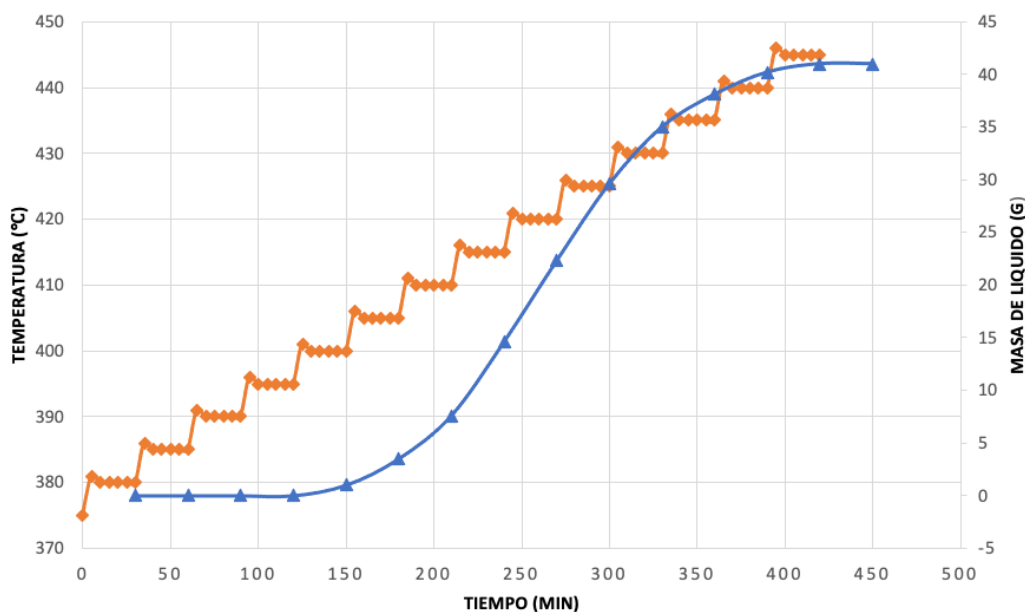
Hora	Tiempo (min)	Temperatura (±1°C)	Masa medida (± 0.1g)	Masa de combustible líquido recuperado (±0.1g)
09:55	0	375	119.8	0
10:00	5	381	119.8	0
10:05	10	380	119.8	0
10:10	15	380	119.8	0
10:15	20	380	119.8	0
10:20	25	380	119.8	0
10:25	30	380	119.8	0
10:30	35	386	119.8	0
10:35	40	385	119.8	0
10:40	45	385	119.8	0
10:45	50	385	119.8	0
10:50	55	385	119.8	0
10:55	60	385	119.8	0
11:00	65	391	119.8	0
11:05	70	390	119.8	0
11:10	75	390	119.8	0
11:15	80	390	119.8	0
11:20	85	390	119.8	0
11:25	90	390	119.8	0
11:30	95	396	119.8	0
11:35	100	395	119.8	0
11:40	105	395	119.8	0
11:45	110	395	119.8	0
11:50	115	395	119.8	0
11:55	120	395	119.8	0
12:00	125	401	119.8	0
12:05	130	400	119.8	0
12:10	135	400	119.8	0
12:15	140	400	119.8	0
12:20	145	400	119.8	0
12:25	150	400	120.8	1
12:30	155	406	119.8	0
12:35	160	405	119.8	0
12:40	165	405	119.8	0
12:45	170	405	119.8	0
12:50	175	405	119.8	0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
12:55	180	405	122.3	2.5
13:00	185	411	119.8	0
13:05	190	410	119.8	0
13:10	195	410	119.8	0
13:15	200	410	119.8	0
13:20	205	410	119.8	0
13:25	210	410	123.9	4.1
13:30	215	416	119.8	0
13:35	220	415	119.8	0
13:40	225	415	119.8	0
13:45	230	415	119.8	0
13:50	235	415	119.8	0
13:55	240	415	126.8	7
14:00	245	421	119.8	0
14:05	250	420	119.8	0
14:10	255	420	119.8	0
14:15	260	420	119.8	0
14:20	265	420	119.8	0
14:25	270	420	127.5	7.7
14:30	275	426	119.8	0
14:35	280	425	119.8	0
14:40	285	425	119.8	0
14:45	290	425	119.8	0
14:50	295	425	119.8	0
14:55	300	425	127.1	7.3
15:00	305	431	119.8	0
15:05	310	430	119.8	0
15:10	315	430	119.8	0
15:15	320	430	119.8	0
15:20	325	430	119.8	0
15:25	330	430	125.2	5.4
15:30	335	436	119.8	0
15:35	340	435	119.8	0
15:40	345	435	119.8	0
15:45	350	435	119.8	0
15:50	355	435	119.8	0
15:55	360	435	122.9	3.1
16:00	365	441	119.8	0
16:05	370	440	119.8	0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
16:10	375	440	119.8	0
16:15	380	440	119.8	0
16:20	385	440	119.8	0
16:25	390	440	119.8	0
16:30	395	446	121.9	2.1
16:35	400	445	119.8	0
16:40	405	445	119.8	0
16:45	410	445	119.8	0
16:50	415	445	119.8	0
16:55	420	445	120.6	0.8

Se muestran los datos recolectados y medidos en la primera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 31. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la primera corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada media hora en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

Cuadro 28. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.

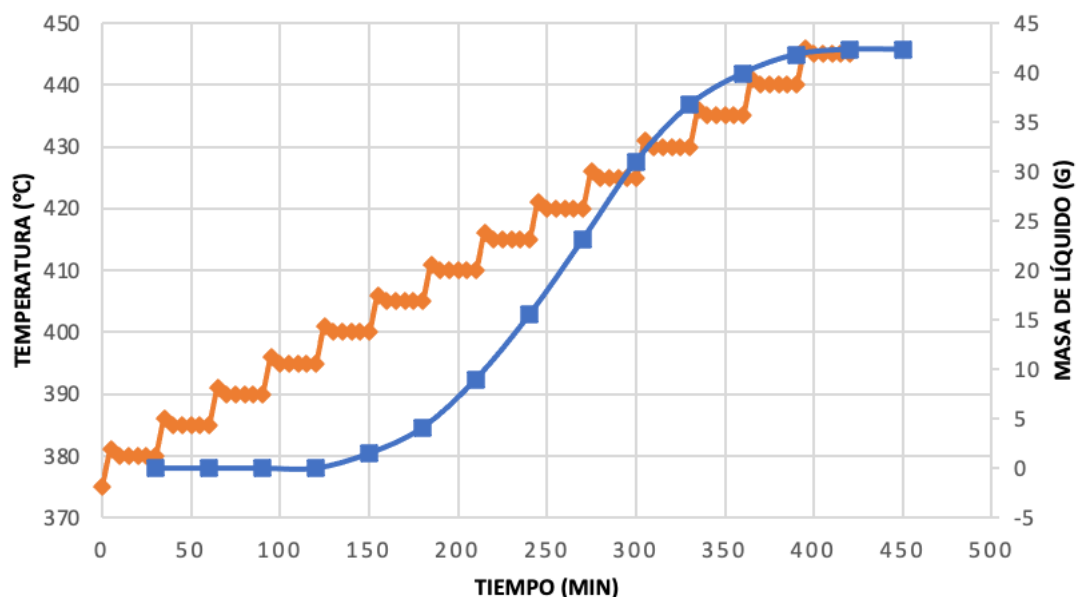
Hora	Tiempo (min)	Temperatura (±1°C)	Masa medida (± 0.1g)	Masa de combustible líquido recuperado (±0.1g)
09:55	0	375	119.8	0
10:00	5	381	119.8	0
10:05	10	380	119.8	0
10:10	15	380	119.8	0
10:15	20	380	119.8	0
10:25	30	380	119.8	0
10:30	35	386	119.8	0
10:35	40	385	119.8	0
10:40	45	385	119.8	0
10:45	50	385	119.8	0
10:50	55	385	119.8	0
10:55	60	385	119.8	0
11:00	65	391	119.8	0
11:05	70	390	119.8	0
11:10	75	390	119.8	0
11:15	80	390	119.8	0
11:20	85	390	119.8	0
11:25	90	390	119.8	0
11:30	95	396	119.8	0
11:35	100	395	119.8	0
11:40	105	395	119.8	0
11:45	110	395	119.8	0
11:50	115	395	119.8	0
11:55	120	395	119.8	0
12:00	125	401	119.8	0
12:05	130	400	119.8	0
12:10	135	400	119.8	0
12:15	140	400	119.8	0
12:20	145	400	119.8	0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
12:25	150	400	121.3	1.5
12:30	155	406	119.8	0
12:35	160	405	119.8	0
12:40	165	405	119.8	0
12:45	170	405	119.8	0
12:50	175	405	119.8	0
12:55	180	405	122.4	2.6
13:00	185	411	119.8	0
13:05	190	410	119.8	0
13:10	195	410	119.8	0
13:15	200	410	119.8	0
13:20	205	410	119.8	0
13:25	210	410	124.7	4.9
13:30	215	416	119.8	0
13:35	220	415	119.8	0
13:40	225	415	119.8	0
13:45	230	415	119.8	0
13:50	235	415	119.8	0
13:55	240	415	126.3	6.5
14:00	245	421	119.8	0
14:05	250	420	119.8	0
14:10	255	420	119.8	0
14:15	260	420	119.8	0
14:20	265	420	119.8	0
14:25	270	420	127.4	7.6
14:30	275	426	119.8	0
14:35	280	425	119.8	0
14:40	285	425	119.8	0
14:45	290	425	119.8	0
14:50	295	425	119.8	0
14:55	300	425	127.7	7.9
15:00	305	431	119.8	0
15:05	310	430	119.8	0
15:10	315	430	119.8	0
15:15	320	430	119.8	0
15:20	325	430	119.8	0
15:25	330	430	125.5	5.7
15:30	335	436	119.8	0
15:35	340	435	119.8	0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
15:40	345	435	119.8	0
15:45	350	435	119.8	0
15:50	355	435	119.8	0
15:55	360	435	123	3.2
16:00	365	441	119.8	0
16:05	370	440	119.8	0
16:10	375	440	119.8	0
16:15	380	440	119.8	0
16:20	385	440	119.8	0
16:25	390	440	119.8	0
16:30	395	446	121.7	1.9
16:35	400	445	119.8	0
16:40	405	445	119.8	0
16:45	410	445	119.8	0
16:50	415	445	119.8	0
16:55	420	445	120.3	0.5

