

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Pirólisis de aceite de motor usado para la obtención de combustible
líquido a escala de laboratorio**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Marcos Ronaldo
Mazariegos Maldonado para optar al grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Química

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Pirólisis de aceite de motor usado para la obtención de combustible
líquido a escala de laboratorio**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Marcos Ronaldo
Mazariegos Maldonado para optar al grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Química

Guatemala,

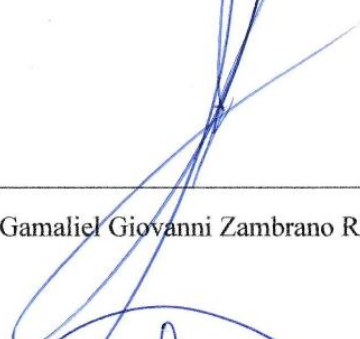
2025

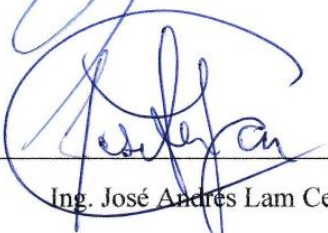
Vo. Bo.:

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González, M. Sc.

Tribunal Examinador

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González, M. Sc.

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M. Sc.

(f) 
Ing. José Andrés Lam Ceballos

Fecha de aprobación: Guatemala, 11 de diciembre de 2025

PREFACIO

Este trabajo de graduación surge como resultado del interés por aportar una alternativa energética sostenible e innovadora, centrada en la valorización del aceite de motor usado. Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por brindarme la fortaleza, la perseverancia y la oportunidad de llegar hasta este punto de mi formación académica.

Quiero agradecer a mi familia, por su apoyo incondicional en todo momento, por ser mi motivación constante y por inculcarme los valores que me han permitido alcanzar esta meta. A mis padres, por su esfuerzo y su presencia en cada paso de mi camino; a mi hermana, por sus palabras de aliento, compañía y cariño; y a mis amigos, quienes han compartido conmigo experiencias y aprendizajes inolvidables a lo largo de mi vida.

Agradezco profundamente a la Universidad del Valle de Guatemala, mi casa de estudios, por abrirme las puertas al conocimiento y a la investigación, en especial al Departamento de Ingeniería Química, que me formaron como profesional y me brindaron las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo. Mi más sincero reconocimiento a mi director de carrera, el Ing. Gamaliel Zambrano, por su guía, apoyo y motivación durante toda la carrera. A mi asesor, el Ing. Luis Núñez, por su valioso acompañamiento, orientación y consejos a lo largo del desarrollo de este trabajo. Extiendo mi agradecimiento a los docentes, técnicos y personal de laboratorio que colaboraron con su experiencia y conocimientos para hacer posible este trabajo.

Quiero extender mi agradecimiento al Departamento de Investigación de la Universidad del Valle de Guatemala, por el apoyo brindado en la realización de análisis fundamentales para este estudio, y al Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC) de Cementos Progreso, por su colaboración en la caracterización experimental de este trabajo de graduación.

Finalmente, deseo expresar un agradecimiento especial a la Fundación Juan Bautista Gutiérrez. Su apoyo y financiamiento hicieron posible mi formación académica y profesional, y me han permitido alcanzar esta meta que representa no solo un logro personal, sino también un compromiso con mi país y con quienes han confiado en mí.

ÍNDICE

LISTADO DE CUADROS	vi
LISTADO DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	4
III. OBJETIVOS	6
IV. MARCO TEÓRICO.....	7
A. Aceite lubricante de motor	7
B. Problemática ambiental de aceites lubricantes usados	13
C. Balance de masa	18
D. Balance de energía.....	19
E. Pirólisis.....	20
F. Propiedades fisicoquímicas	27
G. Combustibles tradicionales.....	28
H. Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS).....	29
V. ANTECEDENTES	32
VI. METODOLOGÍA	39
VII. RESULTADOS	51
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
IX. CONCLUSIONES	71
X. RECOMENDACIONES	73
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
XII. ANEXOS	84
A. Balances de masa y energía.....	84
B. Ecuaciones	88
C. Datos originales	95

D. Cálculos de muestra.....	122
E. Análisis de error	128
F. Datos calculados.....	131
G. Fichas técnicas de productos	147
H. Figuras complementarias.....	149
XIII. GLOSARIO	152

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Datos estadísticos de la viscosidad del aceite de motor usado medida experimentalmente	52
Cuadro 2. Datos estadísticos de densidad, humedad y cantidad de sólidos suspendidos del aceite de motor usado a pirolizar	53
Cuadro 3. Rendimiento másico de los productos en las rampas de temperatura empleadas para el proceso de pirólisis.....	53
Cuadro 4. Energía suministrada y entalpía de combustión en distintas rampas de pirólisis	54
Cuadro 5. Propiedades fisicoquímicas del combustible líquido obtenido en ambas rampas de temperatura comparado con combustibles convencionales	57
Cuadro 6. Compuestos presentes en el aceite de motor usado en la primera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	98
Cuadro 7. Compuestos presentes en el aceite de motor usado en la segunda corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	99
Cuadro 8. Compuestos presentes en el aceite de motor usado en la tercera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	100
Cuadro 9. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del aceite de motor usado a temperatura ambiente	101
Cuadro 10. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del aceite de motor usado a 40 °C.....	101
Cuadro 11. Pesos experimentales para cálculo de densidad del aceite de motor usado a temperatura ambiente	101
Cuadro 12. Datos para determinar la cantidad de residuos sólidos presentes en el aceite de motor usado a pirolizar.....	102
Cuadro 13. Datos para determinar la humedad presente en el aceite de motor usado ...	102
Cuadro 14. Recolección de datos de cada corrida para la construcción de la rampa de temperatura de 8 °C/30 minutos	103
Cuadro 15. Recolección de datos de cada corrida para la construcción de la rampa de temperatura de 12 °C/30 minutos	103

Cuadro 16. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/30 minutos de la primera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	104
Cuadro 17. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/30 minutos de la segunda corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	107
Cuadro 18. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/30 minutos de la tercera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	110
Cuadro 19. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min a temperatura ambiente	112
Cuadro 20. Pesos experimentales para cálculo de densidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min a temperatura ambiente	112
Cuadro 21. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 minutos de la primera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	113
Cuadro 22. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 minutos de la segunda corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	115
Cuadro 23. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 minutos de la tercera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	118
Cuadro 24. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min a temperatura ambiente	121
Cuadro 25. Pesos experimentales para cálculo de densidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min a temperatura ambiente	121
Cuadro 26. Poder calorífico del combustible líquido obtenido en la pirólisis con dos diferentes rampas de temperatura	121
Cuadro 27. Resumen de los compuestos presentes en el aceite de motor por medio de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	131
Cuadro 28. Viscosidad del aceite de motor usado a pirolizar.....	131

Cuadro 29. Densidad del aceite de motor usado a pirolizar	132
Cuadro 30. Cantidad de residuos sólidos en el aceite de motor usado a pirolizar.....	132
Cuadro 31. Rendimiento de cada corrida de pirólisis empleando la rampa de temperatura 8 °C/30 min	133
Cuadro 32. Rendimiento de cada corrida de pirólisis empleando la rampa de temperatura 12 °C/30 min	134
Cuadro 33. Resumen de los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 8 °C/30 min por el método de GC-MS.....	135
Cuadro 34. Resumen de los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 12 °C/30 min por el método de GC-MS.....	137
Cuadro 35. Composición porcentual del área bajo la curva del GC-MS con respecto al número de carbonos por cadena.....	138
Cuadro 36. Composición porcentual del área bajo la curva del GC-MS con respecto al peso molecular de los compuestos de ambas rampas	139
Cuadro 37. Viscosidad del combustible líquido obtenido de la pirólisis aceite de motor	140
Cuadro 38. Densidad combustible líquido obtenido de la pirólisis aceite de motor usado	140
Cuadro 39. Datos estadísticos de densidad y viscosidad para el combustible líquido de la rampa de 8 °C/30 minutos.....	141
Cuadro 40. Datos estadísticos de densidad y viscosidad para el combustible líquido de la rampa de 12 °C/30 minutos.....	141
Cuadro 41. Poder calorífico de los productos de pirólisis a distintas rampas de temperatura	141
Cuadro 42. Balance energético interno del reactor de pirólisis	142
Cuadro 43. Cálculo de entalpía de combustión mediante los compuestos presentes en el aceite de motor usado.....	142
Cuadro 44. Cálculo de entalpía de combustión mediante los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 8 °C/30 min	143
Cuadro 45. Cálculo de entalpía de combustión mediante los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 12 °C/30 min	145

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Aceite lubricante de motor de combustión interna vertido en vehículo	7
Figura 2. Aceites lubricantes de motor en presentaciones según su viscosidad y uso.....	10
Figura 3. Espectrograma GC-FID de aceite de motor 10W-30	11
Figura 4. Espectrograma GC-FID de aceite de motor 5W-40	11
Figura 5. Aceite de motor usado siendo retirado de un vehículo	14
Figura 6. Aceite de motor usado propagado en masas de agua y suelos	15
Figura 7. Representación general del balance de masa.....	19
Figura 8. Representación gráfica de pirólisis a escala de laboratorio.....	21
Figura 9. Ejemplo de productos de un proceso de pirólisis con materia orgánica.....	26
Figura 10. Comparación gráfica de la diferencia de viscosidad entre los diferentes aceites lubricantes multigrado	28
Figura 11. Esquema de cromatografía de gases.....	30
Figura 12. Esquema del registro por cromatografía de gases	31
Figura 13. Modelo del reactor empleado en pruebas elaborado en Autodesk Inventor 2016.....	34
Figura 14. Montaje experimental para sistema de pirólisis	45
Figura 15. Análisis termogravimétrico de aceite de motor usado	51
Figura 16. Distribución de número de carbonos por cadena de los compuestos presentes en el aceite de motor usado a pirolizar.....	51
Figura 17. Distribución de peso molecular de los compuestos presentes en el aceite de motor usado a pirolizar	52
Figura 18. Comparación gráfica de las rampas de temperatura planteadas.....	54
Figura 19. Distribución de número de carbonos por cadena del producto de la.....	55
rampa 8 °C / 30 min	55
Figura 20. Distribución de número de carbonos por cadena del producto de la.....	55
rampa 12 °C / 30 min	55
Figura 21. Distribución de peso molecular de los compuestos del producto de la.....	56
rampa 8 °C / 30 min	56
Figura 22. Distribución del peso molecular de los compuestos del producto de la.....	57
rampa 12 °C / 30 min	57

Figura 23. Balance de masa del proceso de pirólisis en la rampa 8 °C/30 min	84
Figura 24. Balance de masa del proceso de pirólisis en la rampa 12 °C/30 min	85
Figura 25. Balance de energía del proceso de pirólisis en la rampa 8 °C/30 min	86
Figura 26. Balance de energía del proceso de pirólisis en la rampa 12 °C/30 min	87
Figura 27. Primer análisis termogravimétrico de aceite de motor usado	95
Figura 28. Segundo análisis termogravimétrico de aceite de motor usado	96
Figura 29. Tercer análisis termogravimétrico de aceite de motor usado	97
Figura 30. Espectrograma de la primera corrida GC-Masa del aceite de motor usado a pirolizar	98
Figura 31. Segundo espectrograma GC-Masa del aceite de motor usado a pirolizar	99
Figura 32. Tercer espectrograma GC-Masa del aceite de motor usado a pirolizar	100
Figura 33. Primer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min	106
Figura 34. Segundo espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 8 °C/30 min	109
Figura 35. Tercer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 8 °C/30 min	111
Figura 36. Primer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min	114
Figura 37. Segundo espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 12 °C/30 min	117
Figura 38. Tercer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 12 °C/30 min	120
Figura 39. Rampa de temperatura con aumentos de 8 °C y tiempo de residencia de 30 minutos	133
Figura 40. Rampa de temperatura con aumentos de 12 °C y tiempo de residencia de 30 minutos	135
Figura 41. Ficha técnica de producto de rampa de 8 °C/30 min	147
Figura 42. Ficha técnica de producto de rampa de 12 °C/30 min	148
Figura 43. Combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 8 °C con 30 minutos de residencia en el reactor...	149

Figura 44. Char obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 8 °C con 30 minutos de residencia en el reactor.....	149
Figura 45. Combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 12 °C con 30 minutos de residencia en el reactor	150
Figura 46. Char obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 12 °C con 30 minutos de residencia en el reactor.....	150
Figura 47. Recolección de combustible líquido de la pirólisis de aceite de motor usado	151
Figura 48. Montaje de reactor de pirólisis y condensador	151

RESUMEN

El presente trabajo de graduación presenta el análisis y resultados obtenidos del proceso de pirólisis de aceite de motor usado, teniendo como objetivo principal identificar una potencial aplicación de dicho residuo por medio de la producción de combustibles líquidos. El estudio busca cuantificar el rendimiento de los productos a diferentes condiciones de operación, caracterizar el combustible líquido obtenido y determinar su potencial energético en comparación con combustibles convencionales.

Para alcanzar dicho objetivo, se realizó la caracterización inicial del aceite de motor usado en vehículos automotrices mediante análisis fisicoquímicos, y posteriormente se llevaron a cabo corridas de pirólisis bajo dos diferentes rampas de temperatura, iniciando en 380 °C con tiempos de residencia en el reactor de 30 minutos, con el fin de establecer su influencia en el rendimiento de productos líquidos, sólidos y gaseosos. Asimismo, se cuantificó la energía suministrada al sistema para la pirólisis de 40.0 g de aceite de motor usado, siendo de 55,710 kJ para la rampa con aumentos de 8 °C y 38,997 kJ para la rampa con aumentos de 12 °C, obteniendo así 1749.53 kJ y 1714.39 kJ al quemar los productos de las respectivas rampas.

Los resultados de distribución de número de carbonos y peso molecular evidenciaron un predominio de hidrocarburos de cadena media (C₉, C₁₄ y C₁₅) para ambas rampas, donde la rampa de temperatura con aumentos de 12 °C y 30 minutos de residencia mostró con mayor proporción de fracciones ligeras (C₇-C₁₁) con respecto a la rampa de 8 °C/30 min, 35.0 % frente 29.9 %. Dicho comportamiento fue respaldado debido al predominio de compuestos con menor peso molecular (100-160 g/mol) de 34.5 % frente a 30.0 %. Además, permitió obtener el mayor rendimiento de combustible líquido con un 74.8 ± 0.43 % en fracción másica, con una densidad de 818.6 ± 7.54 kg/m³, una viscosidad 0.930 ± 0.011 mm²/s y un poder calorífico de 45023.3 ± 111.7 J/g, comparable al de combustibles comerciales como la gasolina y el diésel, que presentan rangos de 43,500 – 44,500 kJ/g y 42,500 – 46,000 kJ/g respectivamente.

En conclusión, la pirólisis de aceite de motor usado presenta viabilidad técnica como alternativa de valorización energética de este residuo, contribuyendo tanto a la

reducción de impactos ambientales asociados a su inadecuada disposición como a la generación de un combustible líquido con propiedades aptas para su aprovechamiento energético.

I. INTRODUCCIÓN

El aceite de motor es un insumo indispensable en la operación de vehículos y maquinaria industrial, ya que cumple la función de lubricar, enfriar y proteger las partes móviles de los motores de combustión interna. Sin embargo, durante su uso este fluido sufre un proceso de degradación térmica y mecánica que modifica su estructura química, incorporando aditivos metálicos y productos de la combustión incompleta, como hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y compuestos oxigenados. Una vez pierde sus propiedades lubricantes, el aceite de motor usado es considerado un residuo peligroso por su alta capacidad contaminante (Akintunde et al., 2015).

La gestión de residuos peligrosos representa uno de los principales desafíos ambientales en la actualidad, particularmente en países en vías de desarrollo como Guatemala, donde las prácticas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos aún son limitadas. Entre estos desechos, el aceite de motor usado destaca debido a que un vertido inadecuado de este residuo en suelos o cuerpos de agua, ocasionan impactos severos dado que el aceite es insoluble, se adhiere fácilmente a superficies y se degrada de manera muy lenta, lo que favorece su permanencia en el ambiente (EPA, 2025). En el suelo, este residuo modifica parámetros fisicoquímicos como el pH, la aireación y la estructura, además de afectar la microbiota esencial para mantener la fertilidad, lo que repercute directamente en la productividad agrícola (ICAS, 2024).

Adicionalmente, cuando el aceite de motor usado se quema sin control, libera al aire compuestos peligrosos como metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), que son reconocidos por su potencial carcinogénico. Estos contaminantes pueden causar problemas respiratorios, neurológicos y efectos adversos en la salud a largo plazo (Green City Times, 2024). Frente a este panorama, se hace necesario explorar alternativas de valorización que permitan no solo mitigar estos efectos, sino también recuperar parte del valor energético contenido en dichos residuos.

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone distintos materiales al someterlos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo que evita la combustión y da lugar a la transformación de la materia, misma que se distribuye en gas, combustible rico

en hidrocarburos ligeros, en un residuo sólido carbonoso con aplicaciones potenciales como material adsorbente o precursor de carbón activado y la fracción líquida, misma que puede ser aprovechada en motores de combustión interna (Castells & García, 2012). Este aceite pirolítico presenta un potencial de aplicación directa en motores de combustión interna o en sistemas energéticos tras procesos de refinamiento. En contraste, el aceite de motor usado carece de factibilidad para su uso directo como combustible debido a la presencia de metales pesados, aditivos degradados y contaminantes derivados de la combustión, los cuales provocan daños en los motores y aumentan la emisión de sustancias tóxicas (GCT, 2024). La pirólisis, en cambio, permite transformar este residuo dañino al ambiente en un producto energético utilizable, constituyendo así una estrategia efectiva tanto de gestión ambiental como de aprovechamiento de recursos.

La caracterización del combustible líquido obtenido mediante pirólisis requiere de un conjunto de análisis fisicoquímicos que permitan determinar su viabilidad energética y su posible aplicación como sustituto de combustibles fósiles. Entre estos, la densidad y la viscosidad son parámetros fundamentales para evaluar su comportamiento en sistemas de combustión e inyección; el poder calorífico superior e inferior permite estimar la cantidad de energía disponible por unidad de masa; y técnicas como la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) permiten identificar la composición química (Veses et al., 2021). Además, es esencial realizar un análisis energético considerando la energía suministrada al sistema con relación a la energía requerida en el proceso y la energía contenida en los productos generados. La entalpía de combustión, definida como el cambio de energía interna asociado a la reacción de oxidación completa de una sustancia a presión constante (Smith et al., 2019). Este parámetro proporciona una medida directa del potencial energético del combustible líquido y constituye una base de comparación con combustibles convencionales.

En este estudio de investigación se realizó el proceso de pirólisis de aceite de motor usado, para evaluar el producto líquido y poder comparar sus características fisicoquímicas con combustibles convencionales. Para ello, se realizó una caracterización de la materia prima, se construyeron dos rampas de temperatura donde se identificaron los rendimientos máxicos del proceso de pirólisis, se comparó su balance energético y se

llevaron a cabo los análisis fisicoquímicos de los productos de ambas rampas empleadas.

II. JUSTIFICACIÓN

El aceite de motor lubricante es uno de los insumos industriales más utilizados a nivel mundial, ya que permite reducir la fricción, disipar el calor y proteger los motores de combustión interna en vehículos y maquinaria. Se estima que anualmente se consumen alrededor de 36 millones de toneladas de lubricantes a nivel global, de las cuales aproximadamente el 50 % corresponde a aceites de motor (ILMA, 2021). Sin embargo, tras su uso, este residuo se convierte en un contaminante altamente peligroso debido a la presencia de metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y aditivos degradados, que al disponerse inadecuadamente generan impactos negativos en suelos, cuerpos de agua y salud humana. A pesar de su importancia en el sector automotriz e industrial, se calcula que solo entre un 40 % y 60 % del aceite usado se recolecta para algún tipo de tratamiento o reciclaje, mientras que el resto suele ser vertido al ambiente sin control (UNEP, 2020). Esta situación evidencia la necesidad de proponer alternativas tecnológicas que permitan valorizar el aceite de motor usado, reduciendo su carga contaminante y aprovechando su potencial energético.

En Guatemala, la gestión deficiente del aceite de motor usado representa un reto ambiental considerable. Una fracción de este material usado termina siendo arrojado en cuerpos de agua, suelos o descartado junto con otros residuos, provocando daños graves que impactan tanto a la flora y fauna como a las comunidades aledañas (Guillén, 2007). A pesar de la existencia de regulaciones para la manipulación de estos desechos, la falta de infraestructura, programas de reciclaje efectivos y supervisión rigurosa agrava el problema. Asimismo, la poca sensibilización y formación ecológica de la ciudadanía, y de los sectores industriales contribuye que este tipo de fluidos se viertan indiscriminadamente, afectando la biodiversidad como también aumentando el riesgo para la salud humana (Tovar et al., 2007).

La pirólisis de aceite de motor usado surge como una alternativa efectiva para dar valor a un residuo que, de otro modo, representa un riesgo ambiental significativo y se encuentra en proporciones considerables en el contexto industrial y automovilístico tanto a nivel mundial, como en Guatemala. Aunque el aceite de motor usado se encuentra en

estado líquido, no es apto para su uso directo como combustible debido a la presencia de aditivos degradados, metales pesados y compuestos de alto peso molecular que afectan negativamente los sistemas de combustión interna. En este sentido, la pirólisis no busca un cambio de estado físico, sino una transformación química del residuo, orientada a romper cadenas largas de hidrocarburos y generar fracciones más ligeras y energéticamente aprovechables. Por ello, este proceso adquiere sentido únicamente cuando el objetivo es la obtención de un combustible líquido con propiedades comparables a las de combustibles convencionales, destinado a su uso en motores de combustión interna, así como la generación de subproductos sólidos y gaseosos con aplicaciones energéticas o industriales diversas. A pesar del potencial energético que tiene este residuo, en Guatemala no se evidencian estudios documentados que evalúen de manera detallada cómo varían los rendimientos de cada producto según las condiciones de operación, así como su eficiencia energética y su viabilidad como combustible.

Por ello, el presente trabajo realizado a escala de laboratorio proporciona información técnica que puede servir de referencia para un posible escalamiento del proceso, establecer rampas de temperatura que favorezcan la generación de los distintos productos y conocer fisicoquímicamente tanto la materia prima como el producto líquido de la pirólisis. Esto por medio de la caracterización fisicoquímica del aceite de motor realizada, las rampas de temperatura planteadas y construidas en el rango de temperatura determinado con sus respectivos rendimientos máximos de cada uno de los productos, así como la caracterización realizada a ambos combustibles líquidos obtenidos y su comparación con combustibles tradicionales.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

1. Pirolizar aceite de motor usado con el fin de obtener combustible líquido y así proponer una potencial aplicación de dicho residuo.

B. Objetivos específicos

1. Caracterizar el aceite de motor usado para conocer sus propiedades físicas y químicas, con el fin de controlar las condiciones iniciales del proceso.
2. Determinar el rendimiento del combustible líquido con dos diferentes rampas de temperatura empleando un sistema de pirólisis para comparar su viabilidad energética.
3. Caracterizar el producto líquido obtenido por medio de análisis fisicoquímicos para compararlo con combustibles tradicionales.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Aceite lubricante de motor

El aceite lubricante de motor es un elemento esencial para el funcionamiento eficiente de los motores de combustión interna. Su principal objetivo es reducir la fricción entre las piezas móviles, lo que disminuye el desgaste y prolonga la vida útil del motor. Además, actúa como un medio de enfriamiento, disipando el calor generado por la combustión y la fricción. Este aceite también contribuye a la limpieza del motor al transportar partículas y residuos hacia el filtro de aceite, evitando su acumulación en las superficies internas. Adicionalmente, el aceite lubricante forma una película protectora que previene la corrosión y la oxidación de las superficies metálicas, y ayuda a sellar los espacios entre los pistones y las paredes del cilindro, mejorando la eficiencia y el desempeño del motor (Arellano, 2010).

Está formado por una fase mayoritaria de aceites base, fracciones hidrocarbónicas con un rango amplio de pesos moleculares, y un paquete de aditivos diseñados para conferir propiedades específicas (anti-desgaste, detergencia, antioxidación, control de espuma, entre otras). En servicio, el aceite sufre transformaciones químicas y físicas como por ejemplo; consumo de aditivos, formación de productos oxidados, incorporación de combustión y desgaste, que lo convierten en aceite usado, con propiedades y riesgos muy distintos al producto virgen (Zięba & Kościelniak, 2000).

Figura 1. Aceite lubricante de motor de combustión interna vertido en vehículo



Fuente: LUFILSUR

1. Composición química

El aceite lubricante base representa entre el 70 % y el 90 % del total, y puede ser

de origen mineral, sintético o semisintético. Este componente define las propiedades físicas y químicas del lubricante, como su viscosidad y estabilidad térmica. Los aditivos, que conforman entre el 10 % y el 30 % del aceite, son compuestos químicos que mejoran sus características o le otorgan funciones específicas. Estos aditivos incluyen antioxidantes, detergentes, inhibidores de corrosión y mejoradores de viscosidad, entre otros, que optimizan el rendimiento y extienden la vida útil del aceite (Vimos & Coro, 2021).