Se muestran los datos recolectados y medidos en la segunda corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 32. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la segunda corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

Cuadro 29. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
09:55	0	375	119.8	0
10:00	5	381	119.8	0
10:05	10	380	119.8	0
10:10	15	380	119.8	0
10:15	20	380	119.8	0
10:20	25	380	119.8	0
10:25	30	380	119.8	0
10:30	35	386	119.8	0
10:35	40	385	119.8	0
10:40	45	385	119.8	0

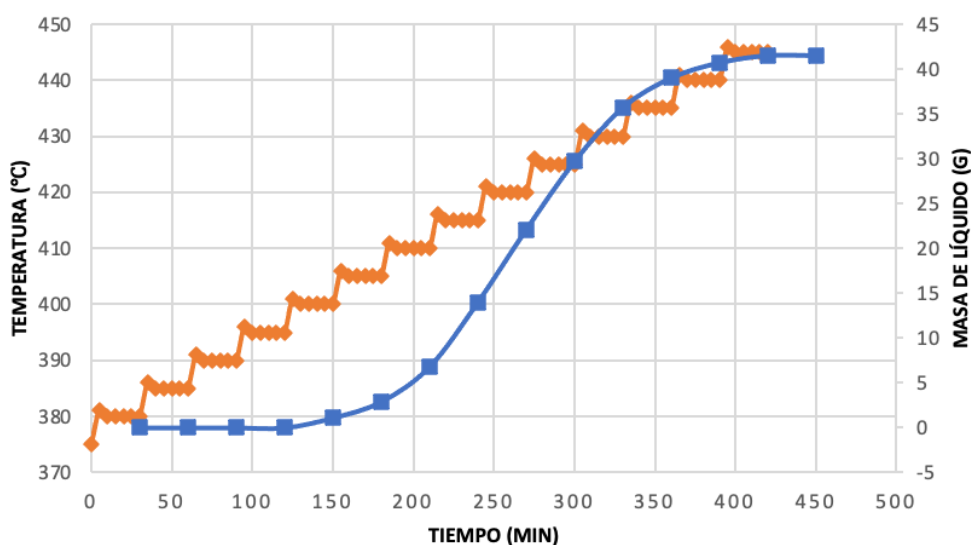
Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
10:45	50	385	119.8	0
10:50	55	385	119.8	0
10:55	60	385	119.8	0
11:00	65	391	119.8	0
11:05	70	390	119.8	0
11:10	75	390	119.8	0
11:15	80	390	119.8	0
11:20	85	390	119.8	0
11:25	90	390	119.8	0
11:30	95	396	119.8	0
11:35	100	395	119.8	0
11:40	105	395	119.8	0
11:45	110	395	119.8	0
11:50	115	395	119.8	0
11:55	120	395	119.8	0
12:00	125	401	119.8	0
12:05	130	400	119.8	0
12:10	135	400	119.8	0
12:15	140	400	119.8	0
12:20	145	400	119.8	0
12:25	150	400	120.9	1.1
12:30	155	406	119.8	0
12:35	160	405	119.8	0
12:40	165	405	119.8	0
12:45	170	405	119.8	0
12:50	175	405	119.8	0
12:55	180	405	121.6	1.8
13:00	185	411	119.8	0
13:05	190	410	119.8	0
13:10	195	410	119.8	0
13:15	200	410	119.8	0
13:20	205	410	119.8	0
13:25	210	410	123.7	3.9
13:30	215	416	119.8	0
13:35	220	415	119.8	0
13:40	225	415	119.8	0
13:45	230	415	119.8	0
13:50	235	415	119.8	0
13:55	240	415	127	7.2

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
14:00	245	421	119.8	0
14:05	250	420	119.8	0
14:10	255	420	119.8	0
14:15	260	420	119.8	0
14:20	265	420	119.8	0
14:25	270	420	127.9	8.1
14:30	275	426	119.8	0
14:35	280	425	119.8	0
14:40	285	425	119.8	0
14:45	290	425	119.8	0
14:50	295	425	119.8	0
14:55	300	425	127.4	7.6
15:00	305	431	119.8	0
15:05	310	430	119.8	0
15:10	315	430	119.8	0
15:15	320	430	119.8	0
15:20	325	430	119.8	0
15:25	330	430	127.9	6
15:30	335	436	119.8	0
15:35	340	435	119.8	0
15:40	345	435	119.8	0
15:45	350	435	119.8	0
15:50	355	435	119.8	0
15:55	360	435	127.9	3.3
16:00	365	441	119.8	0
16:05	370	440	119.8	0
16:10	375	440	119.8	0
16:15	380	440	119.8	0
16:20	385	440	119.8	0
16:25	390	440	119.8	0
16:30	395	446	127.9	1.7
16:35	400	445	119.8	0
16:40	405	445	119.8	0
16:45	410	445	119.8	0
16:50	415	445	119.8	0
16:55	420	445	127.9	0.8

Se muestran los datos recolectados y medidos en la tercera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30

minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 33. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la tercera corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada media 30 minutos en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

Cuadro 30. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.

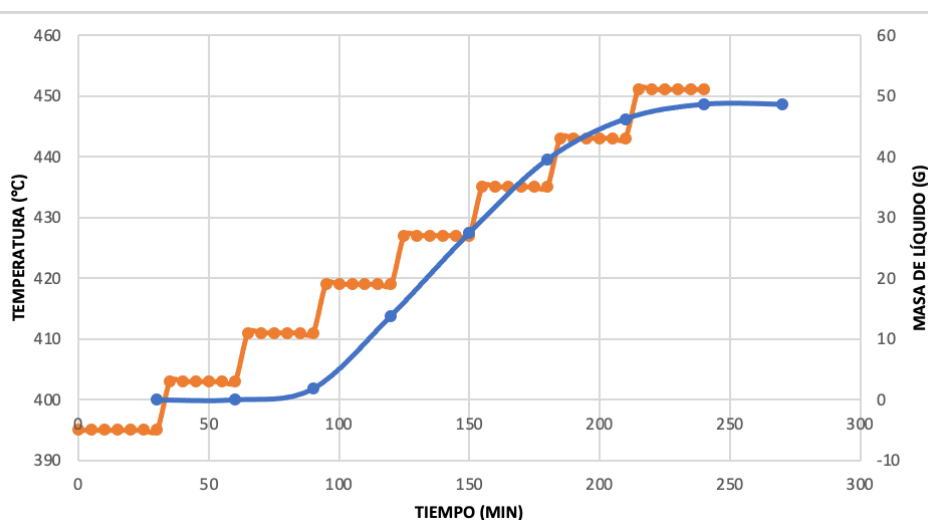
Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
10:15	0	395	96.1	0.0
10:20	5	395	96.1	0.0
10:25	10	395	96.1	0.0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
10:30	15	395	96.1	0.0
10:35	20	395	96.1	0.0
10:40	25	395	96.1	0.0
10:45	30	395	96.1	0.0
10:50	35	403	96.1	0.0
10:55	40	403	96.1	0.0
11:00	45	403	96.1	0.0
11:05	50	403	96.1	0.0
11:10	55	403	96.1	0.0
11:15	60	403	96.1	0.0
11:20	65	411	96.1	0.0
11:25	70	411	96.1	0.0
11:30	75	411	96.1	0.0
11:35	80	411	96.1	0.0
11:40	85	411	96.1	0.0
11:45	90	411	98.1	1.8
11:50	95	419	96.1	0.0
11:55	100	419	96.1	0.0
12:00	105	419	96.1	0.0
12:05	110	419	96.1	0.0
12:10	115	419	96.1	0.0
12:15	120	419	108.3	12.0
12:20	125	427	96.1	0.0
12:25	130	427	96.1	0.0
12:30	135	427	96.1	0.0
12:35	140	427	96.1	0.0
12:40	145	427	96.1	0.0
12:45	150	427	109.4	13.6
12:50	155	435	96.1	0.0
12:55	160	435	96.1	0.0
13:00	165	435	96.1	0.0
13:05	170	435	96.1	0.0
13:10	175	435	96.1	0.0
13:15	180	435	108	12.1
13:20	185	443	96.1	0.0
13:25	190	443	96.1	0.0
13:30	195	443	96.1	0.0
13:35	200	443	96.1	0.0
13:40	205	443	96.1	0.0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
13:45	210	443	103.1	6.7
13:50	215	451	96.1	0.0
13:55	220	451	96.1	0.0
14:00	225	451	96.1	0.0
14:05	230	451	96.1	0.0
14:10	235	451	96.1	0.0
14:15	240	451	98.3	2.4

Se muestran los datos recolectados y medidos en la primera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 34. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la primera corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos en el reactor

de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

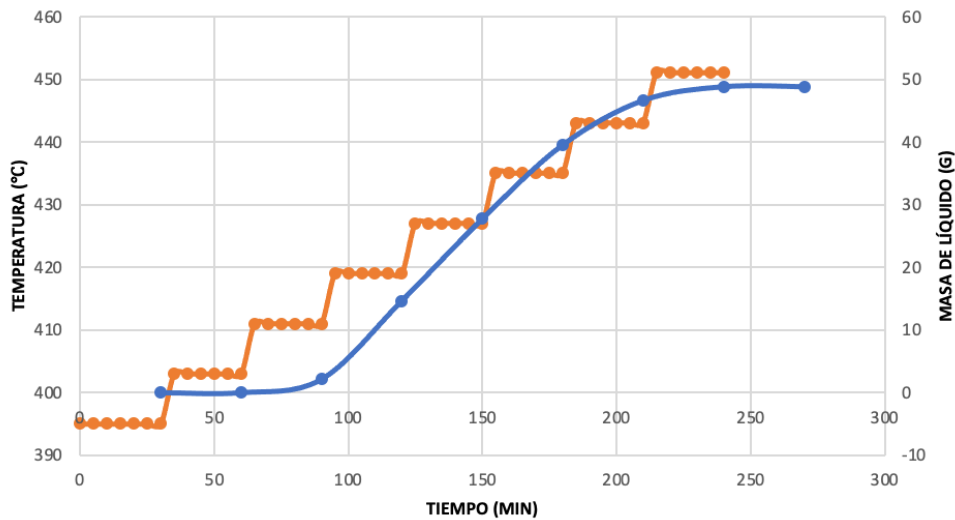
Cuadro 31. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (±1°C)	Masa medida (± 0.1g)	Masa de combustible líquido recuperado (±0.1g)
10:15	0	395	96.1	0.0
10:20	5	395	96.1	0.0
10:25	10	395	96.1	0.0
10:30	15	395	96.1	0.0
10:35	20	395	96.1	0.0
10:40	25	395	96.1	0.0
10:45	30	395	96.1	0.0
10:50	35	403	96.1	0.0
10:55	40	403	96.1	0.0
11:00	45	403	96.1	0.0
11:05	50	403	96.1	0.0
11:10	55	403	96.1	0.0
11:15	60	403	96.1	0.0
11:20	65	411	96.1	0.0
11:25	70	411	96.1	0.0
11:30	75	411	96.1	0.0
11:35	80	411	96.1	0.0
11:40	85	411	96.1	0.0
11:45	90	411	98.1	1.8
11:50	95	419	96.1	0.0
11:55	100	419	96.1	0.0
12:00	105	419	96.1	0.0
12:05	110	419	96.1	0.0
12:10	115	419	96.1	0.0
12:15	120	419	108.3	12.0
12:20	125	427	96.1	0.0
12:25	130	427	96.1	0.0
12:30	135	427	96.1	0.0
12:35	140	427	96.1	0.0
12:40	145	427	96.1	0.0
12:45	150	427	109.4	13.6
12:50	155	435	96.1	0.0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
12:55	160	435	96.1	0.0
13:00	165	435	96.1	0.0
13:05	170	435	96.1	0.0
13:10	175	435	96.1	0.0
13:15	180	435	108	12.1
13:20	185	443	96.1	0.0
13:25	190	443	96.1	0.0
13:30	195	443	96.1	0.0
13:35	200	443	96.1	0.0
13:40	205	443	96.1	0.0
13:45	210	443	103.1	6.7
13:50	215	451	96.1	0.0
13:55	220	451	96.1	0.0
14:00	225	451	96.1	0.0
14:05	230	451	96.1	0.0
14:10	235	451	96.1	0.0
14:15	240	451	98.3	2.4

Se muestran los datos recolectados y medidos en la segunda corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 35. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la segunda corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

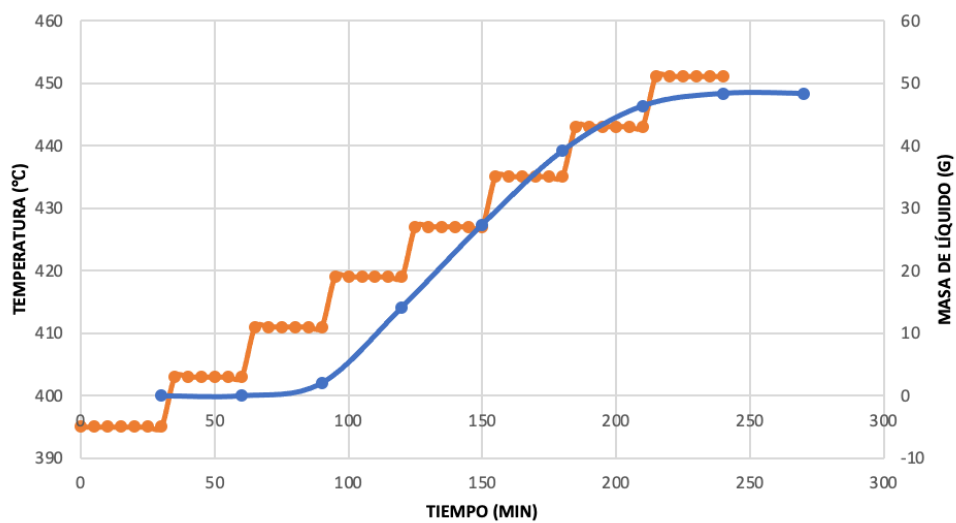
Cuadro 32. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
09:45	0	395	96.1	0.0
09:50	5	395	96.1	0.0
09:55	10	395	96.1	0.0
10:00	15	395	96.1	0.0
10:05	20	395	96.1	0.0
10:10	25	395	96.1	0.0
10:15	30	395	96.1	0.0
10:20	35	403	96.1	0.0
10:25	40	403	96.1	0.0
10:30	45	403	96.1	0.0
10:35	50	403	96.1	0.0
10:40	55	403	96.1	0.0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
10:45	60	403	96.1	0.0
10:50	65	411	96.1	0.0
10:55	70	411	96.1	0.0
11:00	75	411	96.1	0.0
11:05	80	411	96.1	0.0
11:10	85	411	96.1	0.0
11:15	90	411	98.1	2.0
11:20	95	419	96.1	0.0
11:25	100	419	96.1	0.0
11:30	105	419	96.1	0.0
11:35	110	419	96.1	0.0
11:40	115	419	96.1	0.0
11:45	120	419	108.3	12.1
11:50	125	427	96.1	0.0
11:55	130	427	96.1	0.0
12:00	135	427	96.1	0.0
12:05	140	427	96.1	0.0
12:10	145	427	96.1	0.0
12:15	150	427	109.4	13.2
12:20	155	435	96.1	0.0
12:25	160	435	96.1	0.0
12:30	165	435	96.1	0.0
12:35	170	435	96.1	0.0
12:40	175	435	96.1	0.0
12:45	180	435	108.0	11.8
12:50	185	443	96.1	0.0
12:55	190	443	96.1	0.0
13:00	195	443	96.1	0.0
13:05	200	443	96.1	0.0
13:10	205	443	96.1	0.0
13:15	210	443	103.1	7.2
13:20	215	451	96.1	0.0
13:25	220	451	96.1	0.0
13:30	225	451	96.1	0.0
13:35	230	451	96.1	0.0
13:40	235	451	96.1	0.0
13:45	240	451	98.3	2.0

Se muestran los datos recolectados y medidos en la tercera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 36. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la tercera corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 8°C cada media 30 minutos en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

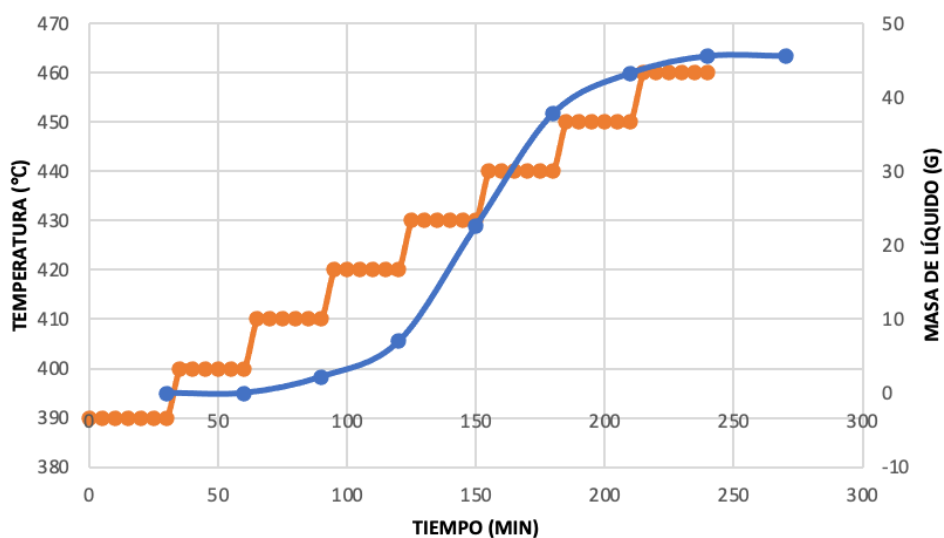
Cuadro 33. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
09:35	0	390	81.4	0.0
09:40	5	390	81.4	0.0
09:45	10	390	81.4	0.0
09:50	15	390	81.4	0.0
09:55	20	390	81.4	0.0
10:00	25	390	81.4	0.0
10:05	30	390	81.4	0.0
10:10	35	400	81.4	0.0
10:15	40	400	81.4	0.0
10:20	45	400	81.4	0.0
10:25	50	400	81.4	0.0
10:30	55	400	81.4	0.0
10:35	60	400	81.5	0.0
10:40	65	410	81.4	0.0
10:45	70	410	81.4	0.0
10:50	75	410	81.4	0.0
10:55	80	410	81.4	0.0
11:00	85	410	81.4	0.0
11:05	90	410	83.4	2.2
11:10	95	420	81.4	0.0
11:15	100	420	81.4	0.0
11:20	105	420	81.4	0.0
11:25	110	420	81.4	0.0
11:30	115	420	81.4	0.0
11:35	120	420	86.3	4.8
11:40	125	430	81.4	0.0
11:45	130	430	81.4	0.0
11:50	135	430	81.4	0.0
11:55	140	430	81.4	0.0
12:00	145	430	81.4	0.0
12:05	150	430	96.8	15.6
12:10	155	440	81.4	0.0
12:15	160	440	81.4	0.0
12:20	165	440	81.4	0.0
12:25	170	440	81.4	0.0
12:30	175	440	81.4	0.0
12:35	180	440	96.4	15.2

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
12:40	185	450	81.4	0.0
12:45	190	450	81.4	0.0
12:50	195	450	81.4	0.0
12:55	200	450	81.4	0.0
13:00	205	450	81.4	0.0
13:05	210	450	86.6	5.4
13:10	215	460	81.4	0.0
13:15	220	460	81.4	0.0
13:20	225	460	81.4	0.0
13:25	230	460	81.4	0.0
13:30	235	460	81.4	0.0
13:35	240	460	83.4	2.3

Se muestran los datos recolectados y medidos en la primera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 37. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) primera corrida a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la primera corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada media hora en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