2. Tipos de aceites lubricantes según su base

Los aceites minerales se obtienen directamente del refinamiento del petróleo, por lo que su composición química está constituida mayormente por una mezcla de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, con cadenas de carbono que generalmente oscilan entre C_{15} y C_{50} . Este tipo de aceite presenta una distribución más heterogénea de moléculas, lo que se traduce en propiedades menos estables frente a la oxidación y mayores variaciones en la viscosidad a diferentes temperaturas. En contraste, los aceites sintéticos se producen a partir de procesos de síntesis química controlada, lo que permite obtener bases lubricantes con estructuras moleculares más uniformes, generalmente compuestas por polialfaolefinas (PAO), ésteres y otros derivados químicos de mayor pureza (Zięba & Kościelniak, 2000).

La diferencia fundamental entre ambos tipos radica en el nivel de control sobre la composición y, en consecuencia, en las propiedades fisicoquímicas que ofrecen. Los aceites sintéticos presentan un desempeño superior en condiciones extremas de temperatura, manteniendo la viscosidad más estable y mostrando mayor resistencia a la oxidación y a la formación de depósitos. Además, su índice de viscosidad suele ser más alto, lo que se traduce en una menor dependencia de la temperatura. Por el contrario, los aceites minerales, aunque más económicos y ampliamente utilizados, muestran una degradación más acelerada bajo altas temperaturas y condiciones severas de operación, favoreciendo la formación de lodos y compuestos oxidados (Zhang et al., 2020).

3. Clasificación de aceites lubricantes según su uso

Desde el punto de vista de su aplicación, los aceites lubricantes pueden clasificarse en aceites para motores de combustión interna y aceites industriales. Los

aceites para motores están formulados específicamente para operar bajo ciclos térmicos variables, presencia de combustión interna y contacto directo con subproductos de la combustión, como hollín y gases ácidos. En contraste, los aceites industriales, como los hidráulicos, de engranajes o turbinas, operan en sistemas cerrados con condiciones más controladas, lo que resulta en mecanismos de degradación diferentes. Esta distinción es relevante, ya que el aceite de motor usado presenta un nivel de deterioro químico y contaminación significativamente mayor en comparación con otros aceites industriales (Akintunde et al., 2015).

Los aceites lubricantes para motores de combustión interna presentan formulaciones diferenciadas según el tipo de motor al que están destinados, siendo los motores diésel y gasolina los más representativos en el sector automotriz. Los motores diésel operan bajo mayores relaciones de compresión y generan una mayor cantidad de subproductos de combustión, como hollín y compuestos ácidos, lo que exige aceites con una mayor capacidad detergente y dispersante. En consecuencia, los aceites para motores diésel contienen paquetes de aditivos más robustos, diseñados para mantener en suspensión partículas sólidas y neutralizar ácidos formados durante la combustión (Tormos et al., 2016).

Por otro lado, los aceites para motores a gasolina están formulados para operar en condiciones de temperatura más variables y regímenes de revoluciones más elevados, priorizando la estabilidad térmica y la protección contra la oxidación. Estos aceites suelen presentar menores niveles de detergentes en comparación con los aceites diésel, ya que la generación de hollín es menos significativa. Además, las diferencias en los sistemas de postratamiento de gases de escape, como catalizadores en motores a gasolina y filtros de partículas en motores diésel, influyen directamente en la selección de aditivos, limitando el contenido de cenizas sulfatadas, fósforo y azufre según las normativas vigentes (Tormos et al., 2016).

Estas diferencias en la formulación afectan directamente el comportamiento del aceite durante su vida útil y condicionan la composición del aceite de motor usado, especialmente en términos de contenido de sólidos, metales y productos de degradación. Por ello, la distinción entre aceites diésel y gasolina resulta relevante para la evaluación de procesos de tratamiento y valorización, como la pirólisis, donde la naturaleza del

residuo influye en la distribución y características de los productos obtenidos (Kipkorir et al., 2021).

4. Contexto automotriz

Los aceites lubricantes representan un insumo esencial para el correcto funcionamiento y la durabilidad de los motores de combustión interna. En el contexto guatemalteco, los aceites lubricantes más empleados en automóviles pueden corresponder principalmente a la clasificación multigrado establecida por la SAE, en viscosidades del rango W-30, W-40 y W-50 debido al parque vehicular propio del país (SAT, 2023). Dentro de estas, el 20W-50 se prevé como el más utilizado debido a la gran cantidad de vehículos antiguos y con mayor desgaste presentes en el parque automotor, mientras que el 15W-40 es frecuente en motores diésel de transporte y trabajo. Por otro lado, lubricantes como 10W-30, 5W-30 y 5W-40 han ido cobrando relevancia en automóviles modernos, ya que permiten un arranque más eficiente y ahorro de combustible gracias a su menor viscosidad (Torres et al., 2020).

Figura 2. Aceites lubricantes de motor en presentaciones según su viscosidad y uso



Fuente: Mobil México

5. Base lubricante

Para ilustrar la magnitud y diversidad de estas cadenas de carbono presentes en los aceites lubricantes, las imágenes extraídas del texto Library of Petroleum Products and Other Organic Compounds, permiten observar la variedad estructural de compuestos

que conforman tanto los aceites minerales como los sintéticos y facilitan comprender la base química sobre la cual se desarrollan los lubricantes (ALS Global, 2010).

Figura 3. Espectrograma GC-FID de aceite de motor 10W-30

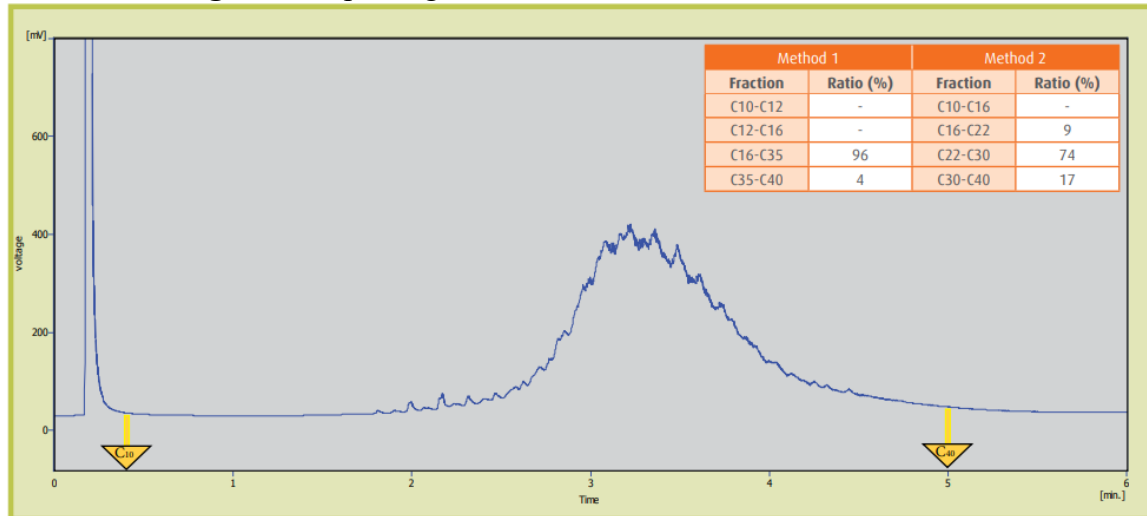


Fig.24 Madit Emol SAE 10W-30

Fuente: Library of Petroleum Products and Other Organic Compounds

Figura 4. Espectrograma GC-FID de aceite de motor 5W-40

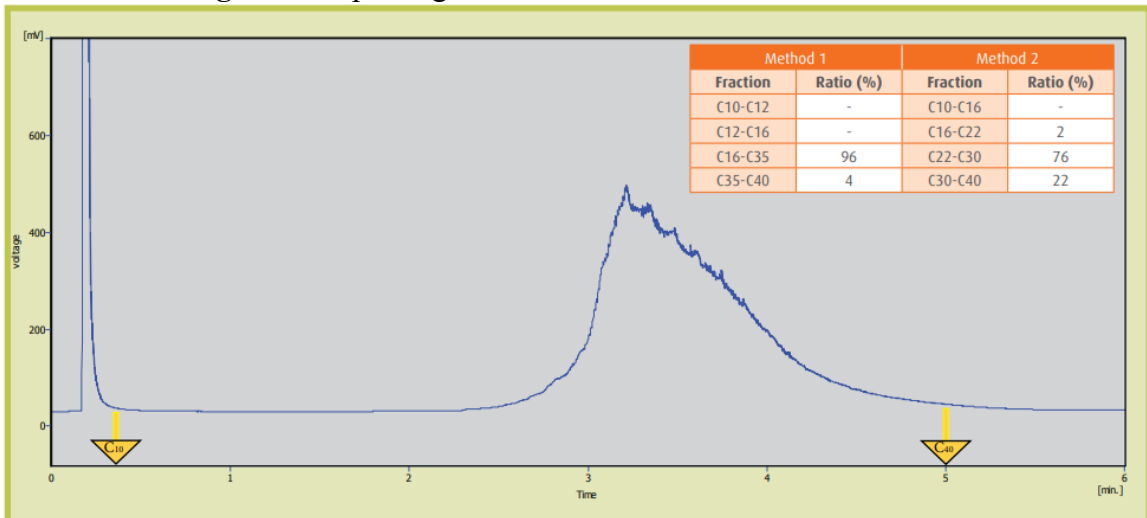


Fig.20 Mogul Racing 5W-40

Fuente: Library of Petroleum Products and Other Organic Compounds

Los cromatogramas extraídos mediante el método GC-FID para aceites lubricantes multigrado de tipo W-30 y W-40 reflejan la complejidad de su composición en términos de hidrocarburos presentes. De manera general, se observa que los aceites de

menor viscosidad, como los W-30, presentan una distribución del 74 % en el rango de C₂₂ a C₃₀, lo cual favorece su fluidez a bajas temperaturas. En el aceite W-40, la señal cromatográfica muestra un incremento en la proporción de cadenas más largas, aunque presenta una diferencia mínima con respecto al perfil anterior, esto se comprende debido al aumento de tamaño en las cadenas de carbonos aportan mayor estabilidad térmica y resistencia al adelgazamiento en condiciones de operación más severas (ALS Global, 2010). Finalmente, en los aceites W-50 se encuentran fracciones de mayor peso molecular, con predominio de C₂₂ a C₄₀, asociados a una viscosidad superior y a la capacidad de formar una película lubricante más robusta, adecuada para motores sometidos a altas cargas y temperaturas. En conjunto, la comparación de los perfiles cromatográficos permite identificar cómo el balance entre cadenas cortas y largas define las propiedades de desempeño que distinguen a cada tipo de aceite (Torres et al., 2020).

En un aceite de motor usado, la distribución de cadenas de carbono difiere significativamente de la observada en el aceite virgen debido a los procesos de degradación química y contaminación acumulada durante la operación del motor. Mientras que los aceites nuevos presentan una proporción equilibrada de cadenas alifáticas lineales y ramificadas, así como fracciones cicloalifáticas y aromáticas en rangos típicos de C₁₅ a C₅₀ según el grado de viscosidad, en el aceite usado se espera una degradación y reconfiguración de las cadenas de carbono, lo que puede llevar a una redistribución del número de carbonos en los compuestos presentes. Esto ocurre como consecuencia de la oxidación y polimerización de fracciones más ligeras, la acumulación de hollín y productos de combustión, y la pérdida parcial de hidrocarburos volátiles. Asimismo, se pueden detectar fragmentos oxidados y compuestos polares que no estaban presentes inicialmente (Alemu et al., 2025).

6. Aditivos y posibles contaminantes

Los aditivos son componentes esenciales que potencian las propiedades del aceite lubricante o le confieren funciones adicionales. Entre los aditivos más comunes están los antioxidantes, que reducen la oxidación del aceite, protegiéndolo de la degradación a altas temperaturas. Los detergentes son responsables de mantener limpias las superficies internas del motor al eliminar depósitos y prevenir la formación de lodos. Los aditivos

antidesgaste forman una barrera protectora entre las superficies metálicas en movimiento, reduciendo el contacto directo y minimizando el desgaste. Los mejoradores de viscosidad permiten que el aceite mantenga su fluidez en un rango amplio de temperaturas, garantizando su efectividad tanto en frío como en calor. Por último, los inhibidores de corrosión protegen las superficies metálicas del ataque químico provocado por ácidos y humedad (Tovar et al., 2007).

Con el uso, los aceites lubricantes acumulan diversos contaminantes que afectan su funcionalidad. Entre los más comunes se encuentran los productos de combustión, como hollín, carbono y partículas metálicas provenientes del desgaste de las piezas del motor. También se generan residuos de oxidación, que son compuestos formados por la descomposición del aceite a altas temperaturas. La presencia de agua y humedad puede causar la formación de emulsiones que reducen la capacidad de lubricación del aceite. Además, el combustible no quemado que se mezcla con el aceite disminuye su viscosidad, afectando su capacidad para formar una película protectora. Por último, con el tiempo, los aditivos del aceite se agotan, dejando al motor sin la protección necesaria y aumentando el riesgo de daños (Guerrero, 2016).

B. Problemática ambiental de aceites lubricantes usados

El manejo inadecuado de los aceites lubricantes usados representa un desafío ambiental significativo debido a su composición tóxica. Este residuo contiene hidrocarburos y aditivos químicos que, al degradarse, generan sustancias dañinas para el medio ambiente. Además, el uso prolongado de los aceites en motores da lugar a la acumulación de contaminantes, como metales pesados, residuos de combustión y compuestos tóxicos, lo que incrementa su peligrosidad. Si no se gestionan de manera adecuada, estos aceites pueden contaminar suelos, cuerpos de agua y afectar a los ecosistemas, generando un impacto negativo que se extiende por largos periodos (Coronado, 2016).

Figura 5. Aceite de motor usado siendo retirado de un vehículo



Fuente: ENEOS México

1. Disposición inadecuada

El manejo inadecuado de aceites lubricantes usados constituye una problemática ambiental relevante en Guatemala, debido a la alta generación de residuos por parte del parque automotor y la limitada infraestructura para su recolección y tratamiento. Se estima que gran parte del aceite usado generado en talleres mecánicos, estaciones de servicio y hogares termina siendo vertido directamente en suelos, ríos o sistemas de alcantarillado, contaminando fuentes de agua y afectando la biodiversidad acuática. Debido a su alta concentración de hidrocarburos, metales pesados y compuestos aromáticos, los cuales son difíciles de degradar y presentan toxicidad para organismos acuáticos y humanos (Akintunde et al., 2015).

En otros casos, su quema en condiciones no controladas genera emisiones de dióxido de carbono, partículas y compuestos tóxicos como dioxinas y furanos, que contribuyen al cambio climático y afectan la salud humana. Estas prácticas reflejan la necesidad urgente de gestionar adecuadamente este residuo peligroso (Massa et al., 2019).

Esta situación se ve agravada por la ausencia de normativas estrictas que regulen la gestión de estos residuos y por la limitada participación del sector privado en programas de recolección y reciclaje, lo que reduce significativamente las tasas de recuperación de aceites usados. Iniciativas locales, como programas de reciclaje impulsados por algunas municipalidades, han logrado recolectar solo un pequeño

porcentaje del total generado, evidenciando la necesidad de estrategias integrales que incluyan educación ambiental, incentivos económicos y normativas claras para mitigar los impactos ambientales y sanitarios del vertido de aceites lubricantes usados en el país (ECP Americas, 2023).

Figura 6. Aceite de motor usado propagado en masas de agua y suelos



Fuente: AUTOHAUS

2. Legislación y normativas sobre el manejo de residuos en Guatemala

En Guatemala, el manejo de aceites usados está parcialmente regulado por normativas ambientales que buscan minimizar su impacto negativo en el entorno. La Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto 68-86) establece los principios básicos para la gestión adecuada de residuos peligrosos, incluido el aceite usado, enfatizando la responsabilidad de las empresas generadoras de minimizar los efectos dañinos de sus actividades. Además, el Reglamento para el Manejo de Residuos y Desechos Peligrosos (Acuerdo Gubernativo 264-2019) detalla las obligaciones específicas para la recolección, almacenamiento, transporte y disposición final de los aceites usados, clasificándolos como un residuo peligroso debido a su contenido de hidrocarburos y contaminantes como metales pesados (Congreso de la República de Guatemala, 1986).

Este reglamento exige que las empresas que manejan aceites usados registren sus actividades ante el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y cumplan con protocolos que garanticen la trazabilidad del residuo desde su generación hasta su disposición final. Sin embargo, la implementación de estas normativas enfrenta desafíos,

como la falta de infraestructura adecuada, una supervisión limitada y el desconocimiento de las regulaciones por parte de pequeñas y medianas empresas, lo que lleva a prácticas no reguladas, como el vertido en suelos o cuerpos de agua (Valdés & Adán, 2000).

3. Legislación y normativas sobre el manejo de aceite de motor usado a nivel internacional

A nivel internacional, el aceite lubricante usado es reconocido como un residuo que requiere manejo especial debido a su potencial contaminante. Diversas normativas y organismos reguladores establecen lineamientos específicos para su gestión, orientados a prevenir impactos ambientales y riesgos a la salud humana. En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) clasifica el aceite usado como un residuo sujeto a regulaciones específicas bajo el marco del Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), prohibiendo su vertido al suelo, alcantarillado o cuerpos de agua, así como su combustión sin control. Estas regulaciones promueven su recolección, almacenamiento seguro y tratamiento mediante procesos autorizados (EPA, 2025).

En la Unión Europea, la Directiva Marco de Residuos establece una jerarquía de gestión para los aceites usados, priorizando la regeneración y el reciclaje por encima de la eliminación o valorización energética. Esta normativa exige que los Estados miembros implementen sistemas de recolección separados y promuevan tecnologías que permitan recuperar el mayor valor posible del residuo. Asimismo, organismos internacionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) reconocen al aceite usado como un residuo peligroso, recomendando su tratamiento mediante procesos que reduzcan su toxicidad y favorezcan su aprovechamiento energético bajo condiciones controladas (UNEP, 2012).

Estas regulaciones coinciden en señalar que el aceite lubricante usado no debe considerarse un residuo convencional, sino un material que requiere procesos tecnológicos específicos para su manejo adecuado, lo que justifica la investigación y evaluación de alternativas como la pirólisis (UNEP, 2012).

4. Métodos actuales de reciclaje en Guatemala

En Guatemala, los métodos de reciclaje y disposición de aceites usados aún son limitados y dependen en gran medida de iniciativas privadas y esfuerzos de colaboración con organismos internacionales. Uno de los métodos más comunes es el

coprocesamiento, en el que el aceite usado es utilizado como combustible alternativo en hornos de cemento bajo condiciones controladas. Este proceso no solo permite una disposición segura, sino que también contribuye a la economía circular al reducir el consumo de combustibles fósiles tradicionales (García, 2021).

Entre estas iniciativas se encuentran empresas como Planta Ecológica Repremar, que cuenta con experiencia en el manejo integral de aceites usados y residuos derivados del petróleo, incluyendo su recolección y tratamiento bajo esquemas de control ambiental. Asimismo, operan empresas especializadas en la gestión de residuos industriales y oleosos, como Grupo ECOIL y ECOIL Services, las cuales brindan servicios de recolección y manejo de aceites lubricantes usados para su valorización energética o disposición controlada. Adicionalmente, existen centros de reciclaje y gestores ambientales que, aunque no se enfocan exclusivamente en aceites lubricantes, participan en esquemas de manejo responsable de residuos automotrices. No obstante, la cobertura de estas empresas se concentra principalmente en áreas urbanas e industriales, lo que limita el alcance del tratamiento formal del aceite de motor usado a nivel nacional (García, 2021).

5. Métodos actuales de reciclaje a nivel internacional

A nivel internacional, el aceite de motor usado es gestionado mediante diversas tecnologías, cuya selección depende de factores técnicos, económicos y regulatorios. Una de las alternativas más empleadas es el re-refinado, proceso mediante el cual se recuperan bases lubricantes a partir del aceite usado mediante destilación, hidrogenación y eliminación de contaminantes. Este método permite reincorporar el producto a la cadena de valor como aceite base, aunque requiere inversiones significativas y una alimentación relativamente homogénea (API, 2017).

Otra alternativa ampliamente utilizada es el coprocesamiento en hornos cementeros, donde el aceite usado se emplea como combustible alternativo debido a su alto poder calorífico. En este proceso, la fracción orgánica se aprovecha energéticamente, mientras que los residuos inorgánicos se incorporan al clínker. Sin embargo, esta opción depende de estrictos controles de emisiones y no permite la recuperación de fracciones líquidas aprovechables como combustibles automotrices (UNEP, 2012).

En menor escala, se emplean procesos de regeneración mediante solventes y el

uso del aceite como combustible industrial en calderas, siempre bajo condiciones controladas. No obstante, estas alternativas presentan limitaciones relacionadas con la generación de residuos secundarios, restricciones en la calidad del producto y cumplimiento normativo, lo que ha impulsado la investigación de tecnologías emergentes como la pirólisis para la valorización integral del residuo (Kuppusamy et al., 2016).

6. Alternativas de valorización del aceite de motor usado a nivel internacional

La valorización del aceite de motor usado a nivel internacional ha evolucionado hacia enfoques que buscan maximizar el aprovechamiento energético y material del residuo, minimizando su impacto ambiental. Entre estas alternativas se encuentran la regeneración de solventes, la recuperación de fracciones hidrocarbonadas para la formulación de combustibles, la producción de materiales para aplicaciones industriales, como adhesivos y agentes sellantes, y la obtención de combustibles líquidos y gaseosos (Kuppusamy et al., 2016).

En este contexto, la pirólisis ha ganado interés como una tecnología capaz de transformar el aceite usado mediante descomposición térmica en ausencia de oxígeno, generando un producto líquido con potencial uso como combustible, una fracción gaseosa aprovechable energéticamente y un residuo sólido rico en carbono y metales. A nivel internacional, diversos estudios han demostrado que la pirólisis permite reducir significativamente la peligrosidad del residuo original y obtener productos con valor energético, especialmente cuando se controla la temperatura y el tiempo de residencia del proceso (Kuppusamy et al., 2016).

C. Balance de masa

El balance de masa es un principio fundamental en la ingeniería de procesos que establece que la masa total que entra a un sistema, menos la masa que sale, más la masa generada dentro del sistema y menos la masa consumida por reacciones, es igual a la acumulación de masa en el sistema durante un intervalo de tiempo determinado (Treybal, 1980). En el caso de la pirólisis, este análisis permite determinar la distribución de los productos obtenidos, como gases, líquidos y residuos sólidos (García, 1993).

En este contexto, el análisis incluye variables como la cantidad inicial de materia

prima, las condiciones operativas y los rendimientos obtenidos en cada fracción. Realizar un balance de masa detallado no solo ayuda a controlar el proceso, sino que también proporciona información crucial para evaluar la viabilidad técnica y económica del mismo (Olivares, 2000).

Figura 7. Representación general del balance de masa



Fuente: Ingeniería Química Reviews

D. Balance de energía

El balance de energía es un principio que establece que la energía total que entra a un sistema, menos la energía que sale, más la energía generada dentro del sistema y menos la energía consumida, es igual al cambio de energía acumulada en el sistema durante un intervalo de tiempo. Se trata de un componente esencial en la evaluación de procesos térmicos como la pirólisis. Este análisis consiste en contabilizar toda la energía que entra y sale del sistema, asegurando que se cumpla la conservación de la energía (Smith, Van Ness, & Abbott, 2005).

En el caso de la pirólisis, la energía de entrada incluye el calor suministrado al reactor para alcanzar la temperatura de reacción, mientras que las salidas comprenden la energía contenida en los productos, así como las pérdidas térmicas al ambiente. Un balance de energía bien realizado permite identificar las eficiencias térmicas del sistema y evaluar oportunidades para mejorar el aprovechamiento de la energía, como el uso de gases generados en el proceso como combustible para mantener la reacción. Esto es clave para garantizar un proceso energético y económicamente viable (García, 1993).

1. Balance energético del reactor de pirólisis

En un proceso de pirólisis, la alimentación aporta energía química contenida en los enlaces de hidrocarburos, mientras que el sistema requiere un aporte externo de calor para alcanzar y mantener las temperaturas necesarias de descomposición térmica,

típicamente en el rango de 400–500 °C para aceites lubricantes (García, 2019). La energía consumida se distribuye en varias fracciones: la energía necesaria para elevar la temperatura de la alimentación hasta la temperatura de reacción, la energía necesaria para la vaporización de compuestos, la energía requerida para vencer pérdidas térmicas por conducción, convección y radiación, y la energía consumida en la ruptura y formación de enlaces químicos de las moléculas de aceite (Rahbari, 2013).

2. Viabilidad energética

La viabilidad energética se refiere a la capacidad de un proceso, proyecto o sistema de producir o aprovechar más energía de la que consume, de manera que el balance energético sea positivo y la operación resulte eficiente y sostenible. Es un criterio fundamental para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de tecnologías energéticas, asegurando que la energía generada sea suficiente para cubrir los insumos energéticos requeridos para su funcionamiento (Boyle, 2012). Para verificar este parámetro es importante comparar la energía contenida en los productos generados, con la energía requerida para llevar a cabo el proceso, que incluye el suministro de calor, la energía eléctrica utilizada y cualquier otro insumo energético (García, 1993).

3. Entalpía de combustión

La entalpía de combustión es la cantidad de energía liberada en forma de calor cuando un mol de sustancia se quema completamente en presencia de oxígeno, bajo condiciones estándar de presión y temperatura (generalmente 25 °C y 1 atm). Esta propiedad termodinámica permite cuantificar la energía contenida en los enlaces químicos de un combustible y es fundamental para el diseño, análisis y optimización de procesos energéticos e industriales (Smith, Van Ness, & Abbott, 2005).