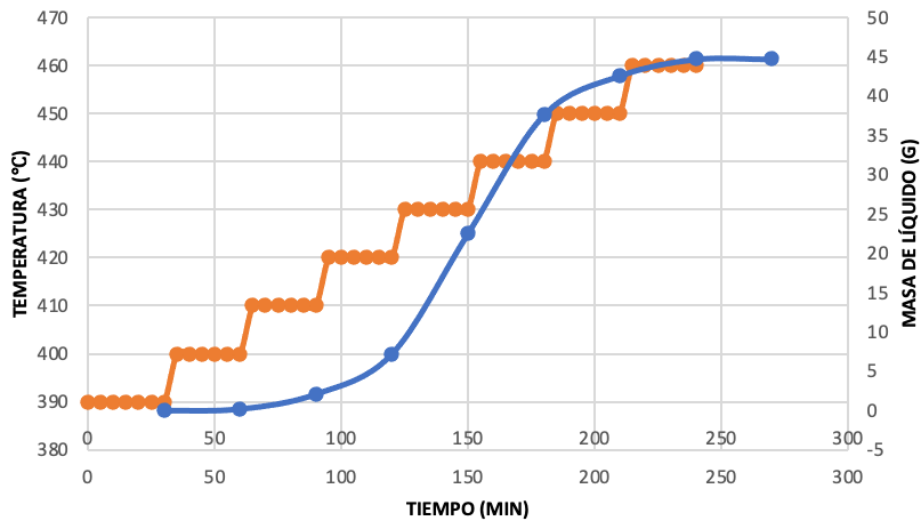
Cuadro 34. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura (±1°C)	Masa medida (± 0.1g)	Masa de combustible líquido recuperado (±0.1g)
09:25	0	390	81.4	0.0
09:30	5	390	81.4	0.0
09:35	10	390	81.4	0.0
09:40	15	390	81.4	0.0
09:45	20	390	81.4	0.0
09:50	25	390	81.4	0.0
09:55	30	390	81.4	0.0
10:00	35	400	81.4	0.0
10:05	40	400	81.4	0.0
10:10	45	400	81.4	0.0
10:15	50	400	81.4	0.0
10:20	55	400	81.4	0.0
10:25	60	400	81.5	0.2
10:30	65	410	81.4	0.0
10:35	70	410	81.4	0.0
10:40	75	410	81.4	0.0
10:45	80	410	81.4	0.0
10:50	85	410	81.4	0.0
10:55	90	410	83.4	1.9
11:00	95	420	81.4	0.0
11:05	100	420	81.4	0.0
11:10	105	420	81.4	0.0
11:15	110	420	81.4	0.0
11:20	115	420	81.4	0.0
11:25	120	420	86.3	5.1
11:30	125	430	81.4	0.0
11:35	130	430	81.4	0.0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
11:40	135	430	81.4	0.0
11:45	140	430	81.4	0.0
11:50	145	430	81.4	0.0
11:55	150	430	96.8	15.3
12:00	155	440	81.4	0.0
12:05	160	440	81.4	0.0
12:10	165	440	81.4	0.0
12:15	170	440	81.4	0.0
12:20	175	440	81.4	0.0
12:25	180	440	96.4	15.1
12:30	185	450	81.4	0.0
12:35	190	450	81.4	0.0
12:40	195	450	81.4	0.0
12:45	200	450	81.4	0.0
12:50	205	450	81.4	0.0
12:55	210	450	86.6	5.0
13:00	215	460	81.4	0.0
13:05	220	460	81.4	0.0
13:10	225	460	81.4	0.0
13:15	230	460	81.4	0.0
13:20	235	460	81.4	0.0
13:25	240	460	83.4	2.1

Se muestran los datos recolectados y medidos en la segunda corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 38. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) segunda corrida a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la segunda corrida del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenidos para el análisis de temperatura y en la curva azul los datos experimentales de combustible líquido.

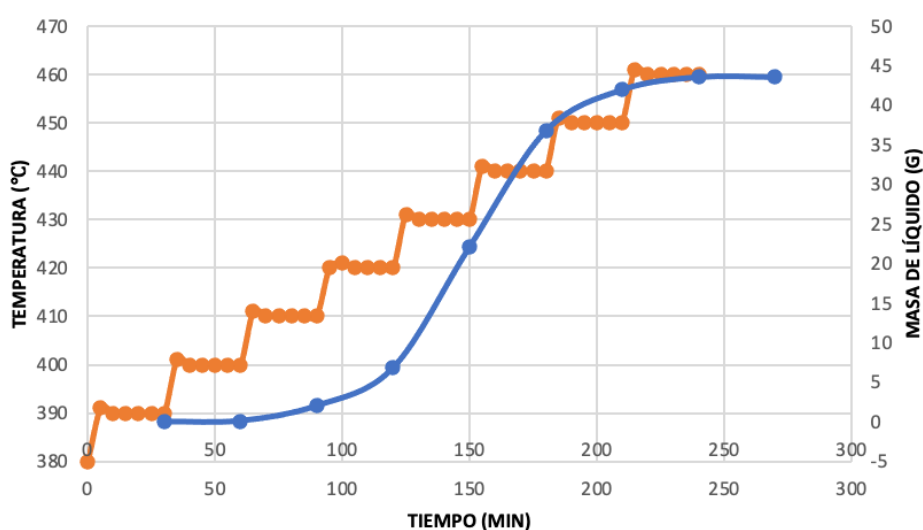
Cuadro 35. Datos pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida, en reactor de 50g, a un gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
10:00	0	380	81.4	0.0
10:05	5	391	81.4	0.0
10:10	10	390	81.4	0.0
10:15	15	390	81.4	0.0
10:20	20	390	81.4	0.0
10:25	25	390	81.4	0.0
10:30	30	390	81.4	0.0
10:35	35	401	81.4	0.0
10:40	40	400	81.4	0.0
10:45	45	400	81.4	0.0

Hora	Tiempo (min)	Temperatura ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)	Masa medida ($\pm 0.1\text{g}$)	Masa de combustible líquido recuperado ($\pm 0.1\text{g}$)
10:50	50	400	81.4	0.0
10:55	55	400	81.4	0.0
11:00	60	400	81.5	0.1
11:05	65	411	81.4	0.0
11:10	70	410	81.4	0.0
11:15	75	410	81.4	0.0
11:20	80	410	81.4	0.0
11:25	85	410	81.4	0.0
11:30	90	410	83.4	1.9
11:35	95	420	81.4	0.0
11:40	100	421	81.4	0.0
11:45	105	420	81.4	0.0
11:50	110	420	81.4	0.0
11:55	115	420	81.4	0.0
12:00	120	420	86.3	4.8
12:05	125	431	81.4	0.0
12:10	130	430	81.4	0.0
12:15	135	430	81.4	0.0
12:20	140	430	81.4	0.0
12:25	145	430	81.4	0.0
12:30	150	430	96.8	15.3
12:35	155	441	81.4	0.0
12:40	160	440	81.4	0.0
12:45	165	440	81.4	0.0
12:50	170	440	81.4	0.0
12:55	175	440	81.4	0.0
13:00	180	440	96.4	14.7
13:05	185	451	81.4	0.0
13:10	190	450	81.4	0.0
13:15	195	450	81.4	0.0
13:20	200	450	81.4	0.0
13:25	205	450	81.4	0.0
13:30	210	450	86.6	5.2
13:35	215	461	81.4	0.0
13:40	220	460	81.4	0.0
13:45	225	460	81.4	0.0
13:50	230	460	81.4	0.0
13:55	235	460	81.4	0.0
14:00	240	460	83.4	1.6

Se muestran los datos recolectados y medidos en la tercera corrida de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada 30 minutos. A esto se agregó el cálculo para determinar la masa de combustible líquido recolectado. Se hicieron los cambios de temperatura en plazos de 30 minutos como mencionado anteriormente, y en este momento se tomaron las mediciones de la masa de líquido combustible recolectado.

Figura 39. Pirólisis lenta de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) tercera corrida a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos.



(Fuente propia)

Muestra el comportamiento del combustible líquido y la temperatura (datos experimentales) durante la terceracorrída del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 10°C cada media 30 minutos en el reactor de 50g. En la curva naranja se observan los datos experimentales obtenios para el análisis de temperatura y en la curva azú los datos experimentales de combustible líquido.

Cuadro 36. Poder calorífico obtenido del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 5 °C cada 30 minutos a partir del Calorímetro IKA C200.

Muestra	Poder calorífico (J/g)
1	45,176.00 ± 1.00
2	45,142.00 ± 1.00
3	45,148.00 ± 1.00

Cuadro 37. Poder calorífico obtenido del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 8 °C cada 30 minutos a partir del Calorímetro IKA C200.

Muestra	Poder calorífico (J/g)
1	45,281.00 ± 1.00
2	45,243.00 ± 1.00
3	45,291.00 ± 1.00

Cuadro 38. Poder calorífico obtenido del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 10 °C cada 30 minutos a partir del Calorímetro IKA C200.

Muestra	Poder calorífico (J/g)
1	43,700.00 ± 1.00
2	43,610.00 ± 1.00
3	43,577.00 ± 1.00

Cuadro 39. Poder calorífico obtenido del compuesto ceroso a partir del Calorímetro IKA C200.

Muestra	Poder calorífico (J/g)
1	35,510.00 ± 1.00
2	35,689.00 ± 1.00
3	35,454.00 ± 1.00

Cuadro 40. Análisis estadístico del poder calorífico del combustible líquido recolectado a los diferentes gradientes de temperatura a partir del Calorímetro IKA C200.

Gradiente de temperatura	Poder calorífico (J/g)	Desviación estándar (J/g)	Intervalo de confianza al 95% (J/g)	Coficiente de variación (%)
5 °C cada 30 minutos	45,155.3 ± 1.7	18.15	[45132.96 – 45177.64]	0.04
8 °C cada 30 minutos	45,272.7 ± 1.7	25.31	[45241.55 – 45303.85]	0.06
10 °C cada 30 minutos	43,629.0 ± 1.7	63.66	[43550.65 – 43707.35]	0.15
Compuesto Ceroso	35,551.1 ± 1.7	122.75	[35400.02 – 35702.18]	0.35
Gas	46,788.81 ± 3.2	-	-	-

Se muestra el análisis estadístico del poder calorífico de productos de pirólisis en el reactor de 50 g, además del compuesto ceroso obtenido y el gas producido. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 4 grados de libertad de 2.1318

Cuadro 41. Densidad del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos.