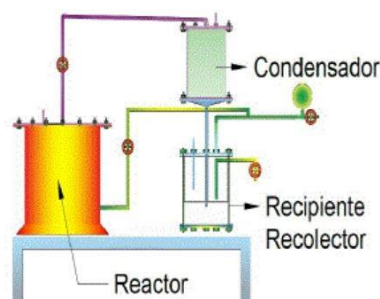
E. Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico en el que se descompone materia orgánica o inorgánica mediante la aplicación de calor en ausencia de oxígeno. Este método se utiliza ampliamente para transformar residuos en productos útiles, como combustibles líquidos, gases y carbón sólido. En el caso de hidrocarburos pesados, como los presentes en el aceite de motor usado, el proceso implica la ruptura de enlaces

carbono-carbono (C-C) y carbono-hidrógeno (C-H), produciendo moléculas de menor peso molecular mediante mecanismos de craqueo térmico. La distribución de productos depende directamente de la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la naturaleza del material alimentado (Castells & García, 2012).

Desde el punto de vista cinético, la pirólisis puede describirse como un conjunto de reacciones consecutivas y paralelas, donde las fracciones primarias generadas pueden sufrir reacciones secundarias si permanecen a alta temperatura durante tiempos prolongados. Por ello, el control de las condiciones operativas resulta determinante en la selectividad hacia productos líquidos.

Figura 8. Representación gráfica de pirólisis a escala de laboratorio



1. Clasificación

La clasificación de la pirólisis según sus condiciones operativas se basa principalmente en la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia de los vapores generados y la temperatura final del proceso. Estos parámetros determinan la cinética de descomposición, la extensión de reacciones secundarias y, en consecuencia, la distribución de productos sólidos, líquidos y gaseosos. En sistemas que procesan hidrocarburos pesados, como el aceite de motor usado, el control de estas variables resulta determinante para orientar el proceso hacia la obtención de fracción líquida con características energéticas aprovechables (Demirbas, 2017).

a. Pirólisis lenta

La pirólisis lenta es un proceso en el que el material se somete a un calentamiento gradual a bajas velocidades, lo que permite una descomposición térmica controlada y prolongada. En este proceso, los tiempos de residencia son largos, lo que favorece la formación de productos sólidos, principalmente carbón y aceites. Este tipo de pirólisis es

ideal para aplicaciones donde se busca la recuperación de materiales sólidos o líquidos de valor, como en la producción de carbón activado o aceites que pueden ser refinados y utilizados como combustibles o productos químicos (Castells & García, 2012).

La pirólisis lenta generalmente ocurre a temperaturas de alrededor de 400 °C a 600 °C y es utilizada en la conversión de residuos orgánicos, en materiales de bajo valor energético pero útil en procesos industriales que requieren carbono. Es adecuada para procesos donde se prioriza la obtención de una mayor cantidad de residuos sólidos, que tienen aplicaciones en la industria de fertilizantes, materiales de construcción o como adsorbentes. Este proceso es generalmente más lento y requiere una mayor inversión en tiempo y energía comparado con los otros tipos de pirólisis (Castells & García, 2012).

b. Pirólisis rápida

La pirólisis rápida, por otro lado, se caracteriza por utilizar altas velocidades de calentamiento y tiempos de residencia mucho más cortos en comparación con la pirólisis lenta. Este tipo de pirólisis está diseñado para maximizar la producción de líquidos, especialmente aceites y gases condensables, los cuales pueden ser utilizados como combustibles o materia prima para la producción de productos químicos. En este proceso, las temperaturas alcanzan generalmente entre 450 °C y 650 °C, y los tiempos de residencia pueden ser de tan solo segundos o minutos. El objetivo principal de la pirólisis rápida es obtener la mayor cantidad posible de productos líquidos que tengan un alto poder calorífico y un menor contenido de carbono sólido. Este proceso es muy utilizado en la conversión de residuos orgánicos, como biomasa (madera, residuos agrícolas, plásticos) y aceites usados, en biocombustibles líquidos, que pueden servir como alternativa a los combustibles fósiles (Castells & García, 2012).

c. Pirólisis flash

La pirólisis flash es un proceso extremo en términos de velocidad de calentamiento y tiempos de residencia. En este caso, las velocidades de calentamiento son extremadamente altas, alcanzando temperaturas superiores a los 1000 °C en fracciones de segundo, lo que provoca una rápida descomposición de la materia. Los tiempos de residencia son muy cortos, en el orden de milisegundos, lo que da lugar a la

generación principalmente de gases como metano, dióxido de carbono, y monóxido de carbono. Este tipo de pirólisis es particularmente útil cuando el objetivo principal es maximizar la producción de gases que pueden ser utilizados como combustibles para generar energía o como materias primas para la industria química (Castells & García, 2012).

2. Etapas del proceso de descomposición térmica

La primera etapa corresponde al calentamiento y secado, en la cual se suministra energía para elevar la temperatura del material hasta alcanzar el rango de reacción, evaporando trazas de agua y disolventes residuales. La segunda etapa es la descomposición térmica primaria, donde los enlaces débiles de los hidrocarburos comienzan a romperse, generando radicales libres y fragmentos moleculares de menor peso. Esta etapa es fundamental, ya que la naturaleza y longitud de las cadenas de carbono afectan directamente la formación de productos líquidos y gaseosos. La tercera etapa corresponde a la reacción secundaria o craqueo térmico, en la que los fragmentos generados pueden sufrir recombinación, isomerización o polimerización, así como gases ligeros y residuos sólidos (Soltes & Elder, 2018).

Finalmente, durante la condensación y separación de productos, los vapores generados son enfriados y fraccionados para obtener el combustible líquido, mientras que los gases no condensables pueden ser recolectados por separado y pueden ser utilizados como fuente energética para mantener el proceso, cerrando así el ciclo de energía del sistema. La comprensión de estas etapas es crucial para optimizar parámetros operativos como la temperatura, tiempo de residencia y velocidad de calentamiento, con el fin de maximizar el rendimiento de productos líquidos y minimizar residuos indeseados (Soltes & Elder, 2018).

3. Rampas de calentamiento y perfiles térmicos

El control de la rampa de calentamiento y del perfil térmico constituye uno de los factores más determinantes en la pirólisis de aceites lubricantes usados, ya que influye directamente en la cinética de descomposición, la formación de productos intermedios y la distribución final de fases. La rampa de calentamiento se define como la variación controlada de temperatura en función del tiempo ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) desde condiciones iniciales

hasta la temperatura objetivo del proceso, mientras que el perfil térmico describe la trayectoria completa de temperatura aplicada al sistema durante toda la operación (Jahirul et al., 2012).

En sistemas de laboratorio, donde la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción a través de las paredes del reactor y por convección interna limitada, la velocidad de calentamiento efectiva del material puede diferir de la programada en el controlador externo. Por ello, la medición directa de la temperatura interna del reactor resulta fundamental para garantizar que el aceite alcance uniformemente la temperatura deseada y evitar gradientes térmicos significativos que puedan afectar la reproducibilidad de los resultados (Romero et al., 2016).

Una rampa de calentamiento lenta favorece un aumento progresivo de temperatura que permite la evaporación de fracciones ligeras antes de alcanzar el régimen de craqueo principal. Bajo estas condiciones, pueden generarse reacciones secundarias prolongadas, como aromatización y policondensación, que incrementan la formación de residuo sólido. Además, una exposición prolongada a temperaturas intermedias puede promover la oxidación residual si el sistema no está completamente inertizado (Riesco-Ávila, 2022).

Por el contrario, rampas de calentamiento más rápidas reducen el tiempo de permanencia del material en rangos de temperatura donde ocurren reacciones secundarias no deseadas. Esto tiende a favorecer la producción de fracciones líquidas más ligeras y limitar la formación de estructuras carbonosas más estables. Sin embargo, un incremento excesivamente rápido de temperatura puede generar fenómenos de ebullición violenta o formación súbita de vapores, lo que podría afectar la estabilidad operativa y la eficiencia de condensación (Jahirul et al., 2012).

4. Factores que afectan el proceso de pirólisis

a. Temperatura

Es el factor más crítico, ya que determina la distribución de los productos. A temperaturas más bajas (300-500 °C), predomina la formación de líquidos, mientras que temperaturas más altas (>800 °C) favorecen la generación de gases (Romero et al., 2016).

b. Tiempo de residencia

Este parámetro define cuánto tiempo permanecen los materiales en el reactor. Un tiempo de residencia corto puede limitar la conversión completa de los hidrocarburos pesados, aumentando la fracción líquida, mientras que un tiempo prolongado puede favorecer el craqueo adicional, generando más gases y residuos sólidos. La relación entre temperatura y tiempo de residencia es crítica para balancear la eficiencia de conversión y la calidad de los productos líquidos obtenidos (Zhang et al., 2020).

c. Tipo de reactor

La geometría, el diseño y la capacidad del reactor afectan la transferencia de calor y la eficiencia del proceso. Reactores como lecho fluidizado, tubular o rotatorio se seleccionan según las necesidades del proceso (Román, 2017).

d. Velocidad de calentamiento

Un tiempo de residencia corto puede limitar la conversión completa de los hidrocarburos pesados, aumentando la fracción líquida, mientras que un tiempo prolongado puede favorecer el cracking adicional, generando más gases y residuos sólidos (Román, 2017).

5. Productos de la pirólisis

El aceite de pirólisis, también denominado combustible líquido de pirólisis, es el producto condensado obtenido tras la descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno. Se trata de una mezcla compleja de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, compuestos oxigenados y trazas de especies nitrogenadas y sulfuradas, cuya composición depende de la materia prima y de las condiciones de operación empleadas en el proceso (Neves et al., 2011).

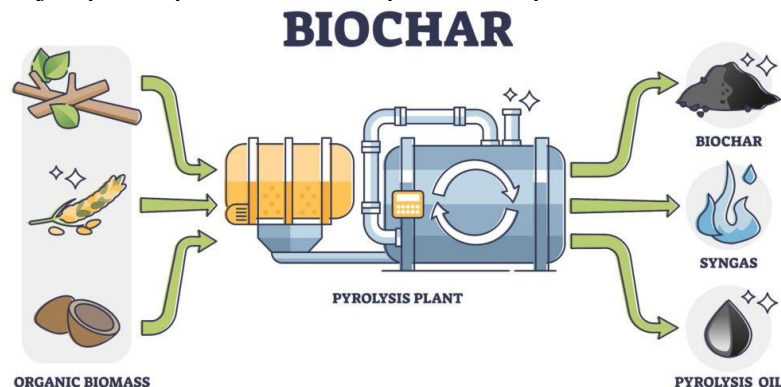
Con materias primas semejantes al aceite de motor usado, las fracciones líquidas presentan propiedades similares a combustibles fósiles, estos líquidos contienen hidrocarburos de cadena media y larga, predominantemente parafínicos y nafténicos, con un rango de carbonos típicamente entre C_{10} y C_{25} . Las características más relevantes de los líquidos incluyen su densidad, viscosidad y poder calorífico, que en estudios de laboratorio para aceites usados se reporta alrededor de 40–42 kJ/g, lo que los hace

potencialmente útiles como combustible o materia prima para re-refinación (Fuentes et al., 2007).

Los gases de pirólisis corresponden a la fracción no condensable del proceso, integrada principalmente por monóxido y dióxido de carbono, metano, hidrógeno, monóxido de carbono y otros hidrocarburos ligeros. Este flujo presenta un poder calorífico inferior a los combustibles líquidos (de 45–50 MJ/kg, según la composición), pero resulta de gran valor como fuente de energía interna, ya que puede emplearse directamente en la operación del reactor o en sistemas auxiliares, favoreciendo la autosuficiencia energética del proceso. La proporción y calidad del gas dependen tanto de la materia prima como de la temperatura y tiempo de residencia empleados en la pirólisis (Castells & García, 2012).

La fracción sólida obtenida, conocida como char o coque de pirólisis, está formada principalmente por carbono fijo, cenizas minerales y compuestos aromáticos policíclicos. Su rendimiento varía según el tipo de materia prima y las condiciones operativas, siendo más elevado en pirólisis lenta. Este sólido presenta aplicaciones potenciales como combustible sólido con poder calorífico intermedio (15–25 MJ/kg), así como materia prima para la producción de carbón activado, adsorbentes o materiales carbonosos. No obstante, su uso requiere considerar la presencia de contaminantes inorgánicos y su grado de estabilidad estructural, factores que influyen en su aprovechamiento posterior (Castells & García, 2012).

Figura 9. Ejemplo de productos de un proceso de pirólisis con materia orgánica



Fuente: FORLIANCE

F. Propiedades fisicoquímicas

El combustible líquido generado por pirólisis presenta características fisicoquímicas que determinan su calidad y aplicabilidad como fuente de energía o materia prima en procesos industriales. Estas propiedades, entre las que destacan la densidad, viscosidad y el poder calorífico, son fundamentales para evaluar su desempeño en comparación con combustibles convencionales como el diésel o la gasolina. Evaluar y optimizar estas propiedades no solo permite garantizar la calidad del combustible obtenido, sino también determinar su compatibilidad con sistemas de combustión y su competitividad en el mercado. Además, la caracterización fisicoquímica proporciona información valiosa para ajustar las condiciones del proceso de pirólisis y maximizar el rendimiento energético y la sostenibilidad del proyecto (Mancheno et al., 2017).

1. Densidad

La densidad del combustible líquido es una propiedad clave que refleja la masa por unidad de volumen a una temperatura específica. En combustibles obtenidos por pirólisis, la densidad típicamente oscila entre 850 y 950 kg/m³, dependiendo del tipo de materia prima utilizada y las condiciones del proceso. Esta propiedad es crucial porque afecta el almacenamiento, transporte y el diseño de sistemas de inyección en motores de combustión. Una densidad alta puede ser indicativa de compuestos más pesados, mientras que densidades bajas suelen asociarse con fracciones más ligeras y volátiles (Amar et al., 2019).

2. Viscosidad

La viscosidad mide la resistencia del fluido al flujo, y es una característica esencial para la manipulación y uso del combustible. Los combustibles líquidos obtenidos por pirólisis suelen tener una viscosidad superior a la de los combustibles tradicionales, debido a la presencia de compuestos oxigenados y moléculas de alto peso molecular. Este parámetro puede ajustarse mediante procesos de refinación secundaria o mezclas con combustibles convencionales. Una viscosidad adecuada garantiza un flujo uniforme en sistemas de bombeo e inyección, mejorando la eficiencia del sistema de combustión (Tormos et al., 2016).

Figura 10. Comparación gráfica de la diferencia de viscosidad entre los diferentes aceites lubricantes multigrado



Fuente: Widman International SRL

3. Poder calorífico

La capacidad calorífica es un indicador de la cantidad de energía que puede liberar el combustible durante su combustión. En los productos líquidos obtenidos por pirólisis, la capacidad calorífica se encuentra generalmente en el rango de 30 a 40 MJ/kg, similar al diésel, aunque puede variar según el contenido de hidrocarburos. Este valor es crucial para determinar su potencial energético y la viabilidad de su uso como combustible alternativo en motores o generadores eléctricos. Un combustible con una alta capacidad calorífica resulta más eficiente y competitivo frente a opciones tradicionales (Dominguez et al., 2018).

G. Combustibles tradicionales

La comparación entre los combustibles líquidos obtenidos por pirólisis y los combustibles tradicionales como el diésel y la gasolina es fundamental para evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de estos productos. A continuación, se analizan las similitudes y diferencias en términos de propiedades fisicoquímicas, rendimiento energético e impacto ambiental (Mancheno et al., 2017).

1. Diésel

El diésel es un combustible líquido obtenido principalmente de la destilación atmosférica y al vacío del petróleo, compuesto por una mezcla de hidrocarburos en el

rango de C10 a C22, incluyendo parafinas, isoparafinas, naftenos y aromáticos. Se caracteriza por una densidad de 0.82 a 0.85 g/cm³ a 15 °C y una viscosidad cinemática mayor que la de la gasolina, generalmente entre 2 y 4 cSt a 25 °C, lo que asegura una adecuada lubricidad para los sistemas de inyección. Su poder calorífico superior se encuentra entre 42 y 46 MJ/kg, mientras que el inferior oscila entre 40 y 43 MJ/kg, lo que lo convierte en un combustible eficiente para aplicaciones de alta potencia y larga duración. El diésel comercial suele incorporar aditivos mejoradores de cetano, anticorrosivos y estabilizantes que contribuyen a mejorar su combustión y almacenamiento (Maricq, 2007).

2. Gasolina

La gasolina es un combustible líquido derivado del fraccionamiento del petróleo crudo, compuesto principalmente por una mezcla de hidrocarburos en el rango de C4 a C12, que incluyen alcanos, cicloalcanos y compuestos aromáticos. Presenta una densidad típica de 0.72 a 0.78 g/cm³ a 15 °C, con una viscosidad cinemática baja, generalmente entre 0.4 y 0.8 cSt a 40 °C, lo que favorece su fácil atomización en los motores de combustión interna. Su poder calorífico superior se encuentra en el rango de 43–44 MJ/kg, mientras que el inferior es de alrededor de 41–42 MJ/kg, proporcionando una alta capacidad energética por unidad de masa. Además, contiene aditivos como antioxidantes, detergentes y mejoradores de índice de octano, que optimizan su rendimiento y reducen problemas asociados a la combustión (Heywood, 2018).

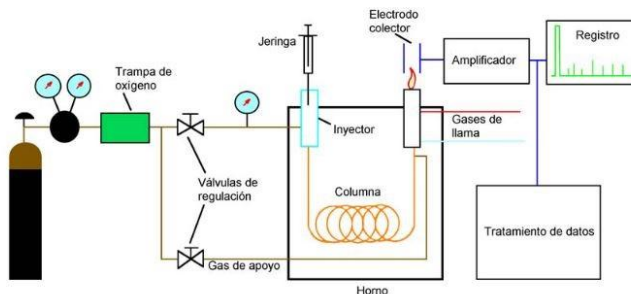
H. Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Es una técnica analítica fundamental para la caracterización de mezclas complejas de hidrocarburos. Este método combina la capacidad de separación de la cromatografía de gases (GC) con la identificación precisa de compuestos que proporciona la espectrometría de masas (MS). En el cromatógrafo de gases, la muestra se volatiliza y se transporta mediante un gas portador a través de una columna cromatográfica, donde los distintos compuestos se separan en función de su polaridad, tamaño molecular y afinidad con la fase estacionaria. El detector de espectrometría de masas registra los iones generados a partir de la fragmentación de cada compuesto, produciendo un cromatograma, que representa la señal del detector en función del tiempo de retención, donde cada pico

corresponde a un componente distinto de la mezcla (Jennings et al., 1997).

Usar GC-MS en el análisis de aceites de motor se basa en su alta sensibilidad y selectividad, capaces de detectar y cuantificar hidrocarburos con cadenas de carbono que generalmente abarcan desde C5 hasta C40, dependiendo del tipo de columna y condiciones de operación. Esta amplitud permite identificar tanto fracciones volátiles como semi-volátiles, abarcando alcanos lineales, isoalcanos, cicloalcanos, olefinas y compuestos aromáticos presentes en el aceite. Es importante destacar que los resultados obtenidos dependen en gran medida de la base de datos utilizada para la identificación de compuestos, como NIST o Wiley, ya que la correspondencia de espectros de masas puede variar, lo que genera posibles diferencias en la identificación y cuantificación de los componentes del aceite. Por ello, la interpretación de cromatogramas requiere criterios rigurosos y, a menudo, la comparación con estándares o referencias bibliográficas para garantizar la confiabilidad de los resultados (Jennings et al., 1997).

Figura 11. Esquema de cromatografía de gases



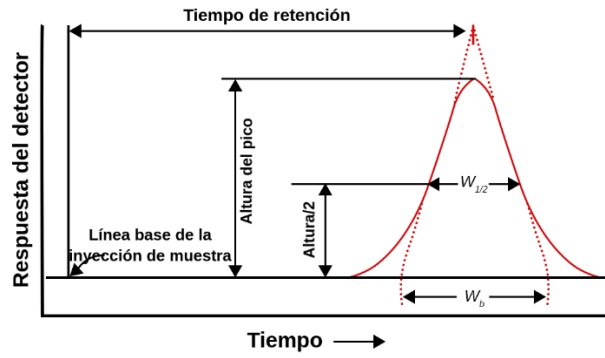
Fuente: UNIIQUIM – UNAM (2016)

1. Cromatograma

Un cromatograma es la representación gráfica de la señal del detector de un cromatógrafo en función del tiempo de retención, donde cada pico corresponde a un compuesto separado dentro de la mezcla analizada. De manera complementaria, un espectrograma de masas muestra la intensidad de los iones detectados en función de su relación masa/carga (m/z), permitiendo identificar la estructura molecular de cada componente. La interpretación de estos gráficos es crucial, ya que permite determinar la composición cualitativa y cuantitativa de la muestra, identificar contaminantes, aditivos y

la distribución de cadenas de hidrocarburos, así como evaluar cambios químicos tras procesos de uso o tratamiento (Jennings et al., 1997).

Figura 12. Esquema del registro por cromatografía de gases



V. ANTECEDENTES

A. Situación actual

La industria global de lubricantes es grande y económicamente significativa: el mercado mundial de lubricantes se estimó en USD 144–175 mil millones en 2024 y se proyecta que siga creciendo durante la próxima década, lo que refleja un consumo elevado y sostenido de aceites base y formulaciones lubricantes en transporte e industria (Grand View Research, 2024). Este elevado consumo implica una generación masiva de aceite usado como flujo residual asociado al mantenimiento de motores, equipos y vehículos; los informes de mercado y de la industria subrayan que la demanda de lubricantes está impulsada por la actividad del parque vehicular, la industria y la logística global (Grand View Research, 2024).

Las estimaciones más amplias sobre la generación global de aceites residuales sitúan el orden de magnitud en decenas de millones de toneladas por año. Informes sectoriales y resúmenes de organismos internacionales citan cifras cercanas a 24 millones de toneladas de residuos oleosos generados anualmente a nivel mundial, lo que incluye aceites de motor usados, aceites industriales y otros lubricantes fuera de servicio (Coherent Market Insights, 2025).

Desde la perspectiva del manejo y reciclaje, las rutas tecnológicas dominantes son: el re-refinado, proceso mediante el cual el aceite usado se trata para recuperar base oil, que puede reincorporarse a la cadena de lubricantes; la regeneración física o química para usos industriales o combustibles; la recuperación energética mediante combustión o co-combustión en calderas y plantas cementeras; y procesos termoquímicos como la pirólisis, el craqueo o la gasificación, que producen fracciones líquidas de mayor valor, gas combustible y residuos sólidos (UNEP, 2012).

B. Proceso de pirólisis en la UVG

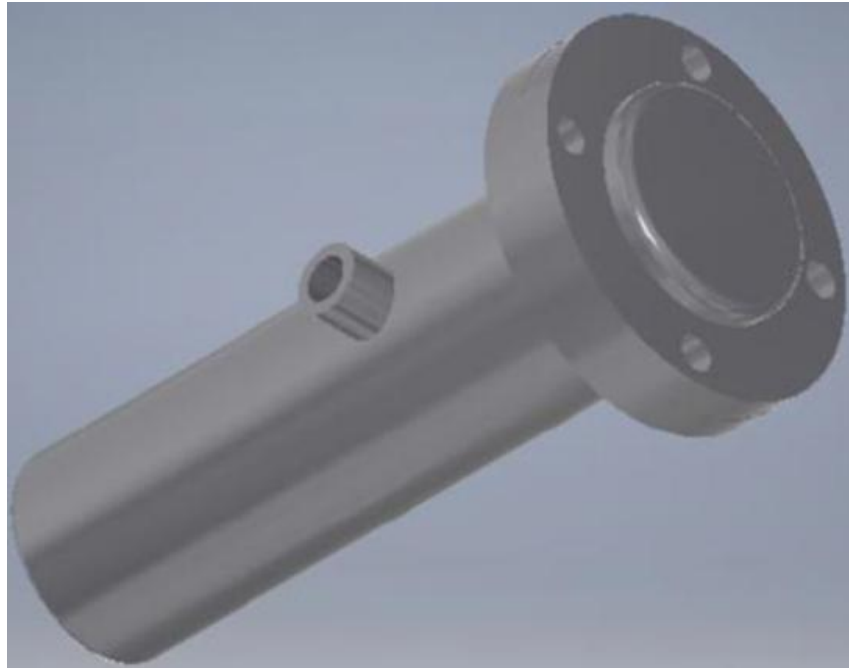
La Universidad del Valle de Guatemala ha desarrollado proyectos de investigación orientados a la valorización de residuos mediante pirólisis. Un ejemplo relevante es el trabajo titulado “Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípites de palma africana Deli x AVROS a nivel laboratorio y su escalamiento” (Castellanos et al., 2017).

En este estudio se diseñó un reactor de laboratorio fabricado en acero inoxidable 304, de tipo batch, con dimensiones aproximadas de 21 cm de longitud y sellado mediante una brida DN 50 de 9.5 cm de diámetro. El equipo contaba con un acople de ¼” en una apertura de 13 mm de diámetro, que permitió canalizar los gases generados hacia un sistema de condensación compuesto por cristalería de vidrio de laboratorio. Esta configuración aseguró la separación controlada de las fases condensables y no condensables, y posibilitó un manejo seguro del gas inflamable (Castellanos et al., 2017).

Los experimentos consistieron en someter estípites de palma africana, previamente acondicionados a diferentes niveles de humedad (12 %–75 %), a condiciones de pirólisis controladas, alcanzando temperaturas de hasta 500 °C con tiempos de residencia de 30 minutos. Los resultados evidenciaron la producción de tres fases diferenciadas: una fracción sólida (char), una fracción líquida que a su vez se separó en fase acuosa y fase orgánica, y una fase gaseosa con alto potencial energético. Los resultados presentaron rendimientos cercanos al 33 % para cada fase, verificando así la reproducibilidad del proceso. Además, se identificó que los mayores rendimientos de char se alcanzaron con humedades iniciales cercanas al 50 %, lo que sugirió que la humedad en la biomasa juega un papel determinante en la distribución de productos (Castellanos et al., 2017).

De manera complementaria, caracterizaron las propiedades energéticas de los productos. El char presentó valores de poder calorífico comparables con combustibles sólidos tradicionales. La fracción líquida contenía compuestos oxigenados y fracciones hidrocarbonadas de interés, mientras que el gas no condensable mostró características inflamables. Finalmente, el estudio incluyó un análisis económico de escalamiento, concluyendo que la pirólisis de estípites de palma podría ser viable en sistemas de mayor capacidad, con posibilidades de integración en la cadena de valor agroindustrial de Guatemala (Castellanos et al., 2017).

Figura 13. Modelo del reactor empleado en pruebas elaborado en Autodesk Inventor 2016



Fuente: Castellanos et al., 2017

C. Rampas de temperatura empleadas experimentalmente en UVG

Los antecedentes experimentales desarrollados en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) proporcionan una base sólida para la selección de rampas de temperatura en procesos de pirólisis a escala de laboratorio, evidenciando cómo distintas velocidades de calentamiento y perfiles térmicos pueden influir en la distribución de productos y en el rendimiento de fracciones líquidas útiles como combustible. Por ejemplo, un estudio sobre la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) realizado en un reactor discontinuo de 50 g utilizó tres perfiles de rampa de temperatura programada y encontró que una rampa de 8 °C cada 30 minutos resultó en el mayor rendimiento de combustible líquido, indicando que tanto la rampa como el tiempo de contacto son variables críticas que afectan la eficiencia del proceso y la calidad energética del producto obtenido. Esta investigación demostró que el reactor empleado es capaz de operar con control térmico fino y que las variaciones en la curva de calentamiento tienen un impacto directo en la cinética de descomposición y en el balance energético del proceso (Zachrisson, 2024).

Otro trabajo en UVG, centrado en la pirólisis de residuos de biomasa (cáscara de aguacate), también subraya que la transferencia de calor y el comportamiento térmico del reactor son variables que condicionan los rendimientos relativos de los productos sólido, líquido y gaseoso, lo que enfatiza la necesidad de un diseño experimental cuidadoso de las rampas de temperatura y el perfil térmico aplicado (Dighero, 2023). Estos antecedentes técnicos justifican la selección de rampas de calentamiento específicas en el presente estudio sobre aceite de motor usado, ya que el mismo reactor y sistema de control han demostrado reproducibilidad operativa y sensibilidad frente a cambios en el perfil térmico, lo cual es fundamental para comparar resultados y maximizar la producción de fracción líquida con potencial energético. Con base en estas experiencias previas, las rampas de temperatura empleadas en este trabajo fueron seleccionadas para equilibrar la eficiencia de craqueo térmico y minimizar las reacciones secundarias que disminuirían el rendimiento de productos líquidos.

D. Caracterización de aceite de motor usado

La composición química del aceite de motor usado es compleja: además de las fracciones hidrocarbónicas propias de la base oil, los análisis por GC–MS reportan la presencia de aditivos transformados, productos de oxidación, compuestos oxigenados, y una fracción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Un estudio realizado por Domínguez-Rosado et al. (2003) utilizó técnicas de GC–MS, FTIR y NMR para caracterizar aceites de motor frescos, usados y envejecidos. Los resultados indicaron la presencia de hidrocarburos alifáticos lineales y ramificados, así como compuestos aromáticos sustituidos en los aceites usados. Estos hallazgos sugieren que el proceso de uso y envejecimiento del aceite puede alterar su composición química, afectando la distribución de las cadenas de carbono (Domínguez-Rosado et al., 2003).

Complementando, el estudio de Domínguez-Rosado et al. (2003) menciona la presencia de compuestos oxigenados, como alcoholes, aldehídos y cetonas, productos de la oxidación del aceite durante su uso, en el aceite de motor usado. Estos compuestos pueden afectar las propiedades físico-químicas del aceite y su comportamiento en procesos de reciclaje y valorización energética.

El rango típico reportado de la viscosidad cinemática del aceite de motor usado varía entre 50 y 150 cSt a 40 °C, dependiendo del grado del aceite y su nivel de

degradación. Por ejemplo, un estudio de Alemu et al. (2025) sobre la optimización y caracterización del reciclaje de aceite de motor usado mediante extracción con solventes y adsorbentes reportó una viscosidad cinemática de 105 cSt para el aceite usado, que se redujo a 60 cSt después del proceso de reciclaje, indicando una mejora significativa en la fluidez del aceite reciclado. En cuanto a la densidad, estudios han encontrado que el aceite de motor usado tiene una densidad que oscila entre 0.85 y 0.90 g/cm³ a 15 °C. Por ejemplo, un estudio de Kipkorir et al. (2021) sobre las propiedades del aceite de motor destilado residual reportó una densidad de 0.8220 g/cm³ para el aceite de motor usado. Donde a su vez, Alemu et al. (2025) se reportó una densidad de 0.88 g/cm³ para el aceite usado. Evidenciando que ambos valores se encuentran dentro del rango comúnmente determinado para aceites de motor usados.

En cuanto a las propiedades térmicas, específicamente la capacidad calorífica (c_p) y la conductividad térmica, la literatura experimental indica que los aceites presentan c_p en el orden de 2.0–2.5 kJ·kg⁻¹·K⁻¹, aunque los valores varían entre muestras y métodos de medición; estudios que midieron capacidades caloríficas eléctricas y por calorimetría reportan valores alrededor de 2300 J·kg⁻¹·K⁻¹ para muestras de motor oil y diferencias pequeñas entre aceite nuevo y usado, con el aceite usado mostrando a veces disminuciones del 1–3 % en capacidad calorífica y conductividad (FUW, 2018). Estas propiedades térmicas son relevantes para el diseño de intercambiadores de calor, calentadores de reactor y para modelar balances de calor en procesos de pirólisis o combustión (FUW, 2018).

El poder calorífico del aceite de motor usado es alto y comparable al de combustibles líquidos convencionales, por lo cual se considera una fuente de energía aprovechable tras tratamiento o conversión. Diversos trabajos experimentales reportan valores del orden de 40–45 MJ·kg⁻¹ (Mishra, 2021). Estos poderes caloríficos altos explican por qué el aceite de motor usado se utiliza en algunos contextos como combustible industrial como lo es en calderas u hornos, o bien como materia prima para procesos termoquímicos que buscan recuperar energía (Aisien et al., 2023).

E. Pirólisis de aceite de motor usado

Los rendimientos de aceite en la pirólisis del aceite de motor usado varían según las condiciones del proceso. Por ejemplo, el estudio de Mishra (2023) reportó resultados de un aumento continuo en el rendimiento de aceite pirolítico del 9 % al 82 % en peso al incrementar la temperatura de reacción de 300 °C a 500 °C, con una disminución correspondiente en el residuo sólido de 86.1 % a 11 % en peso. Este estudio sugiere que temperaturas más altas favorecen la conversión del aceite en productos líquidos, aunque se debe tener en cuenta la posible formación de gases no condensables a temperaturas elevadas. Al-Selwi (2025) investigó el efecto de la temperatura y el tiempo de residencia en la pirólisis del aceite de motor usado. Los resultados mostraron que el rendimiento de aceite pirolítico aumentó con la temperatura en el rango de 400 °C a 450 °C, alcanzando un máximo de 24 % en peso a 450 °C con un tiempo de residencia de 60 minutos. Sin embargo, al aumentar la temperatura a 500 °C, el rendimiento de aceite disminuyó, mientras que la producción de carbón aumentó significativamente.

Asimismo, la pirólisis al ser un proceso que genera aceites líquidos, gases y sólidos. La composición de estos productos varía según las condiciones del proceso. Por ejemplo, un estudio de Riesco-Ávila (2022) reportó que la fracción líquida del aceite de pirólisis contenía aproximadamente 21.12 % de fracción ligera, similar a gasolina, 56.52 % de fracción media que presenta semejanza al diésel y 22.36 % de fracción pesada que era más parecida a un diésel pesado.

Santhoshkumar et al. (2020) realizaron una evaluación comparativa de la pirólisis eléctrica y por microondas del aceite de motor usado a 350 °C para la producción de combustibles similares al diésel. Ambos métodos produjeron aceites con características fisicoquímicas comparables al diésel, como un valor calorífico de 43.2 MJ/kg, densidad de 0.88 g/cm³, viscosidad cinemática de 3.2 mm²/s y punto de inflamación de 60 °C. Sin embargo, se observó que la eficiencia térmica de la pirólisis eléctrica fue del 26 %, mientras que la de la pirólisis por microondas fue del 25 %, ambas ligeramente inferiores a la del diésel debido a su mayor viscosidad. Además, las emisiones de hidrocarburos no quemados fueron mayores en ambos aceites pirolíticos en comparación con el diésel, con

un aumento del 7 % para el aceite de pirólisis eléctrica y del 15 % para el aceite de pirólisis por microondas.

Respecto al estudio “Characteristics of gas and residues produced from electric arc pyrolysis of waste lubricating oil”. Los autores reportan que el gas producido por pirólisis por arco eléctrico estuvo compuesto principalmente por H_2 (35–40 %), acetileno (13–20 %), etileno (3–4 %) y otros hidrocarburos, y que el poder calorífico del gas se situó en el rango $\approx 11\,000$ – $13\,000$ kcal/kg, lo que le confiere un alto potencial como gas combustible de recuperación energética (Song et al., 2010).

VI. METODOLOGÍA

A. Cálculo del tamaño de repeticiones

- Definir el nivel de confianza deseado (95 %) y el error permitido (± 5 %).
- Estimar la desviación estándar basada en estudios previos o mediciones preliminares (Si se tienen datos).
- Utilizar la fórmula para determinar el tamaño de muestra.
- Calcular el número de repeticiones necesarias para cada rampa de temperatura.
- Redondear el número obtenido al entero más cercano.

B. Definición y cálculo del tamaño de muestra de aceite de motor

- Definir la población de estudio: emplear aceite de motor de vehículo usado proveniente de servicios de cambios de filtro y aceite de vehículos de motor gasolina que se realizan aproximadamente cada 5000 km. El aceite recolectado a emplear es de origen multigrado 10W-30. El taller se encuentra ubicado en Mixco, Guatemala.
- Definir el nivel de confianza deseado y el error permitido: se establece un nivel de confianza del 95 %, correspondiente a un valor Z de 1.96, y un error permitido del 20 %.
- Estimar la desviación estándar basada en estudios previos o mediciones preliminares: debido a la ausencia de datos previos sobre la variabilidad del aceite usado en el taller, se adopta el valor conservador de $p = 0.5$, el cual representa el escenario de máxima variabilidad y permite obtener un tamaño de muestra suficiente.
- Utilizar la fórmula para determinar el tamaño de muestra:
- Calcular el número de vehículos necesarios para determinar una mezcla con muestras significativas.
- Redondear el número obtenido al entero más cercano.

C. Caracterización de aceite de motor usado

1. Materiales y Equipo

- Aceite de motor usado.
- Balanza analítica (± 0.0001 g).
- Cronómetro (± 0.1 segundos).
- Bulbo para pipeta.
- Espátula.
- 2 Beaker de 250 mL
- 2 Beaker de 100 mL
- Pipeta graduada (10 mL)
- Probeta graduada (10 mL)
- Piseta de acetona
- Piseta de etanol
- Picnómetro de vidrio calibrado.
- Balanza de humedad
- Calorímetro IKA 200 C
- Centrifugadora
- Termómetro de alcohol
- 5 tubos de ensayo
- Rejilla para tubos de ensayo
- Estufa
- Soporte universal
- Pinza de mariposa
- Lona de mezclilla
- Envase de plástico
- Embudo

2. Filtración de aceite de motor usado

- Cortar un trozo de lona del tamaño adecuado para cubrir la abertura del embudo.
- Lavar y secar la lona si no está limpia, para evitar contaminación adicional del aceite.
- Asegurar que la lona esté bien fijada para que no se hunda.
- Colocar el embudo o soporte sobre el envase receptor, asegurándose de que esté estable.
- Verter el aceite de motor usado lentamente sobre la lona.
- Permitir que el aceite escurra por gravedad hacia el envase receptor.
- Esperar hasta que todo el aceite haya pasado a través del medio filtrante.
- Almacenar el aceite de motor filtrado a emplear.

3. Densidad del aceite de motor usado

- Limpiar y secar el picnómetro eliminando cualquier residuo.
- Pesar el picnómetro vacío en una balanza analítica y registrar la masa.
- Llenar el picnómetro con agua destilada a una temperatura conocida y pesarlo nuevamente.
- Vaciar, limpiar y secar el picnómetro antes de llenarlo con el aceite de motor usado.
- Llenar el picnómetro con aceite de motor usado y pesarlo nuevamente.
- Calcular la densidad del aceite utilizando la fórmula respectiva.

4. Humedad del aceite de motor usado

- Pesar una muestra de aceite de motor usado en el platillo de la balanza.
- Configurar la temperatura de secado entre 105 °C y 120 °C según las especificaciones del equipo.
- Iniciar el análisis y permitir que la balanza caliente la muestra hasta alcanzar masa constante.
- Registrar el porcentaje de humedad mostrado por el equipo.
- Repetir el procedimiento para varias muestras y obtener un promedio representativo.

5. Viscosidad

- Calibración del sistema, llenar la pipeta con agua destilada a 25 °C, cuya viscosidad cinemática será conocida de manera teórica por medio de la temperatura ambiente y presión atmosférica.
- Medir el tiempo que tarda en fluir entre dos marcas de mL seleccionadas arbitrariamente y usar la ecuación de *Poiseuille* para determinar la constante a emplear.
- Llenar la pipeta con el mismo volumen a emplear de aceite de motor usado a 25 °C.
- Colocar la pipeta en posición vertical y permitir que el aceite fluya libremente.
- Iniciar el cronómetro cuando el fluido pase por la primera marca de referencia y detenerlo al llegar a la segunda marca.
- Registrar el tiempo medido. Realizar en quintuplicado.
- Calcular la viscosidad dinámica multiplicando la constante de calibración por el tiempo que tomó el líquido en fluir.
- Calentar agua en una estufa a 40 °C para volver a realizar la calibración en la nueva temperatura.
- En un baño maría, calentar la cantidad específica de aceite de motor en los tubos de ensayo, cuando llegue a 40 °C a repetir el procedimiento anterior.
- Medir la densidad a ambas temperaturas, realizando un pesaje por diferencia y midiendo el volumen en una probeta.
- Finalmente, multiplicar la viscosidad cinemática por la densidad del aceite de motor usado para obtener la viscosidad dinámica.

6. Poder calorífico

- Preparar el calorímetro IKA 200 C 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.

- Después de calibrar, pesar 0.1g de líquido combustible obtenido, el cual se prepara e ingresa al calorímetro.
- Se obtiene el poder calorífico.

7. Cantidad de sedimentos sólidos en muestra (% m/m)

- Lavar y secar los tubos de la centrífuga.
- Pesar el tubo vacío y registra su peso
- Tomar un volumen medido de aceite usado y colócalo en el tubo de centrífuga.
- Diluir con un disolvente orgánico (relación 1:1) para facilitar la separación de sólidos.
- Colocar el tubo en la centrífuga y asegurarse de equilibrar con un tubo contrapeso.
- Centrifugar la muestra a 4000 rpm durante 15 minutos
- Una vez completada la centrifugación, retirar cuidadosamente el líquido sobrenadante, con una pipeta o jeringa
- Pesa el tubo con los sólidos secos
- Registrar el pesaje y obtener el porcentaje másico que representa.

8. Cromatografía GC - Masa

- Tomar una alícuota de 1 mL de aceite de motor usado.
- Diluir en 5-10 mL de solvente orgánico.
- Filtrar la solución con un filtro de membrana de 0.45 μm .
- Colocar 1 mL de la muestra filtrada en un vial de GC limpio y sellarlo.
- Comparar los espectros de masas con bibliotecas como NIST o Wiley.
- Identificar hidrocarburos degradados, contaminantes y aditivos.
- Cuantificar compuestos mediante área de picos y curvas de calibración.

9. Análisis termogravimétrico (TGA)

- Se contacta a Cementos Progreso mediante el Lic. Luis Velásquez, de modo que

se permita realizar el análisis pertinente de la materia prima.

- Se debe entregar la muestra y esperar a recibir los resultados respectivos de TGA.
- Con los resultados se facilita la estipulación de la temperatura de operación para la corrida de pirólisis

D. Determinación de gradientes de temperatura

- Consultar estudios previos para establecer rangos de los posibles gradientes de temperatura.
- Realizar prueba inicial de pirólisis donde se genere un perfil de temperatura progresivo hasta llegar a la temperatura donde inicia la obtención de producto líquido.
- Observar problemas de taponamiento y sobrepresión en el reactor, si se genera lo mencionado, se debe emplear un calentamiento más lento.
- Ejecutar rampas de 8 °C y 12 °C cada 30 minutos para según el número de corridas calculado y evaluar su efectividad.
- Al realizar corridas experimentales con estas rampas, determinar cuáles son mejores para el estudio y su impacto en la producción de combustibles líquidos, tomando en cuenta la estabilidad del reactor.

E. Pirólisis en reactor de 50g a escala de laboratorio

1. Materiales y Equipo

- Balanza semianalítica OHAUS, modelo 3000 Xtreme
- Sistema de condensación de vidrio
- Reactor de pirólisis de 100 gramos
- Sistema de chimenea del reactor de pirólisis
- Soporte universal
- Mufla Thermo Scientific, Thermolyne (25-1200 °C)
- Bomba de pecera

- Espátula de metal
- Termómetro láser Digi-Sense
- Mangueras plásticas
- Silicón para alta temperatura
- 6 frascos de vidrio
- 3 beakers de 300mL

Figura 14. Montaje experimental para sistema de pirólisis



2. Montaje de sistema para pirólisis

- Asegurarse de que la chimenea y el reactor se encuentren limpios. En caso de que la chimenea se encuentre sucia se debe aplicar calor para que el contenido pueda salir y esta tenga espacio suficiente para que atraviesen los gases condensables y no condensables.
- Agregar agua en una cubeta de 20 L y colocar una bomba de pecera.
- Conectar las mangueras plásticas para la circulación de agua al condensador.
- Colocar el sistema de condensación en un soporte universal.
- Colocar el adaptador del condensador con su respectivo termómetro.

- Pesar 40 g de aceite de motor usado en un beaker previamente tarado y verter en el reactor.
- Cerrar el reactor de pirólisis con su respectivo empaque.
- Ingresar el reactor con muestra a la Mufla.
- Conectar la chimenea con sus aislantes de fibra de vidrio desde adentro de la mufla, añadiendo pegamento para altas temperaturas en la entrada del reactor para sellar cualquier fuga.
- Conectar la chimenea con el condensador, asegurándose de apretar la abrazadera y que no exista ninguna fuga al ambiente.
- Colocar un beaker en la salida del condensador para obtener el combustible líquido.

3. Corrida de pirólisis

- Encender la Mufla y realizar aumentos progresivos de temperatura hasta 380 °C y empezar a realizar aumentos constantes dependiendo de la curva de temperatura a emplear.
- Documentar todos los gradientes medidos, las condiciones de operación y las configuraciones del sistema.
- Posterior de cada 30 minutos, se debe realizar un pesaje del combustible obtenido en este periodo de tiempo

4. Desmontaje de sistema

- Una vez terminada la pirólisis esperar un tiempo prudencial para poder abrir la Mufla y permitir que esta empiece a bajar su temperatura.
- En cuanto sea manejable el reactor de pirólisis, desconectar la chimenea y asegurarse de retirar cualquier residuo que haya podido solidificarse en el proceso.
- Retirar el reactor de pirólisis y desmontarlo para obtener el subproducto sólido restante.
- Realizar el pesaje respectivo del producto sólido.

F. Caracterización de combustible líquido obtenido

1. Material y equipo

- Aceite de motor usado.
- Balanza analítica (± 0.0001 g).
- Cronómetro (± 0.1 segundos).
- Jeringa o gotero
- Espátula.
- 2 Beaker de 250 mL
- 2 Beaker de 100 mL
- Pipeta graduada (10 mL)
- Probeta graduada (10 mL)
- Piseta de acetona
- Piseta de etanol
- Piseta de agua destilada
- Varilla de agitación de vidrio.
- Picnómetro de vidrio calibrado.
- Balanza de humedad
- Calorímetro IKA 200 C
- Centrifugadora
- Tiras de papel indicador de pH (Papel tornasol).
- Termómetro de alcohol
- 5 tubos de ensayo
- Rejilla para tubos de ensayo
- Estufa
- Soporte universal
- Pinza de mariposa
- Bulbo o jeringa para pipeta

2. Filtración de sólidos suspendidos de los combustibles líquidos obtenidos

- Lavar y secar los tubos de la centrífuga.
- Pesar el tubo vacío y registra su peso
- Tomar un volumen medido de aceite usado y colócalo en el tubo de centrífuga.
- Colocar el tubo en la centrífuga y asegurarse de equilibrar con un tubo contrapeso.
- Centrifugar la muestra a 4000 rpm durante 15 minutos
- Una vez completada la centrifugación, retirar cuidadosamente el líquido sobrenadante, con una pipeta o jeringa
- Pesa el tubo con los sólidos secos
- Registrar el pesaje y obtener el porcentaje másico que representa, este fue sumado a la cantidad de cera retirada inicialmente.

3. Densidad

- Limpiar y secar el picnómetro eliminando cualquier residuo.
- Pesar el picnómetro vacío en una balanza analítica y registrar la masa.
- Llenar el picnómetro con agua destilada a una temperatura conocida y pesarlo nuevamente.
- Vaciar, limpiar y secar el picnómetro antes de llenarlo con el combustible líquido obtenido.
- Llenar el picnómetro con combustible líquido obtenido y pesarlo nuevamente.
- Calcular la densidad del aceite utilizando la fórmula respectiva.

4. Viscosidad

- Calibración del sistema, llenar la pipeta con agua destilada a 25 °C, cuya viscosidad cinemática será conocida de manera teórica por medio de la temperatura ambiente y presión atmosférica.
- Medir el tiempo que tarda en fluir 10 mL y usar la ecuación de Poiseuille para

determinar la constante C.

- Llenar la pipeta con el mismo volumen a emplear de combustible líquido usado a 25 °C.
- Colocar la pipeta en posición vertical y permitir que el combustible líquido fluya libremente.
- Iniciar el cronómetro cuando el fluido pase por la primera marca de referencia y detenerlo al llegar a la segunda marca (de 0 mL a 10 mL).
- Registrar el tiempo medido. Realizar en quintuplicado.
- Calcular la viscosidad dinámica multiplicando la constante de calibración por el tiempo que tomó el líquido en fluir.
- Medir la densidad realizando un pesaje por diferencia y midiendo el volumen.
- Finalmente, multiplicar la viscosidad cinemática por la densidad del combustible de pirólisis de aceite de motor usado para obtener la viscosidad dinámica.

5. Poder calorífico

- Preparar 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.
- Después de calibrar, pesar 0.1g de líquido combustible obtenido, el cual se prepara e ingresa al calorímetro.
- Se obtiene el poder calorífico.
- Repetir el proceso para cada una de las muestras a analizar y el char obtenido por la pirólisis.
- Registrar el poder calorífico.

6. Cromatografía GC - Masa

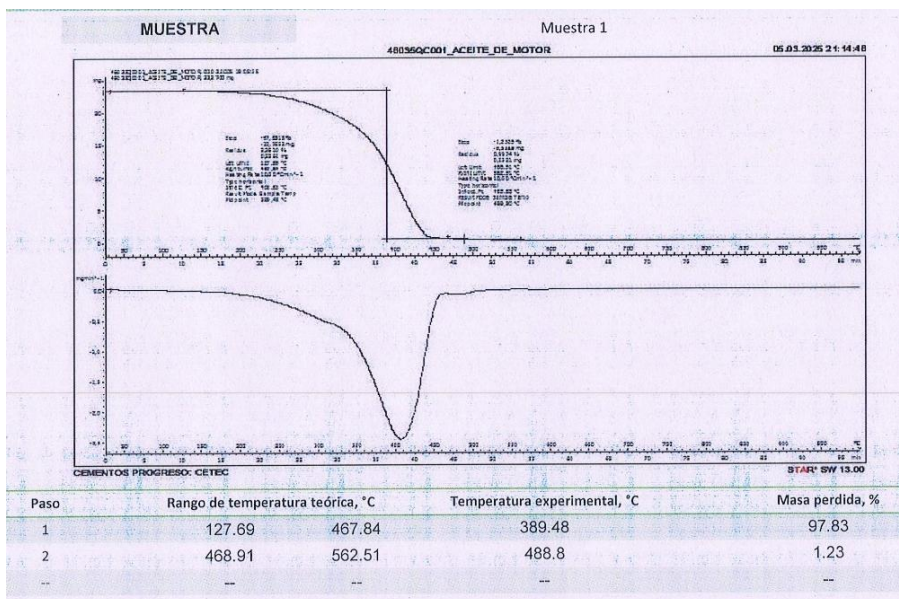
- Tomar una alícuota de 1 mL de combustible líquido obtenido por pirólisis.
- Diluir en 5-10 mL de solvente orgánico.
- Filtrar la solución con un filtro de membrana de 0.45 μm .