Muestra	Densidad (kg/m ³)
1	715.89 ± 1 * 10 ⁻⁷
2	717.83 ± 1 * 10 ⁻⁷
3	716.29 ± 1 * 10 ⁻⁷

Se muestran las densidades del combustible líquido obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de ± 0.0001g y una probeta marca ValueWare de 25mL con una incertidumbre de ± 1mL.

Cuadro 42. Densidad del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 8°C cada 30 minutos.

Muestra	Densidad (kg/m ³)
1	722.12 ± 1 * 10 ⁻⁷
2	720.45 ± 1 * 10 ⁻⁷
3	720.78 ± 1 * 10 ⁻⁷

Se muestran las densidades del combustible líquido obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de ± 0.0001g y una probeta marca ValueWare de 25mL con una incertidumbre de ± 1mL.

Cuadro 43. Densidad del combustible líquido recolectado con el gradiente de temperatura de 10°C cada 30 minutos.

Muestra	Densidad (kg/m ³)
1	717.92 ± 1 * 10 ⁻⁷
2	717.40 ± 1 * 10 ⁻⁷
3	719.31 ± 1 * 10 ⁻⁷

Se muestran las densidades del combustible líquido obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de $\pm 0.0001\text{g}$ y una probeta mara ValueWare de 25mL con una incertidumbre de $\pm 1\text{mL}$.

Cuadro 44. Análisis estadístico de nla densidad del combustible líquido recolectado a los diferentes gradietes de temperatura.

Gradiente de temperatura	Densidad (kg/m³)	Desviación estándar (J/g)	Intervalo de confianza al 95% (J/g)	Coficiente de variación (%)
5 °C cada 30 minutos	716.67 \pm 0.0001	1.02	[714.95 – 718.39]	0.14
8 °C cada 30 minutos	721.45 \pm 0.0001	0.88	[719.97 – 722.93]	0.12
10 °C cada 30 minutos	718.21 \pm 0.0001	0.99	[716.54 – 719.88]	0.14

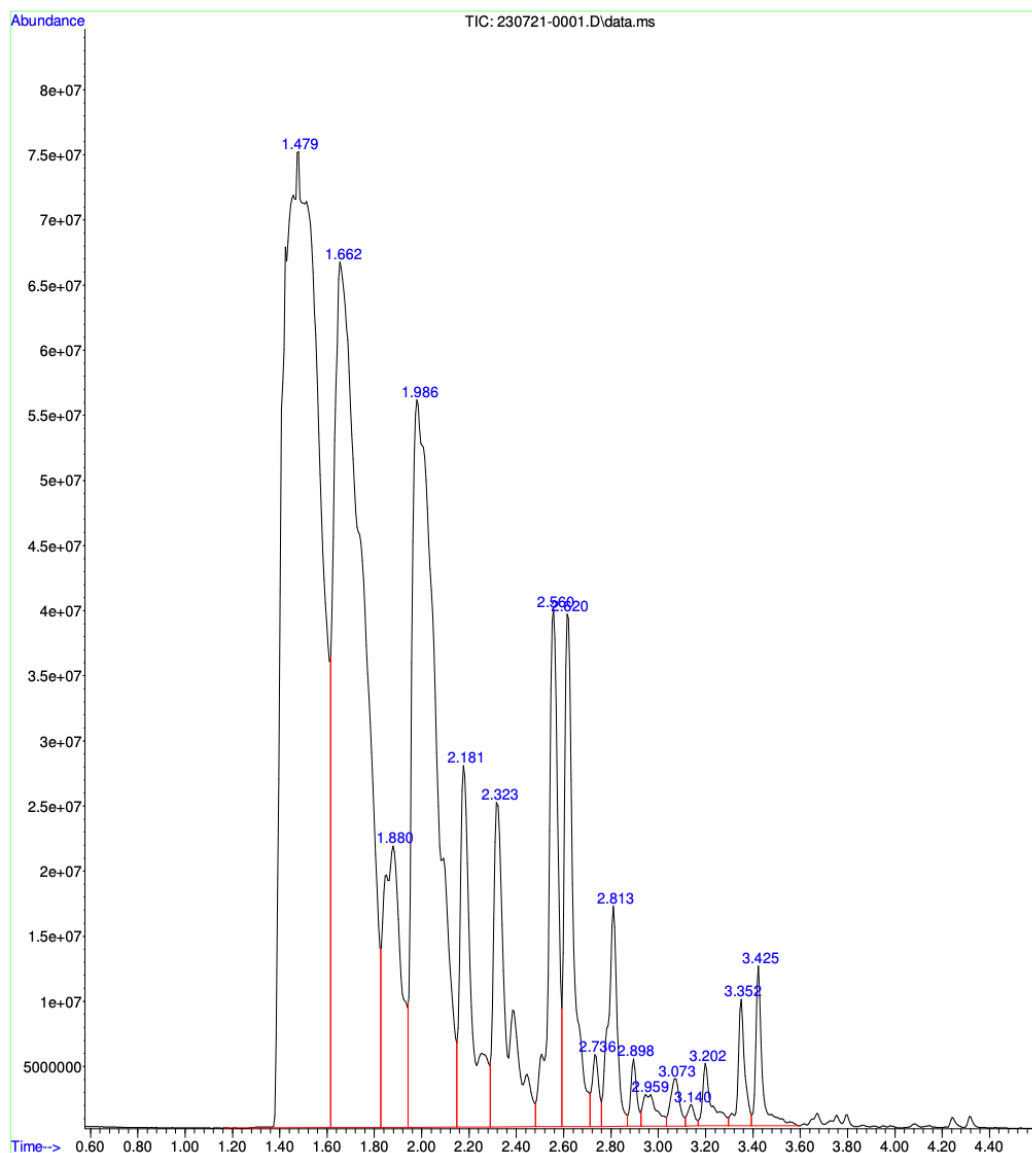
Se muestra el análisis estadístico de la densidade productos de pirólisis en el reactor de 50 g. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 4 grados de libertad de 2.1318

Cuadro 45. Compuestos presentes en el gas producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.480	33.04	Propano
2	1.660	23.55	Etil-ciclopropano
3	1.879	4.57	ciclopenteno
4	1.985	16.31	1-etil-2-metil-ciclopropano
5	2.182	3.86	metil-ciclopentano
6	2.322	4.08	(Z,Z)-2,4-hexadieno
7	2.558	4.32	1-hepteno
8	2.620	4.42	heptano
9	2.738	0.46	1,5-dimetil-ciclopenteno
10	2.811	1.8	metil-ciclohexano
11	2.901	0.37	metil-ciclohexano
12	2.957	0.41	etil-ciclopentano
13	3.075	0.39	1-metil-ciclohexeno

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
14	3.142	0.14	1-etil-ciclopenteno
15	3.204	0.53	4-metil-heptano
16	3.350	0.78	4-metil-heptano
17	3.423	0.96	1-octeno

Figura 40. Cromatograma del gas producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE).



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra de gas liberado durante el proceso de pirólisis.. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

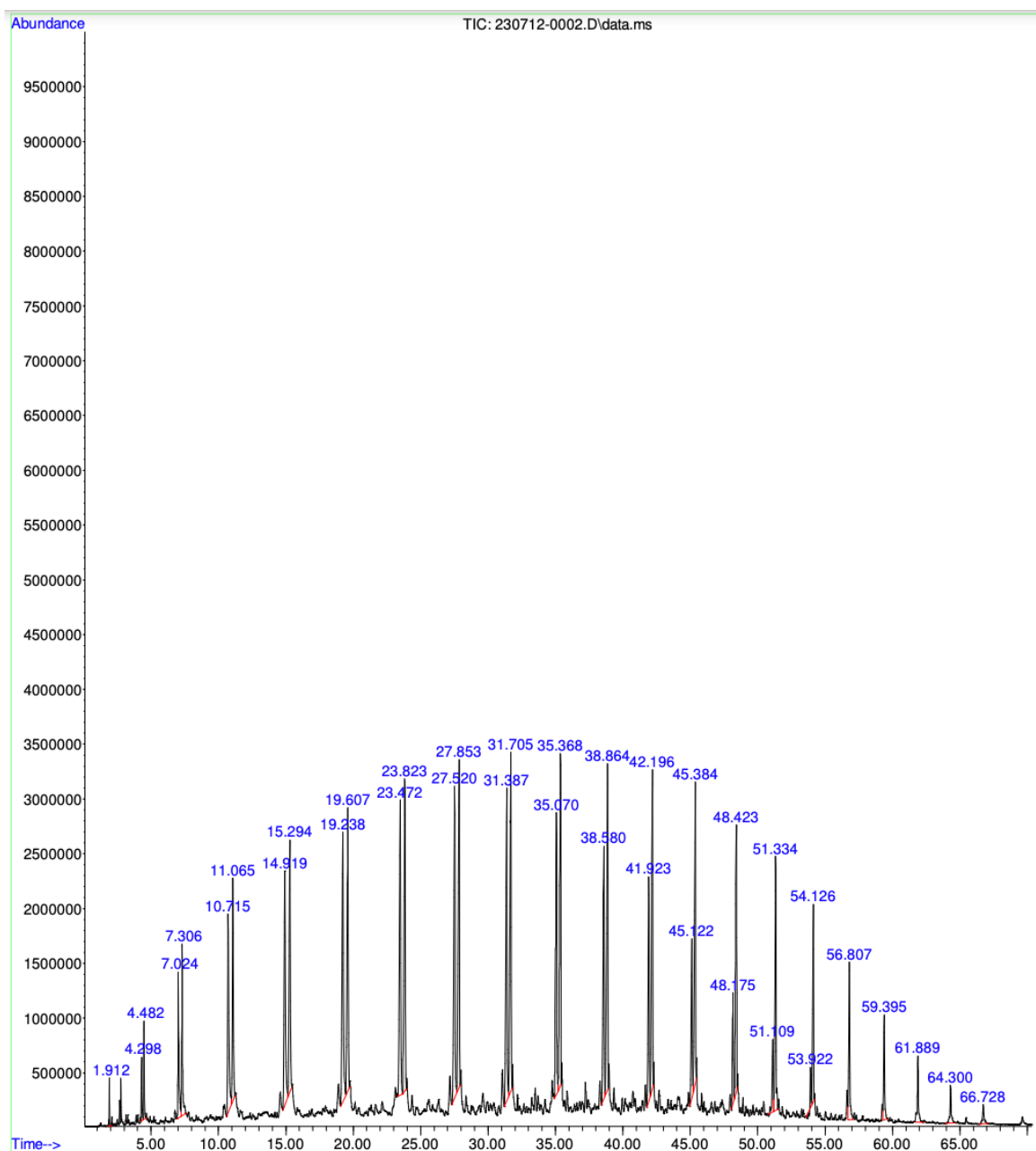
Cuadro 46. Compuestos presentes en el combustible líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 5°C cada media 30 minutos.