- Colocar 1 mL de la muestra filtrada en un vial de GC limpio y sellarlo.
- Comparar los espectros de masas con bibliotecas como NIST o Wiley.
- Identificar hidrocarburos degradados, contaminantes y aditivos.
- Cuantificar compuestos mediante área de picos.

VII. RESULTADOS

A. Caracterización del aceite de motor usado a pirolizar

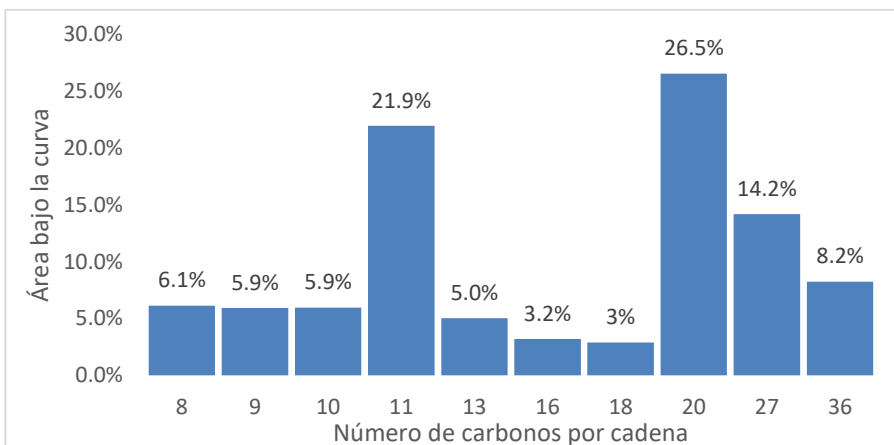
Figura 15. Análisis termogravimétrico de aceite de motor usado



Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC)

Se muestra el análisis termogravimétrico realizado con ayuda de Cementos Progreso, en el Centro de Investigación y Desarrollo. Véase Figura 24, Figura 25, Figura 26 en Anexos.

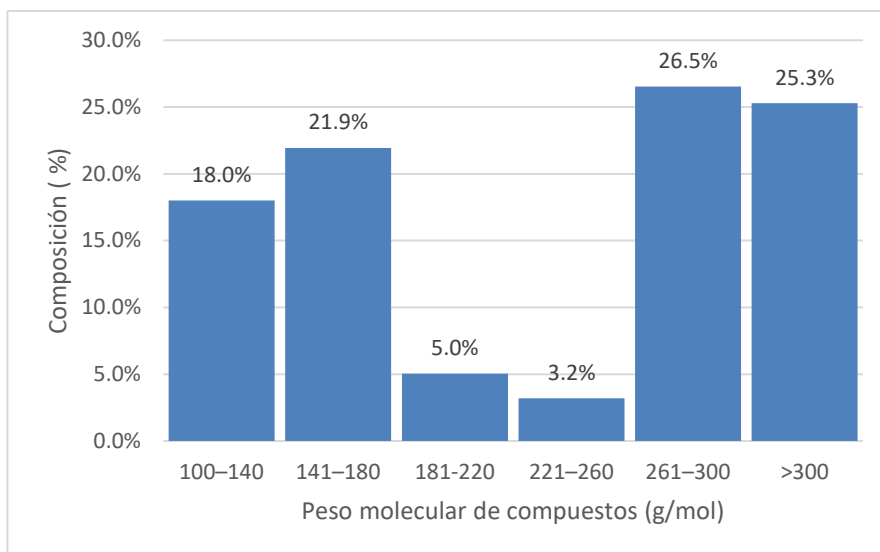
Figura 16. Distribución de número de carbonos por cadena de los compuestos presentes en el aceite de motor usado a pirolizar



Fuente: Propia

Se muestra la composición porcentual de número de carbonos por cadena en los compuestos presentes en la muestra representativa del aceite de motor usado. Se empleó un análisis de Espectrometría GC-MS en triplicado para la cuantificación de los compuestos según el área bajo la curva.

Figura 17. Distribución de peso molecular de los compuestos presentes en el aceite de motor usado a pirolizar



Fuente: Propia

Se muestra la composición porcentual en intervalos de pesos moleculares en los compuestos presentes en la muestra representativa del aceite de motor usado. Se empleó un análisis de Espectrometría GC-MS en triplicado para la cuantificación de los compuestos según el área bajo la curva.

Cuadro 1. Datos estadísticos de la viscosidad del aceite de motor usado medida experimentalmente

Estadística	Aceite de motor a 23 °C		Aceite de motor a 40 °C	
	Cinemática (mm ² /s)	Dinámica (kg/m s)	Cinemática (mm ² /s)	Dinámica (kg/m s)
Media	13.9 ± 0.07	0.0120 ± 1.59x10 ⁻⁴	6.00 ± 0.005	0.00511 ± 6.10x10 ⁻⁵
Desviación estándar	0.189	1.64 x10 ⁻⁴	0.0971	8.259x10 ⁻⁵
Coeficiente de variación	1.36 %		1.62 %	

En el cuadro anterior se reporta la estadística descriptiva de la medición de viscosidad a distintas temperaturas de la muestra representativa del aceite de motor usado. Se empleó el software Excel para el cálculo.

Cuadro 2. Datos estadísticos de densidad, humedad y cantidad de sólidos suspendidos del aceite de motor usado a pirolizar

Estadística	Densidad (kg/m³)	Humedad (% MC)	Cantidad de sólidos (% m/m)
Media	865.4 ± 8.15	0.890 ± 0.009	2.414 ± 0.04
Desviación estándar	1.641	0.0224	0.2312
Coeficiente de variación	0.190 %	2.51 %	9.58 %

En el cuadro anterior se reporta la estadística descriptiva de la medición de densidad, humedad y cantidad de sólidos suspendidos de la en la muestra representativa del aceite de motor usado en términos de masa-masa. Se empleó el software Excel para el cálculo.

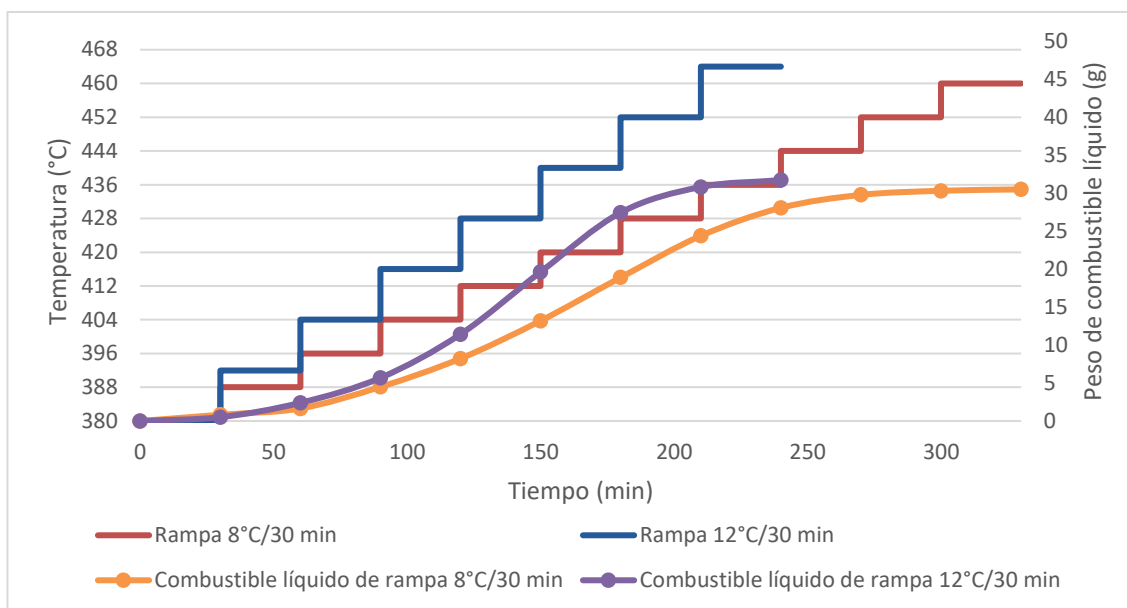
B. Rendimiento y comparación de rampas de temperatura

Cuadro 3. Rendimiento másico de los productos en las rampas de temperatura empleadas para el proceso de pirólisis

Producto	Rampa 1 - 8 °C/30 min (±0.43 % m/m)	Rampa 2 - 12 °C/30 min (±0.43 % m/m)
Combustible líquido	72.63	74.80
Producto sólido (Char)	4.07	5.77
Gases y pérdidas al ambiente	20.37	15.65
Contenido ceroso y sólidos suspendidos	2.85	3.78

En el cuadro anterior se reportan los rendimientos másicos promedio de las dos rampas de temperatura empleadas, las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una balanza analítica Pioneer con incertidumbre ±0.0001, un reactor de pirólisis y una mufla ThermoScientific. Se emplearon 40.0 g de la muestra representativa del aceite de motor usado.

Figura 18. Comparación gráfica de las rampas de temperatura planteadas



Fuente: Propia

Se muestra la relación entre los aumentos de temperatura (eje y primario) con respecto al tiempo donde se realizaron aumentos de 8 °C (Curva roja) o 12 °C (Curva azul) partiendo desde los 380 °C y realizando un tiempo de residencia de 30 minutos. A su vez, se relaciona el peso del combustible líquido obtenido de manera acumulada (eje y secundario) donde la curva naranja corresponde a la rampa de 8 °C/30 min y la morada a la rampa 12 °C/30 min, donde los puntos son los. Se emplearon 40.0 g de la muestra representativa del aceite de motor usado. Se empleó el software Excel para su ejecución y se observan las curvas suavizadas de esta herramienta.

Cuadro 4. Energía suministrada y entalpía de combustión en distintas rampas de pirólisis

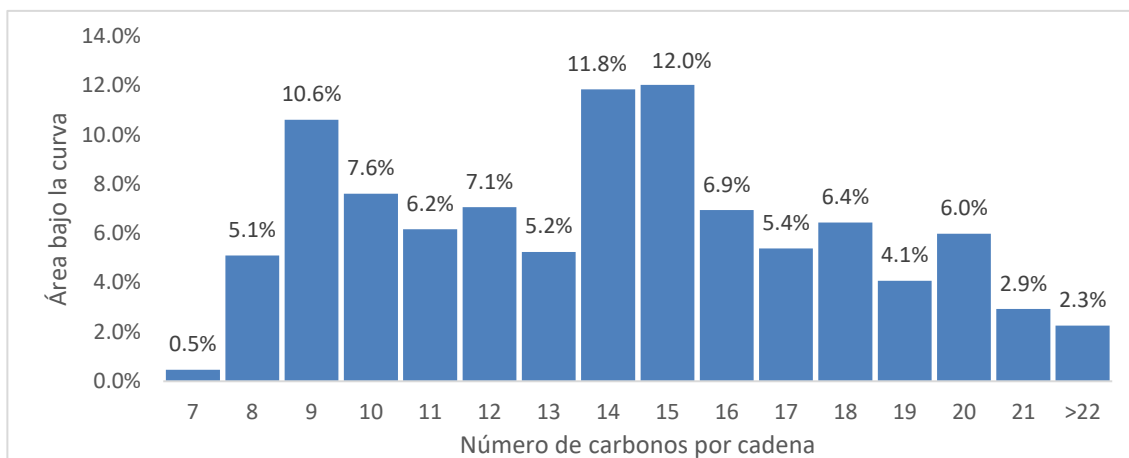
Parámetro	Aceite de motor usado	Combustible líquido Rampa 8 °C/30 min	Combustible líquido Rampa 12 °C/30 min
Energía suministrada (kJ)	-	55,710	38,997
Tiempo efectivo de uso (h)	-	5.0	3.5
Entalpía de combustión (kJ/g)	48.17	47.22	47.64

En el cuadro anterior se reporta la energía suministrada por la potencia de la mufla hacia el sistema de pirólisis, tiempo efectivo de uso para cada rampa y la entalpía de

combustión de los compuestos pertinentes a los productos de la pirólisis. Se empleó un análisis de Espectrometría GC-MS en triplicado para la cuantificación de los compuestos según el área bajo la curva.

C. Caracterización de combustible líquido

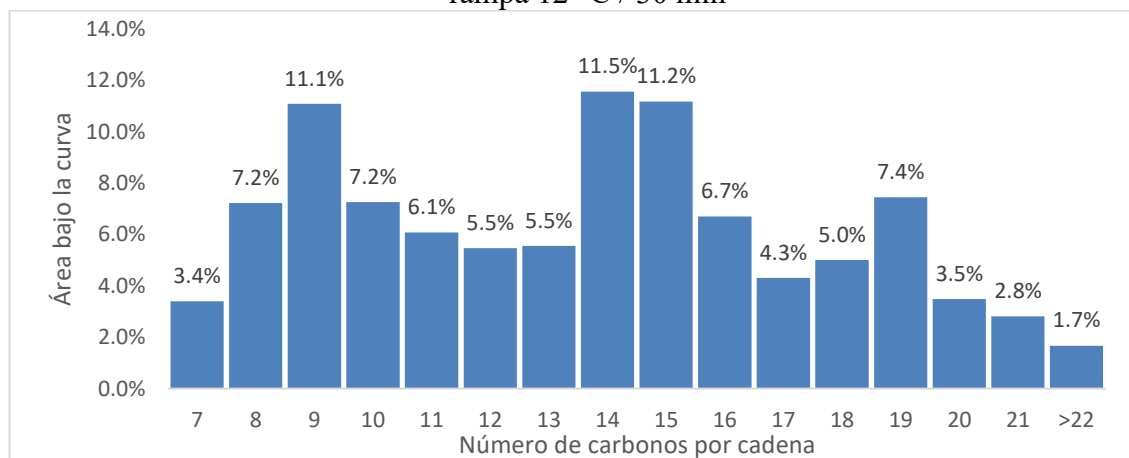
Figura 19. Distribución de número de carbonos por cadena del producto de la rampa 8 °C / 30 min



Fuente: Propia

Se muestra la composición porcentual de número de carbonos por cadena determinados por los compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/30 min. Se empleó un análisis de Espectrometría GC-MS en triplicado para la cuantificación de los compuestos.

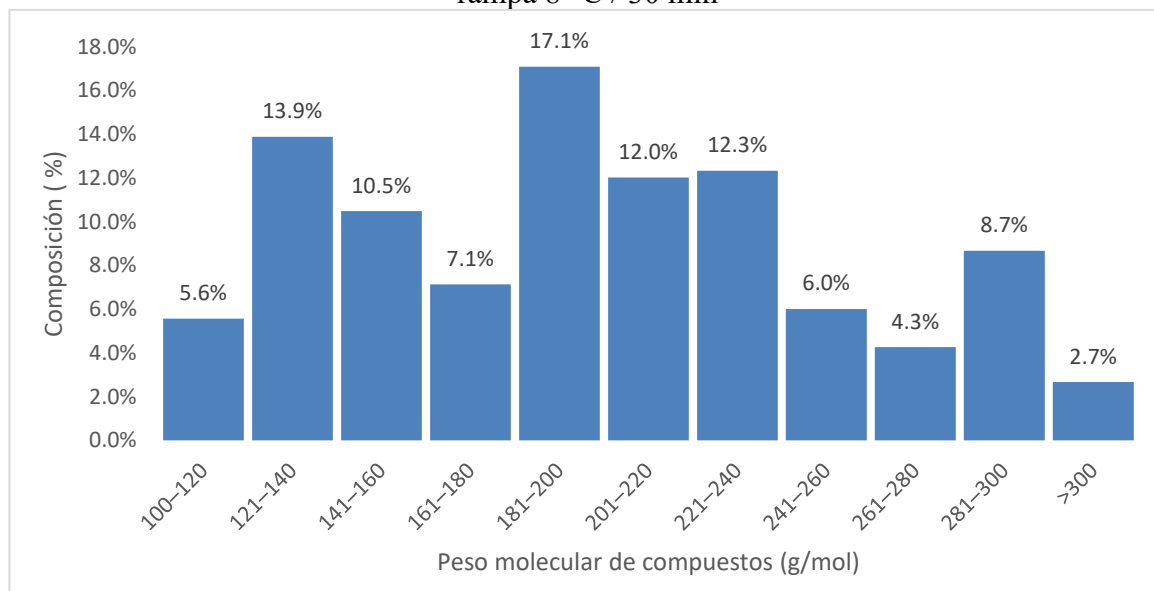
Figura 20. Distribución de número de carbonos por cadena del producto de la rampa 12 °C / 30 min



Fuente: Propia

Se muestra la composición porcentual de número de carbonos por cadena determinados por los compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 min. Se empleó un análisis de Espectrometría GC-MS en triplicado para la cuantificación de los compuestos.

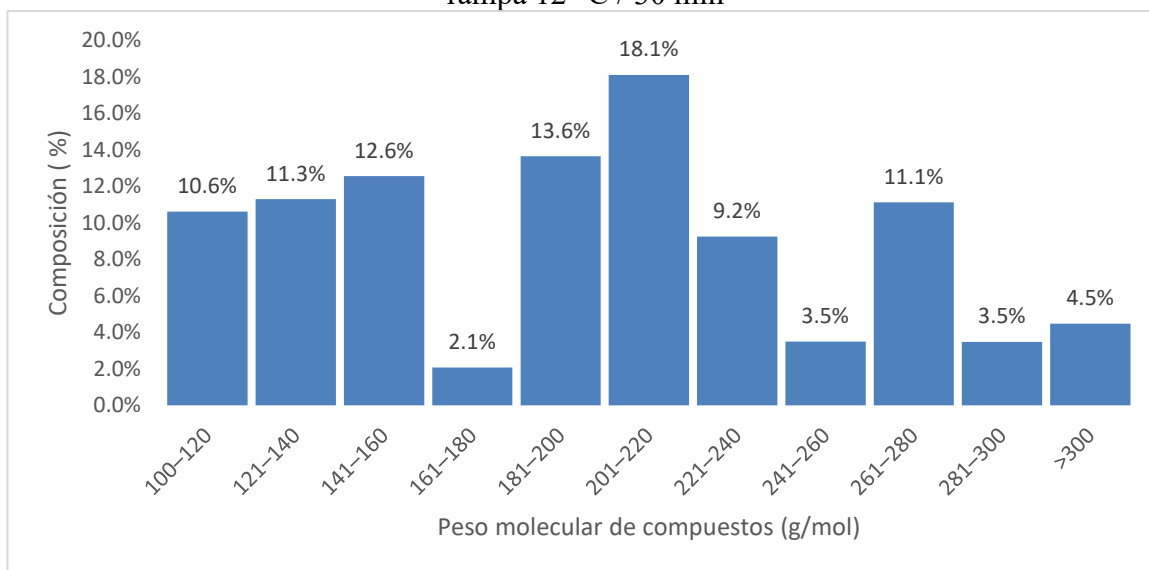
Figura 21. Distribución de peso molecular de los compuestos del producto de la rampa 8 °C / 30 min



Fuente: Propia

Se muestra la composición porcentual de intervalos de peso molecular de los compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/ 30 min. Se empleó un análisis de Espectrometría GC-MS en triplicado para la cuantificación de los compuestos.

Figura 22. Distribución del peso molecular de los compuestos del producto de la rampa 12 °C / 30 min



Fuente: Propia

Se muestra la composición porcentual de intervalos de peso molecular de los compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 min. Se empleó un análisis de Espectrometría GC-MS en triplicado para la cuantificación de los compuestos.

Cuadro 5. Propiedades fisicoquímicas del combustible líquido obtenido en ambas rampas de temperatura comparado con combustibles convencionales

Combustible líquido	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Poder calorífico (J/g)	Rango de cadenas de carbonos
Rampa 8 °C / 30 min	820.1 ± 7.56	0.9227 ± 0.011	44,872.3 ± 153.8	C ₇ -C ₂₄
Rampa 12 °C / 30 min	818.6 ± 7.54	0.9304 ± 0.011	45,023.3 ± 111.7	C ₇ -C ₂₂
Diésel	820 – 850	2.0 - 4.0	42,500 – 46,000	C ₁₀ -C ₂₀
Gasolina	720 – 780	0.4 – 0.8	43,500 – 44,500	C ₄ -C ₁₂

Se reporta la estadística descriptiva de la medición de densidad, viscosidad, poder calorífico y el rango de carbonos por cadena del combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado. Las mediciones experimentales se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Los datos de diésel y gasolina fueron extraídos de (Comisión Reguladora de Energía, 2016; Heywood, 2018). Véase fichas técnicas de los productos en Figura 41 y Figura 42.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo se enfoca en el análisis integral del comportamiento del aceite de motor usado como materia prima en el proceso de pirólisis, considerando su caracterización fisicoquímica, térmica y composicional, así como la influencia de las condiciones operativas sobre los productos generados. Asimismo, se evalúa la relación entre las propiedades iniciales del residuo y su transformación termoquímica, con énfasis en la distribución de productos, el perfil energético del proceso y la calidad del combustible líquido obtenido. Finalmente, se establecen comparaciones con antecedentes reportados en la literatura, con el fin de validar los resultados experimentales y determinar el potencial del proceso como alternativa de valorización energética.

La muestra de estudio se definió como una mezcla representativa de aceite de motor usado recolectado de 24 vehículos a gasolina, correspondientes a servicios de cambio de aceite y filtro realizados aproximadamente cada 5000 km en un taller automotriz ubicado en Mixco, Guatemala. El aceite recolectado fue de originalmente tipo multigrado 10W-30 y se obtuvo bajo condiciones operativas reales, lo que garantiza la inclusión de productos de degradación, contaminantes y aditivos característicos del uso en motores de combustión interna. La definición de la muestra constituyó un aspecto fundamental en la interpretación de los resultados, debido a la alta variabilidad inherente a este tipo de residuo. A diferencia de materias primas puras, el aceite usado no presenta una composición uniforme, ya que depende del tipo de motor (gasolina o diésel), las condiciones de operación, el tiempo de uso, la calidad del lubricante original y la posible mezcla con contaminantes externos (Kipkorir et al., 2021). En particular, los aceites provenientes de motores diésel tienden a presentar una mayor concentración de compuestos aromáticos, hollín y metales pesados, producto de procesos de combustión más severos, mientras que los aceites de motores a gasolina suelen contener una mayor proporción de fracciones ligeras y productos de oxidación menos complejos (Tormos et al., 2016). De igual forma, los aceites de origen industrial pueden diferir significativamente de los automotrices en cuanto a aditivos, estabilidad térmica y grado de contaminación, lo que introduce una dispersión adicional en sus propiedades fisicoquímicas (Kipkorir et al., 2021).

Bajo este contexto, la muestra empleada en el presente estudio se considera representativa dentro de un marco experimental controlado, reconociendo que los resultados obtenidos corresponden a un caso específico y no necesariamente extrapolables a todos los aceites usados. La selección del tamaño de muestra y el número de repeticiones se estableció bajo un nivel de confianza del 95 %, criterio ampliamente utilizado en estudios experimentales, que permite asegurar una adecuada confiabilidad de los datos dentro de condiciones de laboratorio. Debido a la ausencia de información previa sobre la variabilidad del aceite recolectado, se adoptó un enfoque conservador mediante el uso de una proporción estimada $p = 0.5$, la cual representa el escenario de máxima variabilidad y permite dimensionar un tamaño de muestra suficientemente robusto. En concordancia con la naturaleza heterogénea del residuo y las limitaciones propias de la escala de laboratorio, se consideró un margen de error del 20 %, valor que, aunque superior al empleado en sistemas homogéneos, resulta adecuado para capturar la dispersión del sistema sin comprometer la viabilidad experimental.

La caracterización del aceite de motor usado permitió establecer sus propiedades químicas iniciales y confirmar la complejidad de su composición. El análisis termogravimétrico (TGA) del aceite de motor usado permitió evaluar su comportamiento frente a la temperatura y comprender la naturaleza de sus fracciones volátiles y residuales. Las curvas obtenidas en la Figura 15 mostraron pérdidas de masa en diferentes etapas, en una primera zona, que se sitúa entre el inicio de la rampa y aproximadamente los 350 °C, se observó una pérdida leve asociada a moléculas ligeras, posiblemente aditivos degradados, hidrocarburos de bajo peso molecular o trazas de solventes residuales (Zhao et al., 2025). Posteriormente, en la región intermedia de la curva que concluye entre los 450 °C y los 480 °C, se registró la pérdida de masa más significativa, atribuida a la volatilización y degradación de la fracción hidrocarbonada principal, que es la que aportan mayor potencial energético en la pirólisis (Zhang et al., 2025). Finalmente, a temperaturas más elevadas, el aceite mostró un remanente sólido que corresponde a fracciones pesadas y residuos carbonosos difíciles de volatilizar (Wang et al., 2022). Este perfil era esperado para un aceite lubricante usado, pues su composición inicial proviene de destilados del petróleo que, durante su vida útil, sufren procesos de oxidación, craqueo parcial y acumulación de contaminantes metálicos y carbonosos. La tendencia obtenida

coincide con reportes previos de aceites usados, donde se describe que entre el 60 y 80 % de la masa total corresponde a fracciones volátiles aprovechables mediante procesos termoquímicos, mientras que el resto queda como residuo carbonoso (Fuentes, 2007).

El análisis cromatográfico acoplado a espectrometría de masas (GC-MS) que se observa en Figura 27, Figura 28 y Figura 29 permitió identificar la naturaleza de los compuestos presentes en el aceite. Se detectó la existencia de hidrocarburos de cadena media y larga junto con compuestos aromáticos ligeros y algunos oxigenados. La identificación de hidrocarburos pesados confirma que el aceite conserva parte de la formulación lubricante original. Al mismo tiempo, la aparición de aromáticos y oxigenados es coherente con los procesos de oxidación y degradación sufridos durante la operación del motor de gasolina (Domínguez-Rosado et al., 2003). Que se encuentren cadenas de carbono en rangos amplios, desde compuestos ligeros hasta fracciones pesadas, era un resultado esperado debido a la naturaleza compleja de los aceites lubricantes y su degradación durante el uso (Domínguez-Rosado et al., 2003). El análisis de espectrometría mostró compuestos que confirman que el aceite usado no es un desecho homogéneo, sino una mezcla con potencial de ser transformada en fracciones más ligeras mediante pirólisis, donde el craqueo térmico puede redistribuir las cadenas largas en moléculas de menor peso molecular, más cercanas a las de combustibles tradicionales como la gasolina, el diésel u otro de mayor peso molecular (Charusiri & Srisuwan, 2023).

La distribución de peso molecular del aceite de motor usado previo a la pirólisis como se observa en la Figura 17 evidencia una composición predominantemente concentrada en fracciones de masa molecular media a alta, destacando los intervalos de 261–300 g/mol (26.5 %) y >300 g/mol (25.3 %), seguidos por el rango de 141–180 g/mol (21.9 %). Estos resultados indican que la materia prima está constituida principalmente por hidrocarburos de cadena larga y compuestos de mayor complejidad estructural, característicos de aceites lubricantes sometidos a procesos de degradación térmica y oxidativa durante su uso (Mishra et al., 2021). Asimismo, la menor proporción de compuestos en rangos intermedios y bajos, como 181–220 g/mol (5.0 %) y 221–260 g/mol (3.2 %), sugiere una distribución no uniforme, donde predominan estructuras de mayor peso molecular que requieren condiciones térmicas adecuadas para su descomposición. Este comportamiento es consistente con la naturaleza del aceite usado,

el cual contiene aditivos degradados, residuos de combustión y productos de oxidación que incrementan su complejidad molecular (Jahirul et al., 2012).

Es importante señalar que el análisis cromatográfico acoplado a espectrometría de masas (GC-MS) presenta limitaciones como método debido a que la detección de compuestos depende directamente de su volatilidad y estabilidad térmica en la columna utilizada, por lo que las moléculas de muy alto peso molecular o poco volátiles pueden no ser detectadas o aparecer en baja proporción (Robarge, 2010). Asimismo, la dilución de la muestra puede influir en la intensidad de las señales y en la capacidad del equipo para identificar compuestos minoritarios, pudiendo sesgar el espectro hacia fracciones más livianas. Finalmente, deben considerarse la dependencia de bases de datos para la identificación de compuestos y la posibilidad de coincidencias con espectros similares, lo que introduce cierto grado de incertidumbre (Skoog et al., 2018). Por ello, los resultados obtenidos se presentan como una aproximación a la composición del aceite de motor usado y no como una caracterización exhaustiva de todas las moléculas presentes.

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas del aceite de motor usado determinadas a temperatura ambiente, los valores de densidad $865.4 \pm 8.15 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad cinemática $13.9 \pm 0.071 \text{ mm}^2/\text{s}$ obtenidos resultaron coherentes con los reportados en la literatura (Alemu et al., 2025). La viscosidad, aunque elevada en comparación con la de aceite de motor virgen, es consistente debido al grado de degradación del aceite, ya que la acumulación de productos de oxidación, residuos carbonosos y contaminantes metálicos tiende a aumentar la resistencia al flujo (Domínguez-Rosado et al., 2003). No obstante, estos valores siguen siendo adecuados para su procesamiento en pirólisis, ya que el proceso no requiere condiciones de bombeo o atomización tan estrictas como las de un motor de combustión (Demirbas, 2009). La viscosidad medida a 40°C , $6.00 \pm 0.005 \text{ mm}^2/\text{s}$, mostró una disminución significativa lo cual es un comportamiento coherente con la naturaleza de los aceites lubricantes, ya que la viscosidad depende de la movilidad molecular que proporciona un aumento de temperatura (Lemmon et al., 2018). Asimismo, esta medición constituye un estándar en la caracterización de combustibles y aceites lubricantes, permitiendo comparar los resultados obtenidos con valores de referencia reportados en la literatura y en normativas internacionales como la ASTM D445 (ASTM International, 2020).

Por su parte, la densidad medida ($865.4 \pm 8.15 \text{ kg/m}^3$) es lógica para un aceite usado y refleja la presencia tanto de fracciones pesadas como de productos degradados de menor masa molecular. El bajo contenido de humedad, $0.890 \pm 0.009 \text{ \% m/m}$ es un aspecto favorable, pues evita pérdidas energéticas asociadas a la evaporación de agua y reduce la posibilidad de formación de emulsiones que dificulten la transferencia de calor durante la pirólisis (Fong et al., 2017). En cuanto a los sedimentos, aunque su presencia es inevitable debido al arrastre de partículas metálicas, carbonosas y aditivos insolubles durante el uso del aceite en el motor, la cantidad $2.414 \pm 0.04 \text{ \% m/m}$ se mantuvo dentro de un rango razonable que no compromete la operación del sistema experimental (Fong et al., 2017). En síntesis, la caracterización realizada muestra que el aceite de motor usado presenta un perfil coherente con su origen y degradación, confirmando la presencia de fracciones energéticamente aprovechables y propiedades fisicoquímicas que permiten su procesamiento en pirólisis sin requerir tratamientos complejos.

La selección de las rampas de temperatura empleadas en el presente estudio se fundamenta en antecedentes experimentales desarrollados en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), los cuales evidencian la influencia directa del perfil térmico sobre la distribución de productos en procesos de pirólisis a escala de laboratorio. En particular, estudios realizados en el mismo sistema experimental han demostrado que la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia en cada intervalo térmico son variables críticas que afectan la cinética de descomposición, el grado de craqueo y, en consecuencia, el rendimiento de fracciones líquidas con potencial energético. Por ejemplo, en la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE), se determinó que una rampa de $8 \text{ }^\circ\text{C}$ cada 30 minutos favorece la obtención de mayores rendimientos de líquido, lo cual se atribuye a una descomposición más controlada y progresiva del material (Zachrisson, 2024). Con base en lo anterior, en este estudio se seleccionaron dos rampas de calentamiento ($8 \text{ }^\circ\text{C}/30 \text{ min}$ y $12 \text{ }^\circ\text{C}/30 \text{ min}$) con el propósito de evaluar el efecto de un calentamiento más gradual frente a uno más intensivo sobre la distribución de productos. Esta comparación permite analizar no solo el rendimiento global del proceso, sino también las diferencias en la calidad del combustible obtenido.

El rendimiento de los productos del proceso de pirólisis dependió de manera directa de la rampa de calentamiento aplicada, en la condición de $8 \text{ }^\circ\text{C}/30 \text{ min}$, que

corresponde a un incremento más lento de temperatura con un mayor tiempo de residencia total en el reactor de pirólisis, se obtuvo un mayor rendimiento en productos gaseosos en comparación con la otra rampa empleada, alcanzando 72.6 ± 0.43 % m/m en líquidos y 4.1 ± 0.43 % m/m en sólidos, mientras que la fracción gaseosa presentó 20.4 ± 0.43 % m/m. Este comportamiento puede explicarse debido a que un calentamiento más lento permite que el aceite de motor, con su composición compleja, presencia de aditivos y contaminantes, permanezca más tiempo en las etapas de descomposición progresiva (Kuppusamy et al., 2016). Esto favorece la ruptura de moléculas pesadas y la generación de gases ligeros mediante reacciones de craqueo y descomposición térmica, donde a su vez, se limita la formación prematura de ceras y residuos sólidos, lo que concuerda con el menor contenido ceroso observado (2.85 ± 0.43 % m/m).

En contraste, en la rampa de $12\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$, caracterizada por un calentamiento más intenso y menor tiempo de residencia total en el reactor, se observó un leve aumento en los rendimientos de líquido con valor de 74.8 ± 0.43 % m/m y sólidos con 5.8 ± 0.43 % m/m, mientras que la fracción gaseosa disminuyó de manera significativa al 15.7 ± 0.43 % m/m. Se infiere que se debe al rápido incremento de temperatura, lo cual reduce el tiempo de permanencia en las etapas de descomposición gradual, limitando la formación de gases y favoreciendo la condensación de fracciones más pesadas, incluyendo ceras y residuos sólidos provenientes de aditivos del aceite usado (Kuppusamy et al., 2016). Este comportamiento se refleja en el mayor contenido ceroso del líquido pirolizado (3.78 ± 0.43 % m/m), indicando que la rapidez del calentamiento permite la acumulación de moléculas de alto peso molecular que no se descomponen completamente a gas o líquido ligero.

Es importante mencionar que el perfil de calentamiento previo al inicio de la rampa influye de manera significativa, experimentalmente se realizó un precalentamiento relativamente rápido donde se aumentó la temperatura de 0 a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 30 minutos antes de iniciar la rampa de temperatura planteada. Sin embargo, en comparativa un calentamiento inicial rápido puede influir en que la materia prima, en este caso, el aceite de motor alcance rápidamente la zona de descomposición principal, favoreciendo la condensación de líquidos pesados y ceras antes de que puedan degradarse en gases, mientras que un calentamiento inicial más lento permite una degradación más gradual,

promoviendo la formación de gases y la reducción de ceras (Singh, 2019). La combinación del perfil previo y la rampa aplicada explica las diferencias observadas en las fracciones finales.

Asimismo, la escala del experimento, empleando 40.0 g de aceite de motor usado, influye en la magnitud de las diferencias entre rampas. A pequeña escala, la transferencia de calor es más homogénea y rápida, lo que tiende a suavizar las diferencias en los rendimientos líquidos y sólidos, en este contexto, las variaciones se concentran principalmente en la fracción gaseosa y en el contenido ceroso del producto líquido (Jahirul et al., 2012). A su vez, la selección de una masa inicial de 40.0 g de aceite de motor usado para cada corrida experimental responde a criterios de control térmico, reproducibilidad y limitaciones propias del sistema a escala de laboratorio. A esta escala, trabajar con cantidades reducidas permite asegurar una transferencia de calor más uniforme dentro del reactor, minimizando gradientes de temperatura que podrían generar zonas de sobrecalentamiento o descomposición incompleta. Por otra parte, la cantidad de muestra se ajustó a la capacidad del reactor y del sistema de condensación disponible, permitiendo una adecuada recuperación de productos líquidos y una cuantificación más precisa de las fracciones obtenidas, representando un balance entre la viabilidad experimental, la calidad de los datos obtenidos y la posibilidad de extrapolar tendencias del proceso, reconociendo que, a mayor escala, factores como la transferencia de calor y las pérdidas energéticas adquieren un papel aún más determinante (Towler & Sinnott, 2013).

La Figura 18 muestra la evolución de la temperatura en el reactor y la acumulación de combustible líquido durante la pirólisis de aceite de motor usado, considerando dos rampas de calentamiento: 8 °C y 12 °C, con un tiempo de residencia de 30 min en cada paso y un peso inicial de 40 g de aceite de motor. Se observa que la rampa de 12 °C/30 min incrementa la temperatura de manera más rápida y en escalones mayores en comparación con la rampa de 8 °C/30 min, que presenta un aumento más gradual y continuo. Esto significa que el aceite alcanza temperaturas más altas en menos tiempo con la rampa rápida, mientras que la rampa lenta mantiene al material más tiempo en las zonas de temperatura intermedia. En términos de masa acumulada de combustible líquido, la rampa de 12 °C muestra un incremento más pronunciado en las etapas

iniciales, alcanzando aproximadamente 31 g al final del proceso, mientras que la rampa de 8 °C alcanza alrededor de 30 g. Esto indica que, aunque la rampa lenta permite más tiempo de residencia, la rampa rápida favorece una conversión a líquido en menor tiempo, probablemente debido a la condensación temprana de fracciones pesadas antes de su descomposición en gases (Singh, 2019).

Para poder comparar la viabilidad energética de las rampas planteadas se empleó la entalpía de combustión del combustible líquido obtenido como parámetro de comparación, donde a su vez, fue comparado con el aceite de motor usado (véase Cuadro 4). Comparando los combustibles líquidos obtenidos mediante diferentes rampas de calentamiento, se aprecia que en la rampa de 8 °C/30 min se suministró mayor energía (55,710 kJ) en comparación con la rampa de 12 °C/30 min (38,997 kJ), esto debido al tiempo efectivo de uso de la mufla empleada (5 horas frente a 3.5 horas). Esto indica que la rampa más lenta implica un mayor consumo energético total, debido a un período más extenso de transferencia de calor y a pérdidas térmicas acumuladas. La rampa de 12 °C/30 min muestra una entalpía de combustión en el líquido ligeramente superior (47.64 kJ/g) respecto a la rampa de 8 °C/30 min (47.22 kJ/g), sugiriendo que un calentamiento más rápido podría favorecer la obtención de un combustible con mayor contenido energético por unidad de masa. Asimismo, se puede inferir que la variación en la entalpía no es suficientemente grande como para afirmar una superioridad energética concluyente de una rampa sobre la otra. En este sentido, aunque la rampa de 12 °C/30 min muestra una leve ventaja en términos de contenido energético específico, esta debe interpretarse como una tendencia más que una mejora determinante.

La diferencia de la entalpía de combustión de los combustibles obtenidos respecto a la materia prima se comprende en que el lubricante usado presenta una mayor densidad energética debido a la presencia de fracciones pesadas, pero estas mismas fracciones limitan su utilización directa en motores de combustión por problemas de alta viscosidad, estabilidad y generación de emisiones (Zhang et al., 2018). La pirólisis, en este sentido, cumple la función de convertir un residuo denso y heterogéneo en un combustible líquido más ligero y de propiedades comparables con hidrocarburos tradicionales (Ghadiri, 2025). Es importante mencionar que, aunque el enfoque principal del estudio se basó en el combustible líquido, las otras fracciones obtenidas también representan un valor

energético, como por ejemplo, los gases no condensables pueden utilizarse para retroalimentar el proceso, compensando parcialmente el requerimiento energético del reactor, tal como se ha planteado en diversos estudios de pirólisis industrial (Méndez et al., 2019). De igual manera, el sólido o char obtenido presenta utilidad como material precursor para carbón activado o como combustible sólido alternativo en procesos térmicos (Sharma et al., 2015). Esto sugiere que el sistema no solo permite recuperar un combustible líquido utilizable, sino que también genera subproductos con potencial de valorización, lo que refuerza la posible viabilidad técnica y energética del proceso.

El análisis realizado (véase Cuadro 41) desde el punto de vista energético del reactor permitió cuantificar e identificar cómo se distribuye la energía suministrada al reactor entre los distintos componentes del proceso, incluyendo el aceite de alimentación, el combustible líquido, los sólidos y los gases no condensables. Los resultados muestran que la energía total aportada por la mufla y la energía interna del aceite se distribuye principalmente en el calentamiento sensible del sustrato, energía para la vaporización de los compuestos presentes, la ruptura de enlaces químicos y la formación de nuevos enlaces durante la pirólisis (Ghadiri, 2025). De esta forma se evidencia que una fracción significativa del gasto energético se utiliza para superar las barreras de activación de las reacciones termoquímicas, más allá del incremento de temperatura del aceite y su vaporización (Ghadiri, 2025).

Asimismo, es importante mencionar que la influencia de la escala del reactor es un factor determinante en la eficiencia energética del proceso. A nivel de laboratorio, las pérdidas de energía por conducción, convección y radiación son altas debido a la proporción superficie y volumen del equipo, lo que limita la eficiencia térmica (Holman, 2018). En caso de un escalamiento del proceso, la relación de volumen y superficie presenta una condición más adecuada, lo que tiende a reducir las pérdidas relativas y a favorecer la transferencia de calor, aunque a su vez, incrementa la energía requerida para calentar mayores volúmenes de materia. Este comportamiento justifica un aporte energético inicial alto y resalta la importancia de diseñar estrategias de integración térmica y recuperación de calor en plantas piloto o industriales (Towler & Sinnott, 2013).

El análisis cromatográfico del combustible líquido obtenido en ambas rampas de pirólisis permitió determinar una distribución característica en torno a cadenas de

longitud media, con picos predominantes en C_9 y C_{14} – C_{15} para ambos casos. Puntualmente, en la rampa de $8\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ se determinó un promedio de número de carbonos cercano a C_{14} , mientras que en la rampa de $12\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ disminuyó parcialmente siendo en C_{13} , evidenciando un mayor grado de ruptura térmica hacia cadenas más cortas bajo condiciones de calentamiento más intenso. Estos resultados sugieren que la pirólisis promueve la ruptura de enlaces C–C en las cadenas largas presentes en el aceite usado, favoreciendo la formación de compuestos en el rango de la gasolina (C_7 – C_{12}) y del diésel (C_{10} – C_{20}), en concordancia con lo reportado para la degradación térmica de aceites lubricantes residuales (Lopez et al., 2018).

En términos de composición fraccional, la rampa de $12\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ produjo un 35 % de fracciones ligeras (C_7 – C_{11}), mientras que la rampa de $8\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ alcanzó un 30 %. A su vez, la fracción pesada ($\geq C_{17}$) disminuyó de 27.1 % en la rampa más lenta a 24.7 % en la más rápida, lo que confirma la tendencia hacia un producto químicamente más liviano. Este comportamiento refleja el cambio fundamental entre el aceite de motor usado, caracterizado por la abundancia de fracciones largas ($>C_{20}$) y la presencia de aditivos y contaminantes (Kuppusamy et al., 2016).

Las Figuras 21 y 22 muestran la distribución de peso molecular de los compuestos presentes en el combustible líquido obtenido bajo las dos rampas de calentamiento evaluadas. En ambos casos se observa una distribución amplia de compuestos, lo cual confirma que el producto de pirólisis es una mezcla compleja compuesta por hidrocarburos de distintas longitudes de cadena. Sin embargo, se identifican diferencias relevantes entre ambas condiciones que permiten inferir el efecto de la rampa de calentamiento sobre el grado de craqueo térmico. En la rampa de $8\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$, la distribución presenta una mayor proporción de compuestos en rangos intermedios (aproximadamente entre 181 y 240 g/mol), con un pico máximo en el intervalo de 181–200 g/mol (17.1 %). Asimismo, se observa una presencia considerable de fracciones pesadas ($>260\text{ g/mol}$), lo que sugiere que el calentamiento más gradual favorece una descomposición progresiva, pero no completa, de las cadenas largas presentes en el aceite de motor usado. Este comportamiento es consistente con un mayor tiempo de residencia en zonas de temperatura intermedia, donde ocurren reacciones de craqueo parcial sin llegar a una fragmentación extensiva. Por su parte, la rampa de $12\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ muestra una

redistribución hacia compuestos de menor peso molecular, evidenciada por un aumento en la fracción de compuestos en el rango de 100–160 g/mol y una disminución relativa en algunos intervalos intermedios. Aunque también se presenta un pico importante en 201–220 g/mol (18.1 %), la mayor presencia de compuestos más ligeros indica que el calentamiento más rápido favorece un mayor grado de ruptura de enlaces C–C, promoviendo la formación de moléculas de menor tamaño. En conjunto, las curvas de peso molecular evidencian que el proceso de pirólisis permite modificar significativamente la estructura del aceite de motor usado, desplazando la distribución original hacia compuestos de menor tamaño molecular, y que la selección de la rampa de calentamiento constituye un parámetro clave para controlar la calidad del producto final (Mishra et al., 2021).

Las propiedades fisicoquímicas respaldan esta interpretación. La densidad medida para los combustibles de ambas rampas, 820.1 ± 7.56 y $818.6 \text{ kg/m}^3 \pm 7.54$, se encuentran cerca del rango reportado para el diésel $820\text{--}850 \text{ kg/m}^3$ (CRE, 2016), lo que indica similitud en la composición global y sugiere una compatibilidad con procesos de almacenamiento y transporte diseñados para dicho combustible. En contraste, la viscosidad cinemática ($0.923 \pm 0.011 \text{ mm}^2/\text{s}$ y $0.930 \pm 0.011 \text{ mm}^2/\text{s}$) resultó mucho menor que la del diésel ($2\text{--}4 \text{ mm}^2/\text{s}$) y más cercana a la de la gasolina ($0.4\text{--}0.8 \text{ mm}^2/\text{s}$) (CRE, 2016). Esta baja viscosidad, si bien puede favorecer la atomización del combustible durante la combustión, representa una desventaja en cuanto a lubricidad y funcionamiento en sistemas de inyección diésel, lo que hace necesaria su corrección mediante fraccionamiento, aditivos o mezclas (Tarangan et al., 2023).

Por otra parte, el poder calorífico ($44,872 \pm 153.8 \text{ J/g}$ y $45,023 \pm 111.7 \text{ J/g}$) se ubica dentro del intervalo característico del diésel ($42,500\text{--}46,000 \text{ J/g}$) y ligeramente por encima del de la gasolina ($43,500\text{--}44,500 \text{ J/g}$) (CRE, 2016). Los resultados de la comparación de medias del poder calorífico de los combustibles líquidos obtenidos mediante las rampas de $8 \text{ }^\circ\text{C}/30 \text{ min}$ y $12 \text{ }^\circ\text{C}/30 \text{ min}$ evidencian que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas condiciones experimentales. El análisis mediante prueba t para muestras independientes arrojó un valor de t de 0.79, inferior al valor crítico de 2.776 para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, por lo que no se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias. Este resultado indica que, a pesar de

las diferencias observadas en la distribución de peso molecular y en los rendimientos de productos, el contenido energético por unidad de masa del combustible líquido se mantiene estadísticamente similar para ambas rampas. Desde el punto de vista fisicoquímico, este comportamiento puede explicarse por la naturaleza de los hidrocarburos presentes en el producto de pirólisis, ya que, aunque la rampa de 12 °C/30 min favorece la formación de compuestos de menor peso molecular, estos aún pertenecen a rangos característicos de hidrocarburos con alto contenido energético. En otras palabras, la redistribución molecular observada no implica una pérdida significativa de energía química, sino una reorganización de las cadenas carbonadas hacia estructuras más ligeras, pero energéticamente comparables.

Esto refleja un adecuado desempeño energético, posicionando al combustible de pirólisis como un candidato viable para aplicaciones energéticas tras los debidos tratamientos. Sin embargo, deben considerarse limitaciones importantes: la mezcla contiene fracciones que van desde C₇ hasta C₂₄, lo que significa que en su estado crudo no puede emplearse directamente como gasolina o diésel sin una etapa de destilación o refinamiento para separar los cortes comerciales (Demirbas, 2004). La pirólisis de aceite de motor usado demostró ser una estrategia efectiva de valorización, ya que el producto líquido obtenido presenta un perfil de cadenas más cortas y medianas, con densidad y poder calorífico similares al diésel, aunque con una viscosidad reducida y la necesidad de purificación. Esto sugiere que el material generado puede emplearse como base para mezclas o como materia prima para refinación, posicionándose como un recurso alternativo con potencial energético, reduciendo la acumulación de residuos oleosos, promoviendo un mejor aprovechamiento de los subproductos y contribuyendo a una mayor circularidad en el manejo de los recursos energéticos.

A pesar de los resultados obtenidos y del potencial técnico demostrado para la valorización del aceite de motor usado mediante pirólisis, es importante reconocer limitaciones asociadas a la disponibilidad y recolección de la materia prima, particularmente en el contexto de Guatemala. La gestión de aceites usados en el país no se encuentra completamente sistematizada, lo que dificulta la obtención de volúmenes constantes y homogéneos para su procesamiento a mayor escala. La recolección depende en gran medida de prácticas informales, talleres independientes y cadenas de manejo no

estandarizadas, lo que introduce variabilidad en la calidad del residuo y limita la continuidad operativa de procesos industriales basados en esta materia prima. A su vez, es importante reconocer que existen limitantes económicas que condicionan su implementación a pequeña, mediana y gran escala. Se hace importante mencionar que es ideal implementar técnicas que permitan aumentar la eficiencia del proceso y reducir el consumo energético, a fin de mejorar su rentabilidad global. Además, los costos asociados a la infraestructura, la operación continua, la gestión de residuos secundarios y la adaptación del producto final a normativas de calidad y mercado pueden representar barreras significativas. Por lo tanto, resulta indispensable estudiar y considerar los aspectos económicos y financieros que determinarán la competitividad y sostenibilidad real de esta alternativa dentro del sector energético (Hussain et al., 2020).