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.911	0.17	Heptano
2	4.299	0.43	1-Nonano
3	4.481	0.59	Nonano
4	7.024	1.54	1-Deceno
5	7.306	1.68	Decano
6	10.713	2.81	1-Undeceno
7	11.063	2.59	Undecano
8	14.92	3.72	1-Dodeceno
9	15.293	3.51	Dodecano
10	19.237	4.27	1-Trideceno
11	19.605	4.09	Tridecano
12	23.472	4.46	1-Tetradeceno
13	23.822	4.53	Tetradecano
14	27.52	4.64	1-Pentadeceno
15	27.852	4.66	Pentadecano
16	31.386	4.37	1-Hexadeceno (Z)
17	31.705	4.88	Hexadecano
18	35.071	3.76	1-Heptadeceno
19	35.366	4.69	Heptadecano
20	38.582	3.46	5-Octadeceno
21	38.864	4.82	Octadecano
22	41.926	2.9	1-Nonadeceno
23	42.194	4.49	Nonadecano
24	45.123	1.94	1-Nonadeceno
25	45.383	4.02	Octacosano
26	48.175	1.32	1-Nonadeceno
27	48.421	3.6	Heneicosano
28	51.109	0.99	1-Nonadeceno
29	51.332	3.46	Eicosano
30	53.92	0.27	9-Tricoseno
31	54.125	2.16	Octacosano
32	56.809	2.01	Tetracoseno
33	59.397	1.26	Pentadecano
34	61.89	0.97	Heneicoseno
35	64.3	0.59	Octacosano

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
36	66.729	0.34	Heptacosano

Datos obtenidos utilizando el Espectrofotometro GC-Masas con ayuda del departamento de investigación de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 41. Cromatograma del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de 5°C cada 30 minutos.



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra de combustible obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad en el gradiente de de 5°C cada 30 minutos. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

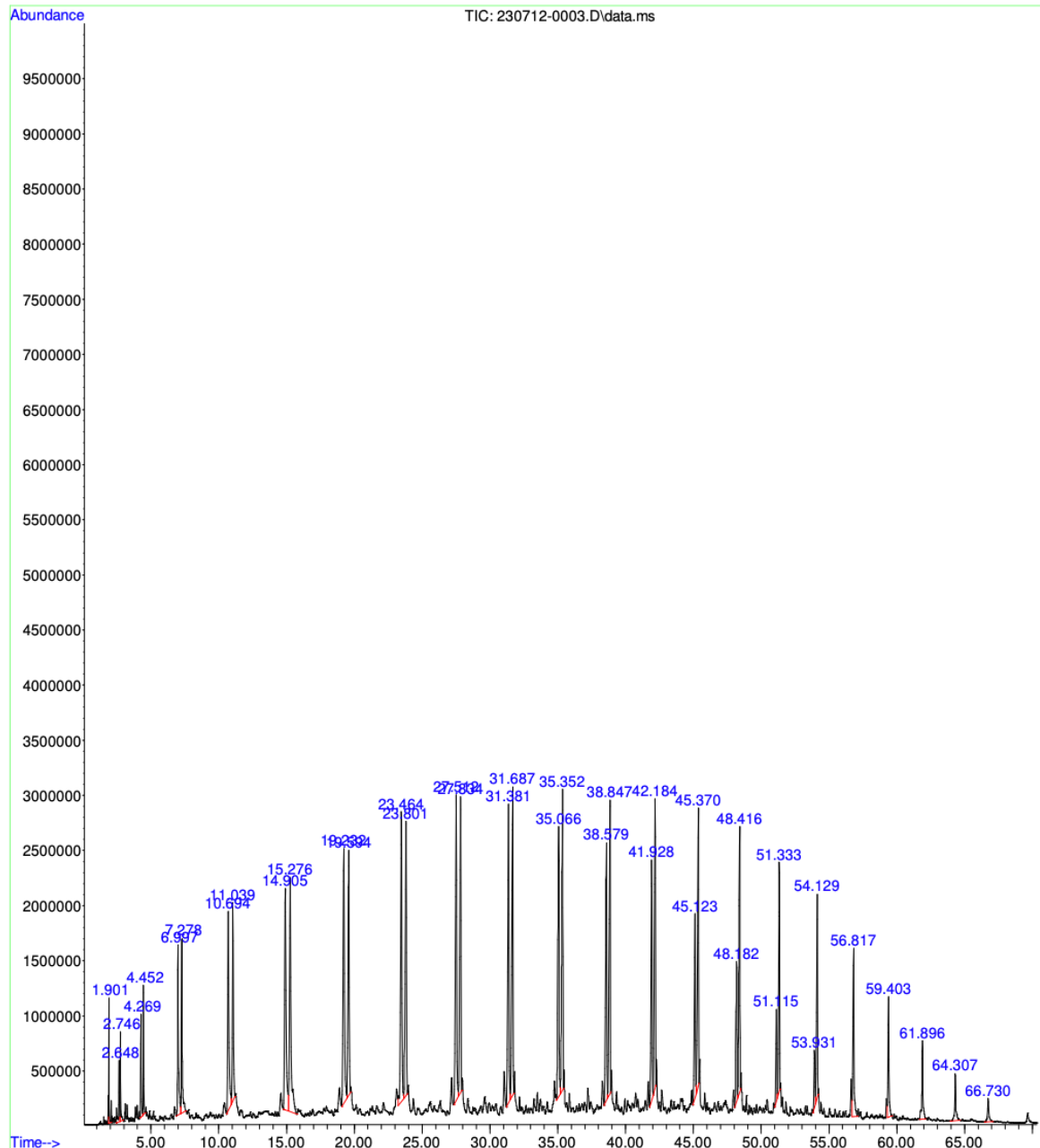
Cuadro 47. Compuestos presentes en el combustible líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 8°C cada media 30 minutos.

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Area bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.902	0.39	Hetpano
2	2.648	0.45	1-Octano
3	2.744	0.51	2,4-dimetil-heptano
4	4.267	0.73	1-noneno
5	4.454	0.82	Nonano
6	6.997	1.87	1-deceno
7	7.279	1.79	decano
8	10.695	2.9	1-undeceno
9	11.04	2.39	undecano
10	14.907	3.89	1-udodeceno
11	15.275	4.19	dodecano
12	19.232	4.1	1-trideceno
13	19.592	3.53	tridecano
14	23.463	4.62	1-tetradeceno
15	23.799	3.9	tetradecano
16	27.511	4.54	1-pentadeceno
17	27.834	4.05	pentadecano
18	31.382	4.34	(Z)-7-hexadeceno
19	31.687	4.25	Hexadecano
20	35.066	3.82	1-heptadeceno
21	35.353	4.07	heptadecano
22	38.578	3.64	1-nonadeceno
23	38.846	4.21	octadecano
24	41.93	3.15	1-nonadeceno
25	42.185	3.91	pentadecano
26	45.123	2.34	3-nonadeceno
27	45.369	3.64	octadecano
28	48.185	1.72	1-nonadeceno

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Area bajo la curva (%)	Compuesto
29	48.417	3.38	octadecano
30	51.114	1.05	1-nonadeceno
31	51.332	2.82	heptadecano
32	53.929	0.66	1-nonadeceno
33	54.13	2.29	7-hexil-tridecano
34	56.818	2.29	tetracosano
35	59.401	1.53	Hexadecano
36	61.894	1.12	Eicosano
37	64.305	0.7	Eicosano
38	66.729	0.41	Eicosano

Datos obtenidos utilizando el Espectrofotometro GC-Masas con ayuda del departamento de investigación de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 42. Cromatograma del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 8°C cada media 30 minutos.



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra de combustible obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad en el gradiente de de 8°C cada 30 minutos. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