IX. CONCLUSIONES

- La caracterización integral del aceite de motor usado, mediante el análisis termogravimétrico se determinó el rango de degradación, iniciando en 350 °C y finalizando en 480 °C, por lo que empleó el intervalo temperaturas entre 380 °C y 460 °C para la ejecución de las rampas de temperatura. La distribución de número de carbonos por cadena y peso molecular evidenció un predominio de compuestos en rangos de masa molecular media y alta, con mayor proporción en los intervalos de 191–220 g/mol (26.5 %) y >300 g/mol (25.3 %), lo que confirma la presencia de hidrocarburos de cadena larga y estructuras complejas características de aceites lubricantes degradados. La evaluación de densidad ($865.4 \pm 8.15 \text{ kg/m}^3$) y viscosidad (@23 °C $13.9 \pm 0.071 \text{ mm}^2/\text{s}$ y @40 °C $6.00 \pm 0.005 \text{ mm}^2/\text{s}$) mostró valores adecuados para su procesamiento en pirólisis sin necesidad de pretratamientos complejos, lo que permite considerar el aceite de motor usado como materia prima adecuada para la obtención de combustibles líquidos alternativos.
- El rendimiento de la pirólisis estuvo directamente influenciado por la rampa de calentamiento, donde la rampa más lenta de 8 °C/30 min favoreció la generación de gases ligeros ($20.4 \pm 0.43 \text{ \% m/m}$) y redujo la formación de ceras ($2.85 \pm 0.43 \text{ \% m/m}$), pero implicó un mayor consumo energético total de 55,710 kJ. En contraste, la rampa más rápida, 12 °C/30 min, resultó más efectiva para la producción de combustible líquido, alcanzando un mayor rendimiento en proporción masa-masa de $74.8 \pm 0.43 \text{ \% m/m}$, empleando un consumo energético total menor de 38,997 kJ y presentó una entalpía de combustión ligeramente superior, 47.64 kJ/g frente a 47.22 kJ/g.
- La caracterización del combustible líquido obtenido por pirólisis de aceite de motor usado presenta un predominio de cadenas medias como C₉, C₁₄ y C₁₅. La rampa de 12 °C/30 min produjo un 35.0 % de fracciones ligeras (C₇–C₁₁) frente a 29.9 % en la rampa de 8 °C/30 min, mientras que las fracciones pesadas ($\geq \text{C}_{17}$) fueron de 24.7 % a 27.0 % respectivamente. El comportamiento fue consistente debido al predominio de compuestos con menor peso molecular (100-160 g/mol) de la rampa más rápida con

un 34.5 % frente a 30.0 %. En cuanto a las propiedades fisicoquímicas, ambos combustibles presentaron densidades similares de 820.1 ± 7.56 y 818.6 ± 7.54 kg/m³ para la rampa de 8 °C/30 min y 12 °C/30 min respectivamente, mismas que se ubicaron cercanas al rango de diésel: 820–850 kg/m³. La viscosidad cinemática de 0.923 ± 0.011 y 0.930 ± 0.011 mm²/s se ubicó entre los rangos de diésel (2–4 mm²/s) y gasolina (0.4–0.8 mm²/s). Respecto al poder calorífico de $44,872 \pm 153.8$ J/g y $45,023 \pm 111.7$ J/g se encuentran dentro del intervalo característico del diésel (42,500–46,000 J/g), sin presentar diferencias estadísticamente significativas entre ambas condiciones. En conjunto, estos resultados evidencian que el combustible obtenido presenta similitudes composicionales y energéticas con el diésel.

X. RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo un análisis térmico del sistema de pirólisis para determinar y cuantificar pérdidas energéticas y proponer estrategias de recuperación de calor, buscando mejorar la eficiencia global del proceso a escala de laboratorio.
- Realizar una evaluación de distintas rampas de temperatura con aumentos de temperatura más intensos para verificar su efecto sobre los rendimientos y composición de los productos.
- Evaluar el efecto del tiempo de permanencia del aceite dentro del reactor sobre la composición y rendimiento del combustible, para maximizar la producción de fracciones líquidas.
- Implementar sistemas de captura del gas producido, almacenarlo y caracterizarlo mediante métodos cromatográficos, complementando los balances de masa y energía del proceso.
- Analizar las propiedades del residuo sólido de la pirólisis para posibles aplicaciones como adsorbente, material de construcción o como aditivo en otros procesos industriales.
- Explorar la co-pirólisis mezclando aceite de motor usado con otros residuos orgánicos o plásticos para evaluar cambios en rendimientos, composición del líquido y propiedades energéticas.
- Probar el combustible líquido en motores de combustión interna o calderas piloto para comparar su eficiencia y emisiones frente a combustibles fósiles convencionales.
- Realizar una destilación del producto líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado, para separar las diferentes fracciones con el objetivo de obtener un producto más cercano a combustibles comerciales como diésel o gasolina y evaluar su potencial de uso directo.

- Implementar el proceso a escala piloto para estudiar cómo cambian los rendimientos y la eficiencia energética, identificando posibles limitaciones y ajustes necesarios para su operación a mayor escala.
- Investigar el uso de catalizadores o aditivos durante la pirólisis para modificar selectivamente la distribución de productos, mejorar el rendimiento líquido y reducir la formación de residuos sólidos o cerosos.
- Evaluar el combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado en fracciones correspondientes a intervalos de temperatura específicos de la rampa empleada, con el fin de evaluar cómo varía la composición y las propiedades del producto según la temperatura de formación.
- Realizar un estudio económico basado en los rendimientos y productos obtenidos en este trabajo para estimar la viabilidad financiera de implementar la pirólisis de aceite de motor usado a escala piloto o industrial.
- Evaluar el proceso de pirólisis utilizando aceite lubricante virgen como materia prima, con el fin de reducir la variabilidad asociada a la composición del aceite usado y permitir una comparación más controlada de los resultados en función del tipo y marca del lubricante.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aisien, F. A., et al. (2023). Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of ... (caracterización con ASTM y GC–MS). ScienceDirect / Fuel Processing (ejemplo de estudio con análisis GC–MS).
- Akintunde, J. K., Komolafe, T. R., Olugbenga, O. A., Olajide, O. O., & Olorunsogo, O. O. (2015). Toxicological effects of used engine oil on the liver and kidney of male Wistar rats. *Environmental Toxicology*, 30(5), 541–550. <https://doi.org/10.1002/tox.21928>
- Alemu, N. A., Nallamothu, R. B., & Lakew, G. A. (2025). Optimization, characterization, and GC-MS analysis of recycled used engine oil by solvents and adsorbent extraction. *Scientific Reports*, 15(1), 517.
- ALS Global. (2010). Library of petroleum products and other organic compounds.
- Al-Selwi, N. (2025). A Study of Temperature and Residence Time Influence on Pyrolysis of Used Motor Oil. Hill Publisher. Recuperado de: <https://wap.hillpublisher.com/ArticleDetails.aspx?cid=1452>
- Amar, S., Ardila, A. N., & Barrera, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 306-326.
- API. (2017). Life Cycle Assessment of Used Oil Management: Re-refining and Combustion of Used Lubricating Oil (ERM Report). American Petroleum Institute. <https://www.api.org/-/media/files/certification/engine-oil-diesel/publications/lca-of-used-oil-mgmt-erm-10012017.pdf>
- Arellano, G. A. (2010). *Implantación de análisis de aceite en motores de combustión* (Bachelor's 75alor).
- ASTM International. (2020). ASTM D445-20: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). ASTM International. <https://www.astm.org/d0445-20.html>
- Cabrera-Escobar, C., Al-Salem, S. M., Bousquet, C., & Farhat, A. (2025). A review on global recovery policy of used lubricating oils. *Environments*, 12(5), 135. <https://doi.org/10.3390/environments12050135>

- Castellanos López, M. P., Imeri Cabrera, L. M., Morfin Ajá, P. I., Méndez García, P. A., Súchite Sosa, D. A., Maldonado de León, H. A., & Piedrasanta Ramírez, J. M. (2017). Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípites de palma africana Deli x AVROS a nivel laboratorio y su escalamiento (Tesis de Licenciatura). Universidad del Valle de Guatemala. Repositorio UVG. <https://repositorio.uvg.edu.gt/entities/publication/02fa30ca-421f-4e85-8b35-188b9177ea64>
- Castells, X. E., & García, E. V. (2012). *La pirólisis: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Charusiri, W., & Srisuwan, S. (2023). Catalytic copyrolysis of used waste plastic and lubricating oil: Product distribution and characterization. *ACS Omega*, 8(12), 11123–11132. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05823>
- Coherent Market Insights. (2025). Waste Oil Market—Report Summary. <https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/waste-oil-market>
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2016). NOM-016-CRE-2016. Especificaciones de calidad de los petrolíferos.
- Coronado, M. (2016). El aceite usado de motor como combustible alternativo.
- Congreso de la República de Guatemala (1986). La Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente
- Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(1), 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.003>
- Demirbas, A. (2017). Pyrolysis of waste materials for fuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(7), 673–681. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1262309>
- Dighero Valenzuela, R. (2023). Pirólisis de residuos de aguacate para la obtención de combustibles sólido y líquido (Trabajo de grado - Pregrado). Universidad del Valle de Guatemala. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4818>
- Domínguez, M. O., Avilés, A. C., Sánchez, Y. M., & Sánchez, F. L. (2018). Capacidad calorífica. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 5(9).

- ENEOS México. (s. f.). Blog de ENEOS México. Recuperado de https://www.eneos.mx/blog/blog_page2.html
- Fong, W., Silva, W., & García, M. (2017). Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26(2), 135–144. <https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n2.2017.6810>
- Fuentes, M. J. (2007). Pyrolysis and combustion of waste lubricant oil from diesel engines. *Fuel*, 86(4), 481–489. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.014>
- Fuentes, M. J., Font, R., Gómez-Rico, M. F., & Martín-Gullón, I. (2007). Pyrolysis and combustion of waste lubricant oil from diesel cars: Decomposition and pollutants. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79(1-2), 215-226.
- FUW Trends in Science & Technology Journal. (2018). The Specific Heat Capacities and Rate of Cooling of Some Grades of Engine Oil Samples. Vol. 3 No. 2B, pp. 736–739.
- Gaddam, C. K. (2012). Physical and chemical characterization of gasoline particulates and differences relative to diesel soot.
- García, R. K. (2021). *Buenas prácticas de manufactura para el proceso de recolección, clasificación, tratamiento final de los desechos de carburantes para estaciones de consumo* (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- García, Á. N. (1993). *Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos* (Doctoral dissertation, Universitat d'Alacant/Universidad de Alicante).
- García, A. G. R., & Ávila, J. M. R. (2019). Obtención de Combustible Alternativo Mediante Pirólisis de Aceite Lubricante Residual. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 6.
- Ghadiri, E. (2025). The pyrolysis process of used engine oil: From waste to valuable resource. INVEXOIL. Recuperado de <https://invexoil.com/pyrolysis-process-of-used-engine-oil/>
- Guerrero, T. F. (2016). *Determinación de la degradación y contaminación del aceite de motores Otto en función del kilometraje recorrido* (Master's thesis, Universidad del Azuay).
- Grand View Research. (2024). Lubricants Market Size And Share | Industry Report, 2030. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lubricants-market>

- Green City Times. (2024). The environmental impact of used engine oil. <https://www.greencitytimes.com/environmental-impact-of-used-engine-oil/>
- Guillén, L. F. (2007). *Procedimiento para el análisis de muestras de aceite usado en la agroindustria* (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Gutiérrez, A. J. (2003). Diseño de procesos en ingeniería química. Reverté.
- Heywood, J. B. (2018). Internal combustion engine fundamentals (2.^a ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Holman, J. P. (2018). Heat Transfer (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Hussain, A. Z., Santhoshkumar, A., & Ramanathan, A. (2020). Assessment of pyrolysis waste engine oil as an alternative fuel source for diesel engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(6), 2277–2293. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09516-y>
- ICAS. (2024). Overview on the environmental impact of used engine oil. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/387331306_Overview_on_the_environmental_impact_of_used_engine_oil
- International Lubricant Manufacturers Association. (2021). Global lubricants industry statistics. ILMA. <https://www.ilma.org/statistics>
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels production through biomass pyrolysis — A technological review. *Energies*, 5(12), 4952–5001. <https://doi.org/10.3390/en5124952>
- Jennings, W., Mittlefehldt, E., & Stremple, P. (1997). Analytical gas chromatography. Academic Press.
- Kipkorir, D., Kiprop, S., & Kiprotich, J. (2021). Properties of waste-distilled engine oil and biodiesel blends. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(9), 092201. <https://doi.org/10.1115/1.4050705>
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2016). Biodegradation and recycling of organic and inorganic waste through pyrolysis process. *Environmental Technology & Innovation*, 5, 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.02.006>
- Lemmon, E. W., Huber, M. L., & McLinden, M. O. (2018). NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP), Version 10.0.

National Institute of Standards and Technology.

- Liang, Z., Chen, L., Alam, M. S., Rezaei, S. Z., Stark, C., Xu, H., & Harrison, R. M. (2018). Comprehensive chemical characterization of lubricating oils used in modern vehicular engines utilizing GC×GC-TOFMS. *Fuel*, 220, 792-799.
- Lopez, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Adrados, A., & Aranzabal, A. (2017). Pyrolysis of municipal plastic wastes: Influence of raw material composition. *Waste Management*, 33(3), 693–702. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.014>
- Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. (2018). Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Energies*, 11(11), 2973. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2973>
- Lufilsur. (s. f.). Motor y transporte. Lufilsur. Recuperado de: <https://www.lufilsur.es/categoria/motor-transporte/>
- Mancheno, M., Arévalo, P., Romero, J., Malo, I., Matute, D., & Ramos, R. (2017). Análisis fisicoquímico de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 26(2), 84-105.
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 23(1), 60-67.
- Maricq, M. M. (2007). Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science*, 38(11), 1079-1118.
- Massa, L. A., Cusi, R., Cuneo, S. A., Alvaro, M. V., Escate, E., & Flores, A. (2019). La regeneración de los aceites usados de los motores de combustión disminuye el impacto ambiental en la ciudad de Ica.
- Mishra, A., et al. (2021). Pyrolysis of waste lubricating oil/waste motor oil to generate high-grade fuel oil: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Mishra, A. (2023). Waste Motor Oil Pyrolysis for Clean Energy Generation in a Continuous Reactor. *AIChE Annual Meeting*. Recuperado de:

- <https://aiche.confex.com/aiche/s23/meetingapp.cgi/Paper/656176>
- Mishra, A. (2023). Optimization of process parameters for waste motor oil pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 240, 107509. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107509>
- Mobil México. (s. f.). Nuestras marcas. Recuperado de <https://www.mobil.com.mx/es-mx/lubricantes/nuestras-marcas>
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2025). NIST Chemistry WebBook. Recuperado de <https://webbook.nist.gov/chemistry/>
- Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L., & Gómez-Barea, A. (2011). Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in energy and combustion Science*, 37(5), 611-630.
- Olivares, A. P. (2000). *Introducción a la ingeniería química: balances de masa y energía. Tomo I*. Universidad Iberoamericana.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2020). Used lubricating oil: Environmental impact and management. UNEP. <https://www.unep.org/resources>
- Rahbari, A. (2013). Analytical model for predicting the heat loss effect on biomass particle pyrolysis. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 5(1), 011004.
- Riesco-Ávila, J. M. (2022). Effects of heating rate and temperature on the yield and properties of pyrolysis oil obtained from waste plastic bag. *Sustainability*, 14(15), 9026. <https://doi.org/10.3390/su14159026>
- Robarge, T. (2010). Product Focus: GC-MS. *Lab Manager*. <https://www.labmanager.com/gc-ms-adding-a-second-dimension-to-gc-1-19172>
- Román Gutiérrez, J. D. (2017). *Efectos de los parámetros de operación de la pirólisis rápida sobre el levoglucosano en un reactor Hot Plate* (Doctoral dissertation).
- Romero, L. M., Cruz, M. A., & Sierra, F. E. (2016). Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. *Tecnura*, 20(48), 89-99.
- Santhoshkumar, A., et al. (2020). Assessment of pyrolysis waste engine oil as an alternative fuel for compression ignition engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142(3), 1061–1070. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09516-y>

- Santhoshkumar, A. (2020). Recycling of waste engine oil through pyrolysis process for alternative fuel production. *Waste Management*, 102, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.026>
- Sharma, A., Kumar, R., & Singh, S. (2015). Pyrolysis of waste lubricating oil: Production of char, liquid fuel and gases. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.010>
- Singh, R. K., et al. (2019). Impact of fast and slow pyrolysis on the degradation of organic matter and product distribution. *ScienceDirect*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967118309152>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (7.^a ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Soltes, E. J., & Elder, T. J. (2018). Pyrolysis. In *Organic chemicals from biomass* (pp. 63-99). CRC press.
- Song, G.-J., Seo, Y.-C., Pudasainee, D., & Kim, I.-T. (2010). Characteristics of gas and residues produced from electric arc pyrolysis of waste lubricating oil. *Waste Management*, 30(7), 1230–1237. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.009>
- Superintendencia de Administración Tributaria. (2023). Análisis estadístico del parque vehicular. Recuperado de <https://portal.sat.gob.gt/portal/parque-vehicular/>
- Tarangan, M., Irhamna, I., Hasfita, H., & Adiansyah, F. (2023). Production of alternative fuels from waste lubricating oil by pyrolysis process: Fuel properties and performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 1091–1102. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109110>
- Tormos, B., Miró Mezquita, G., Pérez-Gutiérrez, T., & de-Diego-Pardo, J. (2016). Aceites de motor de baja viscosidad: ahorro de combustible y ensayos en condiciones reales. *DYNA: Ingeniería e Industria*, 91(6), 668-674.
- Torres, M. Á. O., Velázquez, A. L., Franco, R. A., Sánchez, E. J. A., Franco, F. A., Peña, Y. R., & Retureta, J. G. L. (2020). Mantenimiento automotriz basado en un diagnóstico tribológico. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 10(1).
- Tovar, C. T., Bolaños, E. Q., & Silva, W. F. (2017). Caracterización físico-química de

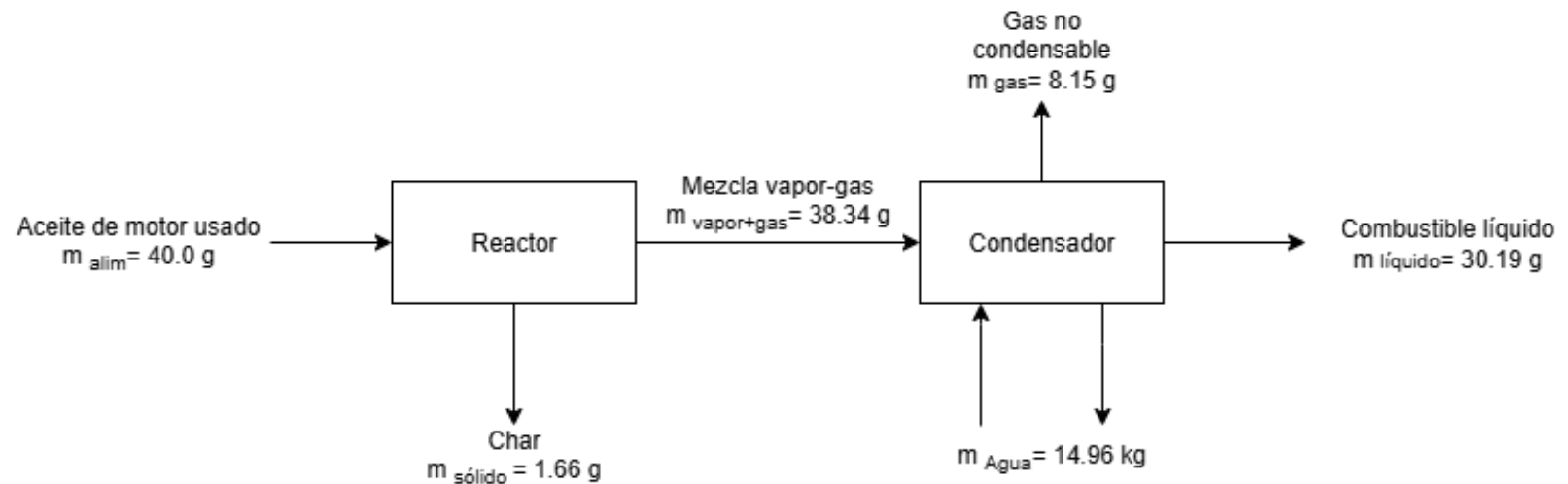
- aceites usados de motores para su reciclaje. *Prospectiva*, 15(2), 135-144.
- Towler, G., & Sinnott, R. (2013). Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Treybal, R. J. (1980). Mass-transfer operations (3.^a ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- UNEP & ISWA. (2024). Global Waste Management Outlook 2024. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>
- UNEP. (2012). Compendium of Recycling and Destruction Technologies for Waste Oils. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/compendium-recycling-and-destruction-technologies-waste-oils>
- Unidad de Informática del Instituto de Química. (2016). Cromatografía de gases. UNAM. Recuperado de <https://uniquim.iquimica.unam.mx/glossary/cromatografia-de-gases/>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2025). Managing, reusing, and recycling used oil. <https://www.epa.gov/recycle/managing-reusing-and-recycling-used-oil>
- Valdés, D., & Adan, S. (2000). *Recomendaciones para el manejo de residuos contaminantes y de desechos peligrosos producidos por plantas industriales* (Doctoral dissertation, Universidad del Valle de Guatemala).
- Veses, A., Aznar, M., López, J. M., Callén, M. S., Murillo, R., & García, T. (2021). Production and characterization of oils from the pyrolysis of automotive shredder residue. *Waste Management*, 119, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.037>
- Vimos Patajalo, L. J., & Coro Medina, O. X. (2021). Estudio comparativo de la composición y propiedades fisicoquímicas de aceites lubricantes automotrices comercializados en Riobamba.
- Vilca, K., Rodríguez, S., Atarama, U., Cueva, C., Concha, W. J., Atausupa, M. A., & Gosgot, W. (2022). Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 43-56.

- Villamizar, E. J. (2022). Caracterización del proceso de pirólisis de aceites de motor usado.
- Wang, L., Zhang, Y., & Li, X. (2022). Analysis of pyrolysis characteristics of oily sludge in different temperature ranges. *ACS Omega*, 7(10), 8934–8942. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01994>
- Zachrisson Montenegro, S. (2024). Comparación energética del combustible líquido obtenidos a partir del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) a diferentes rampas de temperaturas (Trabajo de grado - Pregrado). Universidad del Valle de Guatemala. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/5163>
- Zhao, F., Zhang, Y., & Zhang, L. (2025). The effect of temperature on pyrolysis products during oil shale thermal decomposition. *Frontiers in Energy Research*, 13, 12274543.
- Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Li, Q., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2019). Pyrolysis of waste lubricating oil using calcined dolomite as a catalyst in a fluidized bed reactor. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(13), 1610–1619. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1547756>
- Zięba, J., & Kościelniak, P. (2000). An analysis of the similarity of motor oils on the basis of their elemental composition. *Forensic science international*, 112(2-3), 81-90.

XII. ANEXOS

A. Balances de masa y energía

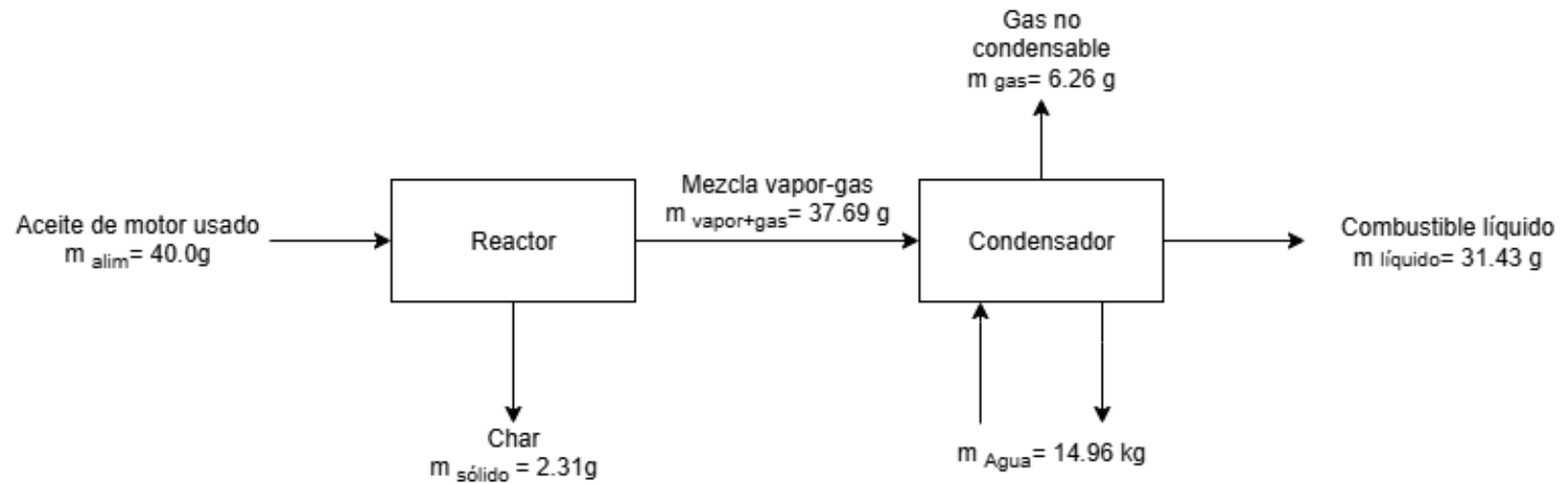
Figura 23. Balance de masa del proceso de pirólisis en la rampa 8 °C/30 min



Fuente: Propia

Se muestra el balance de masa en el reactor de pirólisis y condensador empleados para la ejecución de la rampa de temperatura 8 °C/30 min.