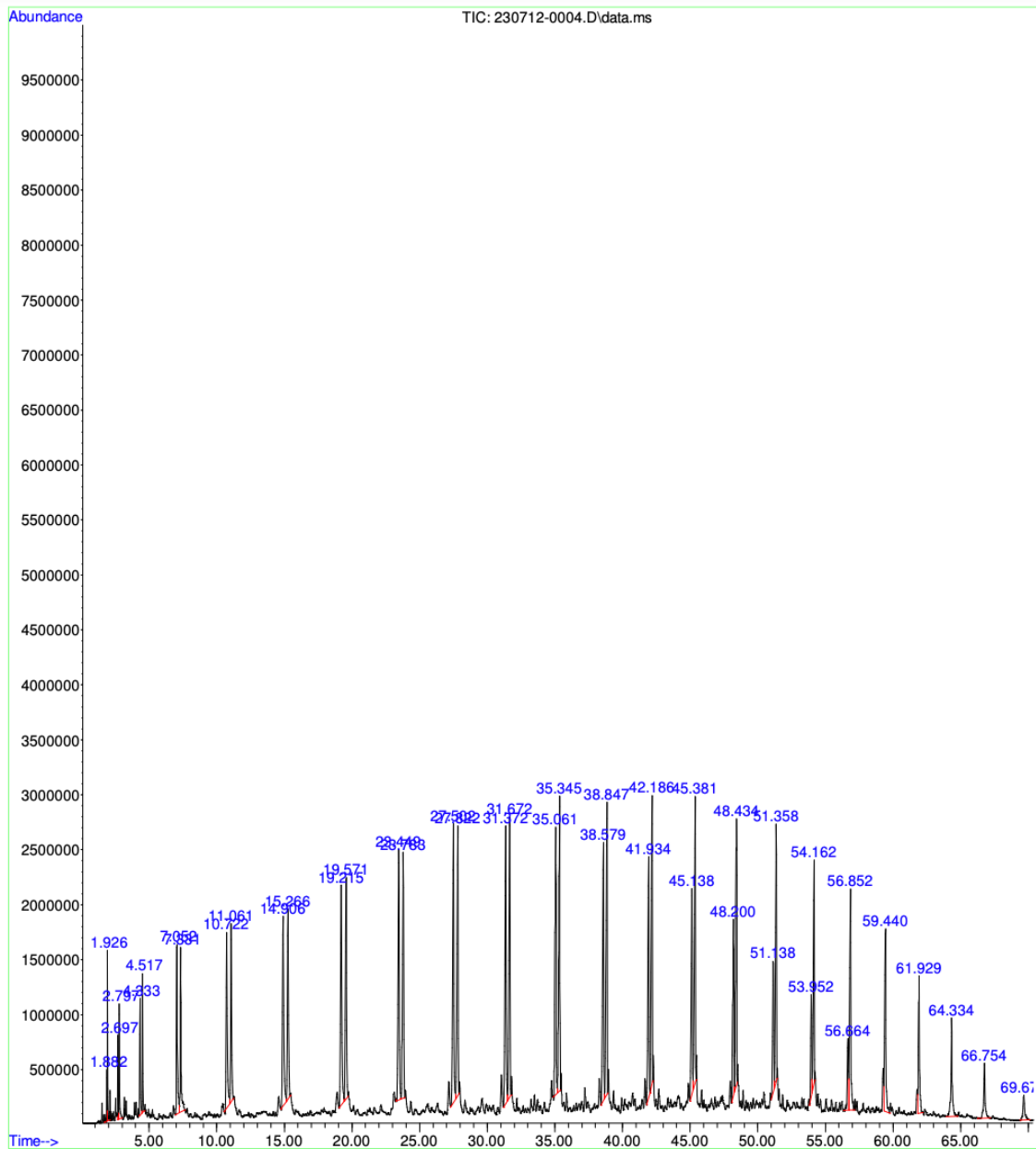
Cuadro 48. Compuestos más importantes presentes en el combustible líquido producido a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 10°C cada media 30 minutos.

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Area bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.884	0.19	1-hepteno
2	1.925	0.57	Heptano
3	2.698	0.44	1-octeno
4	2.798	0.64	octano
5	4.331	0.81	1-noneno
6	4.518	0.86	nonano
7	7.051	1.77	1-deceno
8	7.329	1.64	decano
9	10.722	2.38	1-undeceno
10	11.063	1.99	undecano
11	14.907	2.88	1-dodeceno
12	15.266	2.48	dodecano
13	19.214	2.35	1-trideceno
14	19.569	2.92	tridecano
15	23.449	3.68	1-tetradeceno
16	23.786	3.27	tetradecano
17	27.502	3.99	1-pentadeceno
18	27.82	3.55	pentadecano
19	31.373	3.94	7-hexadeceno (Z)
20	31.673	3.81	hexadecano
21	35.062	3.52	1-heptadeceno
22	35.344	3.76	heptadecano
23	38.578	3.65	5-octadeceno
24	38.846	4.06	Octadecano
25	41.935	3.32	1-nonadeceno
26	42.185	3.78	nonadecano
27	45.137	2.74	1-nonadeceno
28	45.383	3.69	octacosano
29	48.198	2.27	3-eicoseno €
30	48.435	3.57	Heneicoseno
31	51.137	1.65	1-nonadeceno
32	51.36	3.18	Octacosano
33	53.952	1.2	1-nonadeceno

No. Pico	Tiempo de retención (min)	Area bajo la curva (%)	Compuesto
34	54.161	2.8	Octacosano
35	56.663	0.97	1-nonadoceno
36	56.85	3.22	tetracosano
37	59.438	2.59	hexadecano
38	61.931	1.84	nonadecano
39	64.332	1.54	hexadecano
40	66.752	0.95	octacosano
41	69.668	0.53	eicosano

Datos obtenidos utilizando el Espectrofotometro GC-Masas con ayuda del departamento de investigación de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 43. Cromatograma del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a una rampa de temperatura de de 10°C cada media 30 minutos.



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra de combustible obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad en el gradiente de de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

Cuadro 49. Análisis de varianza del efeto que tiene la temperatura con el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	97.100000	4.121057	23.562	2.56e-06	***
Tiempo	-0.169444	0.021228	-7.982	0.000498	***
Temperatura	-6.850000	0.897146	-7.635	0.000613	***
Tiempo:Temperatura	0.024444	0.005142	4.754	0.005087	**

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5112 on 5 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.9828, Adjusted R-squared: 0.9725
 F-statistic: 95.37 on 3 and 5 DF, p-value: 7.828e-05

Figura 44. Gráfico Normal Q-Q de los datos utilizados para el ANOVA del

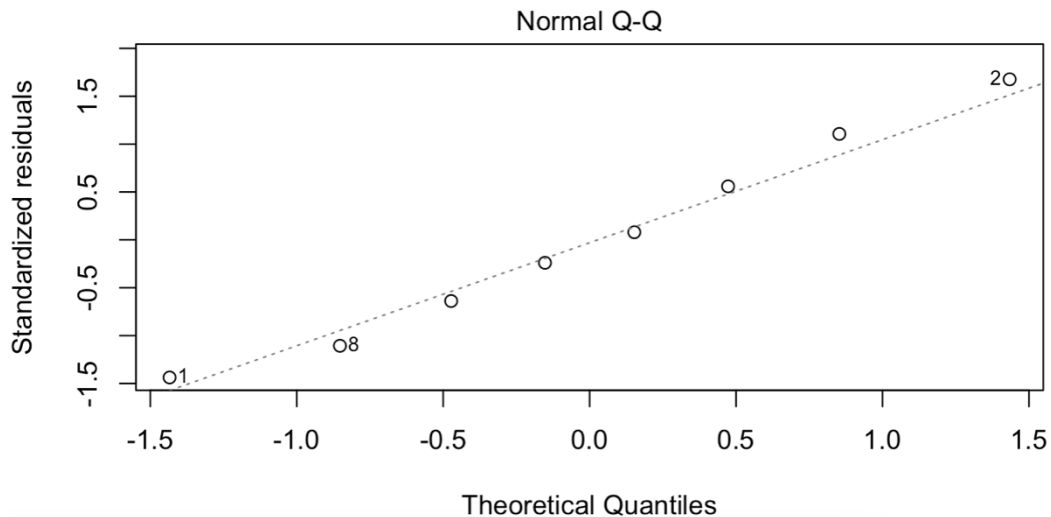


Figura 45. Código de la cinética promedio del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con el gradiente de temperatura de 5 °C cada 30 minutos para utilizarlo en el software Berkeley-Madonna.

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 450

DT = 0.02

$rw = (Kon*(HDPE-Wf)^z)$

$$K_{on} = X * \exp(-E_a / (R * \text{Temperatura}))$$

$$X = 6.7779E20$$

$$E_a = 189007.99871$$

$$R = 8.314$$

$$W_f = 1.2$$

$$z = 1.52944$$

$$R_1 = ((T_2 - T_1) * \exp((t_a - \text{TIME})/a)) / (a * (1 + \exp((t_a - \text{TIME})/a)))$$

$$R_2 = ((T_3 - T_2) * \exp((t_b - \text{TIME})/b)) / (b * (1 + \exp((t_b - \text{TIME})/b)))$$

$$R_3 = ((T_4 - T_3) * \exp((t_c - \text{TIME})/c)) / (c * (1 + \exp((t_c - \text{TIME})/c)))$$

$$R_4 = ((T_5 - T_4) * \exp((t_d - \text{TIME})/d)) / (d * (1 + \exp((t_d - \text{TIME})/d)))$$

$$R_5 = ((T_6 - T_5) * \exp((t_e - \text{TIME})/e)) / (e * (1 + \exp((t_e - \text{TIME})/e)))$$

$$R_6 = ((T_7 - T_6) * \exp((t_f - \text{TIME})/f)) / (f * (1 + \exp((t_f - \text{TIME})/f)))$$

$$R_7 = ((T_8 - T_7) * \exp((t_g - \text{TIME})/g)) / (g * (1 + \exp((t_g - \text{TIME})/g)))$$

$$R_8 = ((T_9 - T_8) * \exp((t_h - \text{TIME})/h)) / (h * (1 + \exp((t_h - \text{TIME})/h)))$$

$$R_9 = ((T_{10} - T_9) * \exp((t_i - \text{TIME})/i)) / (i * (1 + \exp((t_i - \text{TIME})/i)))$$

$$R_{10} = ((T_{11} - T_{10}) * \exp((t_j - \text{TIME})/j)) / (j * (1 + \exp((t_j - \text{TIME})/j)))$$

$$R_{11} = ((T_{12} - T_{11}) * \exp((t_k - \text{TIME})/k)) / (k * (1 + \exp((t_k - \text{TIME})/k)))$$

$$R_{12} = ((T_{13} - T_{12}) * \exp((t_l - \text{TIME})/l)) / (l * (1 + \exp((t_l - \text{TIME})/l)))$$

$$R13 = ((T14-T13)*\exp((tm-TIME)/m))/(m*(1+\exp((tm-TIME)/m)))$$

$$R14 = ((T15-T14)*\exp((tn-TIME)/n))/(n*(1+\exp((tn-TIME)/n)))$$

$$T1 = 375$$

$$T2 = 380$$

$$T3 = 385$$

$$T4 = 390$$

$$T5 = 395$$

$$T6 = 400$$

$$T7 = 405$$

$$T8 = 410$$

$$T9 = 415$$

$$T10 = 420$$

$$T11 = 425$$

$$T12 = 430$$

$$T13 = 435$$

$$T14 = 440$$

$$T15 = 445$$

$$a = 0.78$$

$$b = 1.30$$

$$c = 0.81$$

$$d = 1.47$$

$$e = 1.15$$

$$f = 0.94$$

$$g = 1.02$$

$$h = 1.51$$

$$i = 0.83$$

$$j = 0.69$$

$$k = 0.60$$

$$l = 0.87$$

$$m = 0.85$$

$$n = 0.74$$

$$t_a = 0.41$$

$$t_b = 30.73$$

$$t_c = 60.44$$

$$t_d = 90.8$$

$$t_e = 120.62$$

$$t_f = 150.52$$

$$t_g = 180.53$$

$$t_h = 210.81$$

$$t_i = 240.45$$

$$t_j = 270.37$$

$$t_k = 300.33$$

$$t_l = 330.47$$

$$t_m = 360.47$$

$$t_n = 390.41$$

$$\text{init Temperatura} = 375$$

$$\text{init HDPE} = 50$$

$$\text{init Combustible_Liquido} = 0$$

$$\text{init Gas} = 0$$

$$\text{init Solido} = 0$$

$d/dt(\text{Temperatura}) =$ if TIME <30 then R1 else if TIME <60 then R2 else if TIME <90 then R3 else if TIME < 120 then R4 else if TIME <150 then R5 else if TIME < 180 then R6 else if TIME < 210 then R7 else if TIME < 240 then R8 else if TIME < 270 then R9 else if TIME < 300 then R10 else if TIME < 330 then R11 else if TIME < 360 then R12 else if TIME < 390 then R13 else R14

$$d/dt(\text{HDPE}) = \text{if time} < 120 \text{ then } rw = 0 \text{ else-}rw$$

$$d/dt(\text{Combustible_Liquido}) = \text{if HDPE} = 50 \text{ then } 0 \text{ else } 0.85*rw$$

$$d/dt(\text{Gas}) = 0.12 * rw$$

$$d/dt(\text{Solido}) = 0.03 * rw$$

Figura 46. Código de la cinética promedio del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con el gradiente de temperatura de 8 °C cada 30 minutos para utilizarlo en el software Berkeley-Madonna.

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 270

DT = 0.02

$rw = (Kon * (HDPE - Wf)^z)$

$Kon = X * \exp(-Ea / (R * Temperatura))$

$X = 1.672E25$

$Ea = 234033.41612$

$R = 8.314$

$Wf = 0.3$

$z = 2.15304$

$R1 = ((T2 - T1) * \exp((ta - TIME) / a)) / (a * (1 + \exp((ta - TIME) / a)))$

$R2 = ((T3 - T2) * \exp((tb - TIME) / b)) / (b * (1 + \exp((tb - TIME) / b)))$

$R3 = ((T4 - T3) * \exp((tc - TIME) / c)) / (c * (1 + \exp((tc - TIME) / c)))$

$$R4 = ((T5-T4)*\exp((td-TIME)/d))/(d*(1+\exp((td-TIME)/d)))$$

$$R5 = ((T6-T5)*\exp((te-TIME)/e))/(e*(1+\exp((te-TIME)/e)))$$

$$R6 = ((T7-T6)*\exp((tf-TIME)/f))/(f*(1+\exp((tf-TIME)/f)))$$

$$R7 = ((T8-T7)*\exp((tg-TIME)/g))/(g*(1+\exp((tg-TIME)/g)))$$

$$R8 = ((T9-T8)*\exp((th-TIME)/h))/(h*(1+\exp((th-TIME)/h)))$$

$$T1 = 390$$

$$T2 = 395$$

$$T3 = 403$$

$$T4 = 411$$

$$T5 = 419$$

$$T6 = 427$$

$$T7 = 435$$

$$T8 = 443$$

$$T9 = 451$$

$$a = 1.23$$

$$b = 1.30$$

$$c = 0.81$$

$$d = 1.47$$

$$e = 1.15$$

$$f = 0.94$$

$$g = 1.63$$

$$h = 0.6$$

$$ta = 0.65$$

$$tb = 30.71$$

$$tc = 60.44$$

$$td = 90.8$$

te = 120.62

tf = 150.52

tg = 180.87

th = 210.32

init Temperatura = 390

init HDPE = 50

init Combustible_Liquido = 0

init Gas = 0

init Solido = 0

d/dt(Temperatura)= if TIME <30 then R1 else if TIME <60 then R2 else if
TIME <90 then R3 else if TIME < 120 then R4 else if TIME <150 then R5 else
if TIME <180 then R6 else if TIME < 210 then R7 else R8

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

d/dt(Combustible_Liquido) = if HDPE = 50 then 0 else 0.998*rw

d/dt(Gas) = 0.024*rw

d/dt(Solido) = 0.004*rw

Figura 47. Código de la cinética promedio del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con el gradiente de temperatura de 10 °C cada 30 minutos para utilizarlo en el software Berkeley-Madonna.

MODELO BERKELEY-MADONA CORRIDA 10C

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 270

$$DT = 0.02$$

$$rw = (Kon*(HDPE-Wf)^z)$$

$$Kon = X*\exp(-Ea/(R*Temperatura))$$

$$X = 1.1531E25$$

$$Ea = 230544.17109$$

$$R = 8.314$$

$$Wf = 0.8$$

$$z = 1.80899$$

$$R1 = ((T2-T1)*\exp((ta-TIME)/a))/(a*(1+\exp((ta-TIME)/a)))$$

$$R2 = ((T3-T2)*\exp((tb-TIME)/b))/(b*(1+\exp((tb-TIME)/b)))$$

$$R3 = ((T4-T3)*\exp((tc-TIME)/c))/(c*(1+\exp((tc-TIME)/c)))$$

$$R4 = ((T5-T4)*\exp((td-TIME)/d))/(d*(1+\exp((td-TIME)/d)))$$

$$R5 = ((T6-T5)*\exp((te-TIME)/e))/(e*(1+\exp((te-TIME)/e)))$$

$$R6 = ((T7-T6)*\exp((tf-TIME)/f))/(f*(1+\exp((tf-TIME)/f)))$$

$$R7 = ((T8-T7)*\exp((tg-TIME)/g))/(g*(1+\exp((tg-TIME)/g)))$$

$$R8 = ((T9-T8)*\exp((th-TIME)/h))/(h*(1+\exp((th-TIME)/h)))$$

$$T1 = 380$$

$$T2 = 390$$

$$T3 = 400$$

$$T4 = 410$$

T5 = 420

T6 = 430

T7 = 440

T8 = 450

T9 = 460

a = 1.23

b = 1.30

c = 1.39

d = 1.47

e = 1.15

f = 0.94

g = 1.63

h = 0.6

ta = 0.65

tb = 30.71

tc = 60.76

td = 90.8

te = 120.62

tf = 150.52

tg = 180.87

th = 210.32

init Temperatura = 380

init HDPE = 50

init Combustible_Liquido = 0

init Gas = 0

init Solido = 0

$d/dt(\text{Temperatura}) = \text{if TIME} < 30 \text{ then R1 else if TIME} < 60 \text{ then R2 else if TIME} < 90 \text{ then R3 else if TIME} < 120 \text{ then R4 else if TIME} < 150 \text{ then R5 else if TIME} < 180 \text{ then R6 else if TIME} < 210 \text{ then R7 else R8}$

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

$d/dt(\text{Combustible_Liquido}) = \text{if HDPE} = 50 \text{ then } 0 \text{ else } 0.888 * \text{rw}$

$d/dt(\text{Gas}) = 0.09 * \text{rw}$

$d/dt(\text{Solido}) = 0.02 * \text{rw}$

G. ANÁLISIS DE ERROR

Ecuación 19. Determinación de la media.

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

Donde:

X_i = Conjunto de observaciones

N = Número de observaciones

Ejemplo del cálculo de la media para datos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad.

$$\bar{X} = \frac{45,176 + 45,142 + 45,148}{3} = 45,155.3 \text{ J/g}$$

Este cálculo se hizo de la misma forma para todos los cálculos que necesitan de la media de los datos obtenidos durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a rampas de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos.

Ecuación 20. Determinación de la desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

X_i = Conjunto de observaciones

\bar{X} = Media

n = Número de observaciones

Ejemplo del cálculo de la desviación estándar durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(45,176 - 45,155.3)^2 + (45,142 - 45,155.3)^2 + (45,148 - 45,155.3)^2}{3 - 1}} = 18.15$$

Este cálculo se hizo de la misma forma para todos los cálculos que necesitan de la desviación estándar de los datos experimentales obtenidos durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a rampas de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos.

Ecuación 21. Determinación del intervalo de confianza al 95%.

$$I.C. = \bar{X} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

\bar{X} = Media

n = Número de observaciones

σ = Desviación Estándar

t = Valor de área en distribución t-student

Ejemplo del cálculo del intervalo de confianza.

$$I.C._{min} = 45,155.3 - 2.1318 \frac{18.15}{\sqrt{3}}$$

$$I.C._{min} = 45132.96 \text{ J/g}$$

$$I.C._{max} = 45,155.3 + 2.1318 \frac{18.15}{\sqrt{3}}$$

$$I.C._{max} = 45177.64 \text{ J/g}$$

Este cálculo se hizo de la misma forma para todos los cálculos de intervalo de confianza de los datos experimentales obtenidos durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a rampas de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos.

Ecuación 22. Determinación del coeficiente de variación.

$$C.V. = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100\%$$

Donde:

\bar{X} = Media

σ = Desviación Estándar

Ejemplo del cálculo del coeficiente de variación de datos experimentales.

$$C.V. = \frac{18.15}{45,155.3} * 100\%$$

$$C.V. = 0.04\%$$

Este cálculo se hizo de la misma forma para todos los cálculos de coeficiente de variación que involucraban datos experimentales obtenidos durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a rampas de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos.

Ecuación 23. Incertidumbre de multiplicación/división

$$S = \sigma \sqrt{\left(\frac{\text{Incertidumbre}}{X_i}\right)^2 + \left(\frac{\text{Incertidumbre}}{X_{i+1}}\right)^2 + \dots}$$

Donde:

S = Incertidumbre

\bar{X} = Desviación Estándar

X_i = Conjunto de observaciones

Ejemplo del cálculo de incertidumbre de multiplicación y división.

$$S = 45,155.3 \sqrt{\left(\frac{1.00}{45,176}\right)^2 + \left(\frac{1.00}{45,142}\right)^2 + \left(\frac{1.00}{45,148}\right)^2}$$

$$S = 1.7 J/g$$

Este cálculo se hizo de la misma forma para todos los cálculos de incertidumbre que involucraban la multiplicación y división entre datos experimentales obtenidos durante el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a rampas de 5°C cada 30 minutos, 8°C cada 30 minutos y 10°C cada 30 minutos.