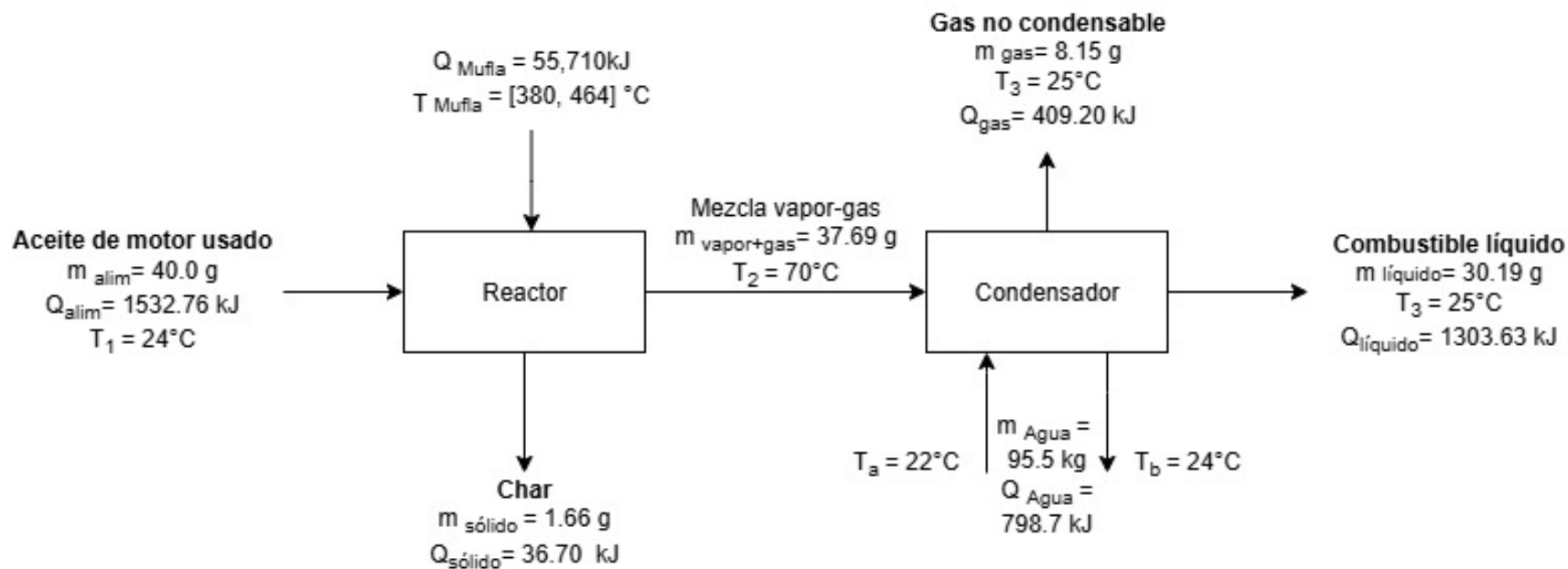
Figura 24. Balance de masa del proceso de pirólisis en la rampa 12 °C/30 min



Fuente: Propia

Se muestra el balance de masa en el reactor de pirólisis y condensador empleados para la ejecución de la rampa de temperatura 12 °C/30 min.

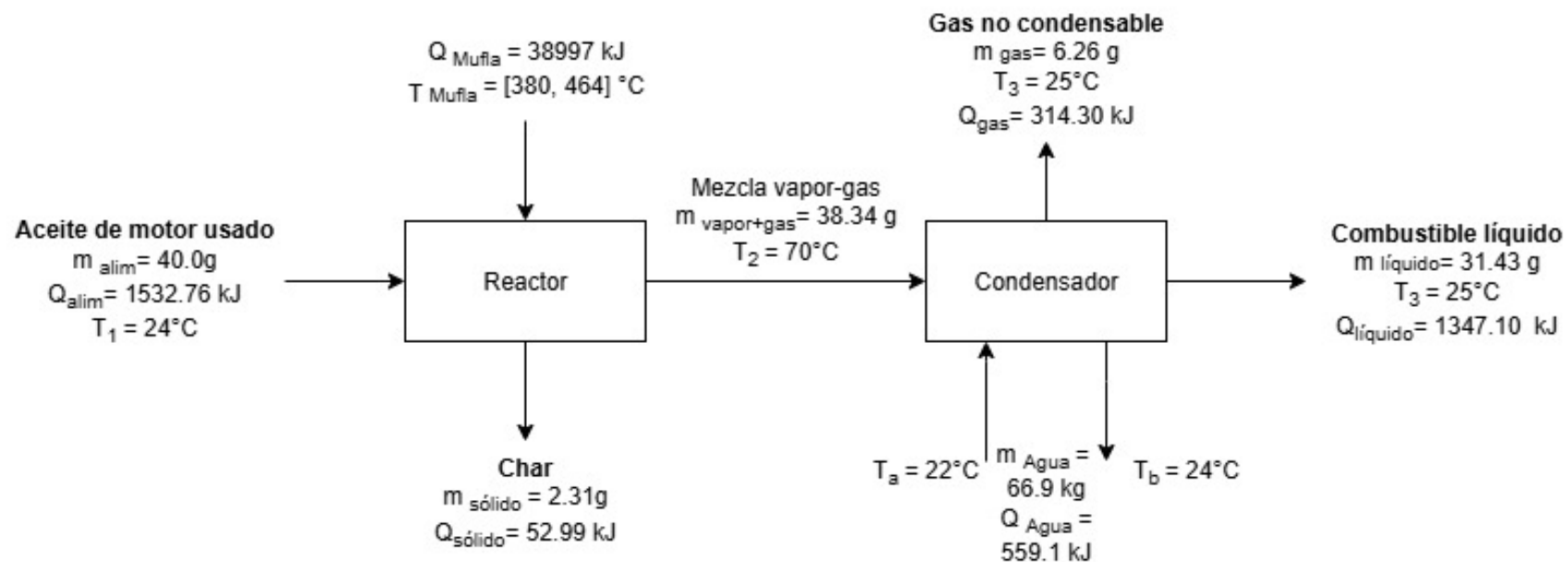
Figura 25. Balance de energía del proceso de pirólisis en la rampa 8 °C/30 min



Fuente: Propia

Se muestra el balance de masa y energía en el reactor de pirólisis y condensador empleados para la ejecución de la rampa de temperatura 8 °C/30 min.

Figura 26. Balance de energía del proceso de pirólisis en la rampa 12 °C/30 min



Fuente: Propia

Se muestra el balance de masa y energía en el reactor de pirólisis y condensador empleados para la ejecución de la rampa de temperatura 8 °C/30 min.

B. Ecuaciones

Ecuación 1. Tamaño de muestra

$$n = \frac{(Z_{\alpha/2})^2 (\sigma)^2}{(E)^2}$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$ = Valor z con 95 % de confianza

σ = Desviación estándar poblacional

E = Margen de error

n = Tamaño de muestra

Ecuación 2. Constante de calibración para viscosímetro capilar

$$C_c = \frac{v_{H_2O @ T (^{\circ}C)}}{t_{H_2O}}$$

Donde:

v = Viscosidad cinemática del agua (mm²/s)

C_c = constante de calibración del viscometro (mm²/s²)

t = Tiempo de flujo del agua a través del capilar (s).

Ecuación 3. Viscosidad cinemática

$$v_m @ T (^{\circ}C) = t_m C_c$$

Donde:

v_m = Viscosidad cinemática de la muestra (mm²/s)

C = Constante de calibración del viscometro (mm²/s²)

t = Tiempo de flujo del fluido a través del capilar (s).

Ecuación 4. Densidad

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

Donde:

ρ = Densidad (kg/m³).

m = Masa (kg).

V = Volumen (m³).

Ecuación 5. Viscosidad dinámica o absoluta

$$\mu = \nu * \rho$$

Donde:

ν = Viscosidad cinemática (m²/s).

μ = Viscosidad dinámica (Pa·s)

ρ = Densidad del fluido (kg/m³)

Ecuación 6. Fracción másica (% m/m)

$$\% \frac{m}{m} = \frac{m_i}{m_{total}} * 100$$

Donde:

$\% m/m$ = Porcentaje en masa-masa

m_i = Masa del componente de interés

m_{total} = Masa total de la muestra

Ecuación 7. Balance de masa en el proceso de pirólisis

$$m_{alim} = m_{gas} + m_{comb\ liq} + m_{sólido} + m_{cera}$$

Donde:

m_{alim} = Masa de alimentación al reactor

m_{gas} = Masa de los gases no condensables

$m_{comb\ liq}$ = Masa del combustible líquido de pirólisis

$m_{sólido}$ = Masa del sólido (Char) contenido en el reactor

m_{cera} = Masa de contenido ceroso

Ecuación 8. Rendimiento de los productos (% m/m)

$$\% \frac{m}{m} = \frac{m_{prod}}{m_{alim}} * 100$$

Donde:

$\% m/m$ = Porcentaje en masa-masa

m_i = Masa del componente del producto

m_{total} = Masa de alimentación

Ecuación 9. Flujo másico de agua de enfriamiento para condensador

$$\dot{m}_{H_2O} = q_{H_2O} * \rho_{H_2O @ 23^\circ C}$$

Donde:

$\dot{m}_{H_2O}$ = Flujo másico de agua para enfriamiento

q_{H_2O} = Caudal de agua de enfriamiento

$\rho_{H_2O @ 23^\circ C}$ = Densidad de agua a temperatura ambiente

Ecuación 10. Masa de agua de enfriamiento para condensador

$$m_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} * t_{operación}$$

Donde:

$\dot{m}_{H_2O}$ = Flujo másico de agua para enfriamiento

m_{H_2O} = Masa de agua para enfriamiento

t_{op} = Tiempo de operación del condensador

Ecuación 11. Energía en forma de calor proporcionada por la mufla

$$Q = \dot{Q} * t_{operación}$$

Donde:

$\dot{Q}$ = Potencia de la mufla

Q = Energía añadida al reactor por la mufla

t_{op} = Tiempo útil de operación

Ecuación 12. Energía interna de materia prima

$$Q_{alim} = m_{MP} * P.C_{MP}$$

Donde:

Q_{alim} = Energía en forma de calor proporcionada por el aceite de motor usado

m_{MP} = Masa de materia prima

$P.C_{MP}$ = Poder calorífico de la materia prima

Ecuación 13. Energía en forma de calor sensible de la materia prima

$$Q_{sensible} = m_{MP} * C_{p_{MP}} * \Delta T_{op}$$

Donde:

$Q_{sensible}$ = Energía del calor sensible para calentar la materia prima

m_{MP} = Masa de materia prima

$C_{p_{MP}}$ = Capacidad calorífica de la materia prima

ΔT_{op} = Cambio de temperatura en la operación

Ecuación 14. Energía en forma de calor latente de la materia prima

$$Q_{latente} = m_{MP} \sum_i \Delta H_{vap\ i} w_i$$

Donde:

$Q_{latente}$ = Energía del calor latente para vaporizar la materia prima

$\Delta H_{vap\ i}$ = Entalpía de vaporización de cada uno de los compuestos identificados (kJ/kg)

w_i = Abundancia del compuesto identificado.

m_{MP} = Masa de materia prima

Ecuación 15. Energía para rotura de enlaces

$$Q_{rotura} = \sum_i n_i D_i$$

Donde:

Q_{rotura} = Energía en forma del calor requerido para la rotura de enlaces de los compuestos identificados en la materia prima. Siempre se considera positivo.

n_i = número de enlaces del tipo i que se rompen.

D_i = energía de enlace del tipo i (kJ/mol de enlace).

Ecuación 16. Energía para formación de enlaces

$$Q_{formación} = \sum_j n_j D_j$$

Donde:

$Q_{formación}$ = Energía en forma de calor requerido para la rotura de enlaces de los compuestos identificados en la materia prima. Siempre se considera negativo

n_j = número de enlaces del tipo j que se forman

D_j = energía de enlace del tipo j (kJ/mol de enlace)

Ecuación 17. Energía interna del gas no condensable

$$Q_{gas} = m_{gas} * P.C_{gas}$$

Donde:

Q_{gas} = Energía en forma de calor proporcionada por el gas no condensable

m_{gas} = Masa del gas no condensable

$P.C_{gas}$ = Poder calorífico del gas no condensable

Ecuación 18. Energía interna del combustible líquido

$$Q_{liq} = m_{liq} * P.C_{liq}$$

Donde:

Q_{liq} = Energía en forma de calor proporcionada por el combustible líquido

m_{liq} = Masa del combustible líquido

$P.C_{liq}$ = Poder calorífico del combustible líquido

Ecuación 19. Energía interna del producto sólido

$$Q_{sol} = m_{sol} * P.C_{sol}$$

Donde:

Q_{sol} = Energía en forma de calor proporcionada por el combustible líquido

m_{sol} = Masa del combustible líquido

$P.C_{sol}$ = Poder calorífico del combustible líquido

Ecuación 20. Porcentaje de abundancia de compuestos identificados por Cromatografía GC-MS

$$\% \text{ Abundancia} = \frac{A_i}{\sum_k A_k}$$

Donde:

$\% \text{ Abundancia}$ = Porcentaje por área (%).

A_i = Área del pico del compuesto i

$\sum_k A_k$ = Suma de áreas de todos los picos detectados

Ecuación 21. Media muestral

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

$\bar{X}$ = Valor promedio

$x_{1,2,3,\dots,n}$ = Valor de la propiedad medida

n = Número de unidades medidas

Ecuación 22. Desviación estándar muestral

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_1 - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar muestral

$\bar{X}$ = Valor promedio

x_1 = Valor de la medición

n = Número de unidades medidas

Ecuación 23. Coeficiente de variación

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

$C.V.$ = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar muestral

$\bar{X}$ = Valor promedio

Ecuación 24. Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones

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

S_y = Incertidumbre del valor calculado (y) por multiplicación o división

y = Valor original calculado

$S_{a,b,\dots,n}$ = Incertidumbre de los instrumentos o valores empleados

a, b, ..., n = Valores medidos

Ecuación 25. Cálculo de incertidumbres para sumas y restas

$$S_y = \sqrt{(S_a)^2 + (S_b)^2 + \dots + (S_n)^2}$$

S_y = Incertidumbre del valor calculado (y) por multiplicación o división

$S_{a,b,\dots,n}$ = Incertidumbre de los instrumentos o valores empleados

Ecuación 26. Varianza combinada

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{gl}$$

Donde:

σ_x = Desviación estándar muestral

gl = Grados de libertad

n_x = Número de unidades medidas

Ecuación 27. Valor estadístico t

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{s_p^2 \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Donde:

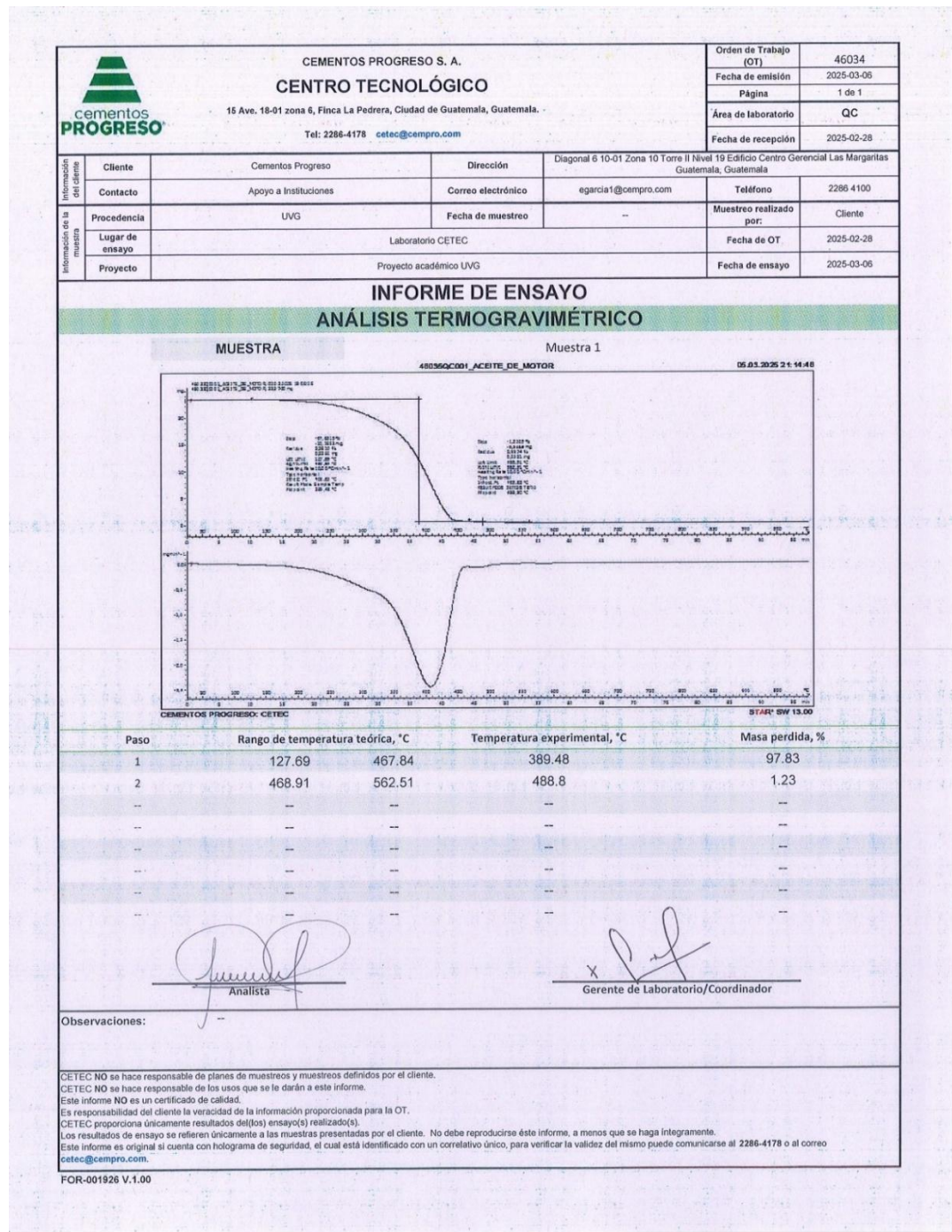
s_p = Varianza combinada

$\bar{x}_1$ = Valor promedio de ambas rampas

n_x = Número de unidades medidas

C. Datos originales

Figura 27. Primer análisis termogravimétrico de aceite de motor usado



Se muestra el primer análisis termogravimétrico del aceite de motor usado. Se realizó en triplicado realizado con ayuda de Cementos Progreso en el Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC).

Figura 28. Segundo análisis termogravimétrico de aceite de motor usado

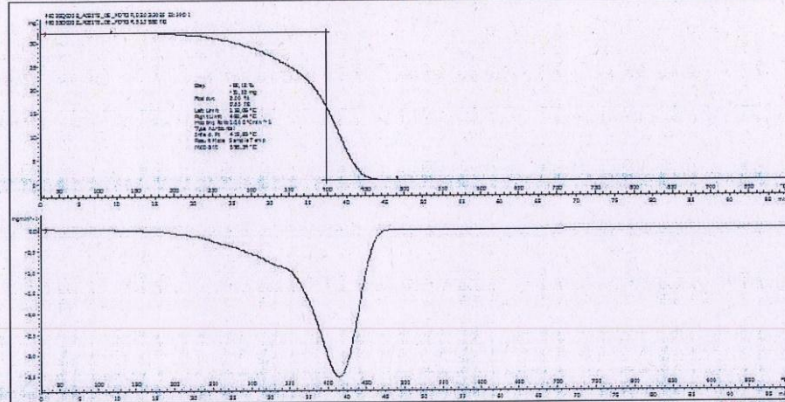
 CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com		Orden de Trabajo (OT)		46034	
		Fecha de emisión		2025-03-06	
		Página		1 de 1	
		Área de laboratorio		QC	
		Fecha de recepción		2025-02-28	
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Apoyo a Instituciones	Correo electrónico	egarcia1@cempro.com	
Información de la muestra	Procedencia	UVG	Fecha de muestreo	---	
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Muestreo realizado por:
	Proyecto	Proyecto académico UVG			Fecha de OT
				2025-02-28	Cliente
				2025-03-06	

INFORME DE ENSAYO
ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

MUESTRA
Muestra 2

48036Q002 ACEITE DE MOTOR

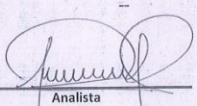
05.03.2025 21:15:20

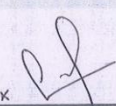


CEMENTOS PROGRESO: CETEC

STAR SW 13.00

Paso	Rango de temperatura teórica, °C		Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %
1	118.06	492.44	398.34	98.18
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---


 Analista


 Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones:

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

FOR-001926 V.1.00

Se muestra el segundo análisis termogravimétrico del aceite de motor usado. Se realizó en triplicado realizado con ayuda de Cementos Progreso en el Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC).

Figura 29. Tercer análisis termogravimétrico de aceite de motor usado

 CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Piedra, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 ceotec@cempro.com		Orden de Trabajo (OT)		46034
		Fecha de emisión		2025-03-06
		Página		1 de 1
		Área de laboratorio		QC
		Fecha de recepción		2025-02-28

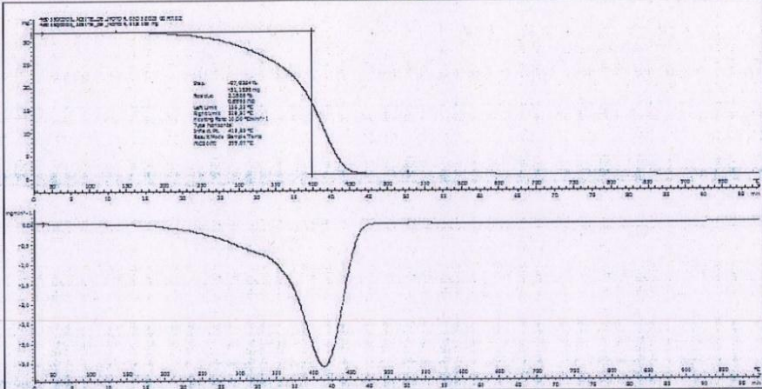
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Apoyo a Instituciones	Correo electrónico	egarcia1@cempro.com	
Información de la muestra	Procedencia	UVG	Fecha de muestreo	--	Muestreo realizado por: Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT 2025-02-28
	Proyecto	Proyecto académico UVG			Fecha de ensayo 2025-03-06

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

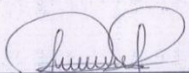
MUESTRA
Muestra 3
06.03.2025 21:15:58

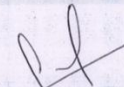
46034QC003_ACEITE_DE_MOTOR



CEMENTOS PROGRESO- CETEC STARV SW 13.00

Paso	Rango de temperatura teórica, °C	Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %
1	136.25 528.81	399.07	97.94
2	---	---	---
3	---	---	---
4	---	---	---
5	---	---	---
6	---	---	---
7	---	---	---
8	---	---	---
9	---	---	---
10	---	---	---


 Analista


 Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: --

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

FOR-001926 V.1.00

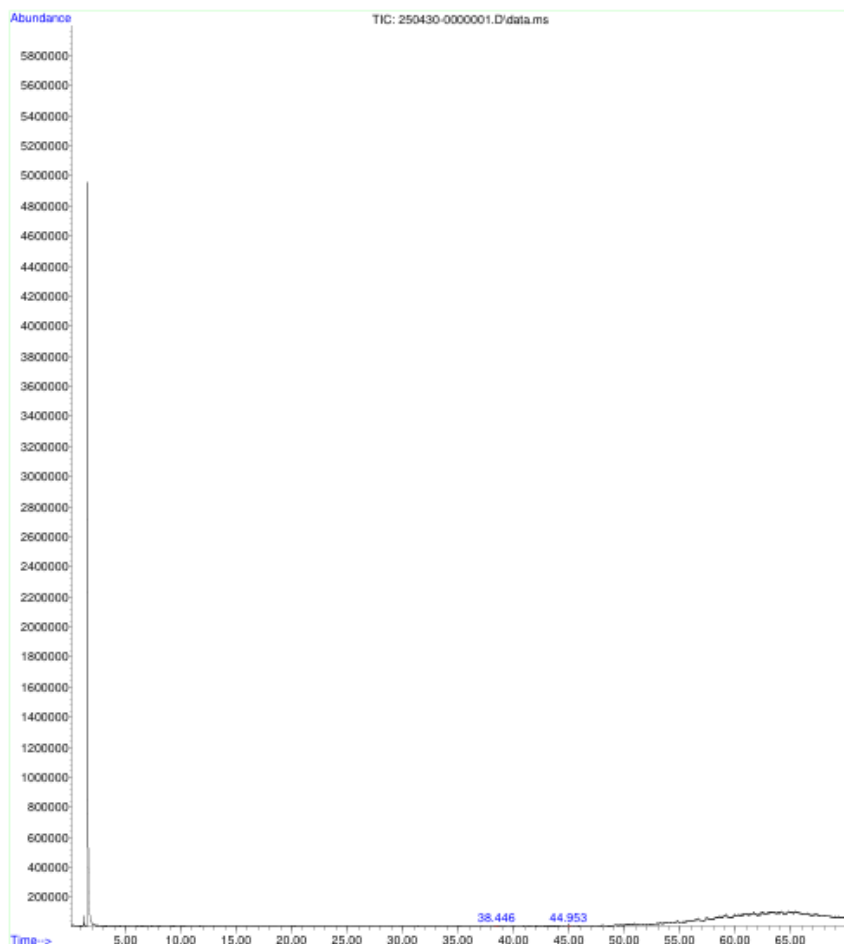
Se muestra el tercer análisis termogravimétrico del aceite de motor usado. Se realizó en triplicado realizado con ayuda de Cementos Progreso en el Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC).

Cuadro 6. Compuestos presentes en el aceite de motor usado en la primera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	38.446	38.40	2,4,6-trimetiloctano
2	44.955	61.60	Eicosano

Se observan los compuestos presentes en el aceite de motor usado empleando un Espectrofotómetro GC-Masas. Primera corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 30. Espectrograma de la primera corrida GC-Masa del aceite de motor usado a pirolizar



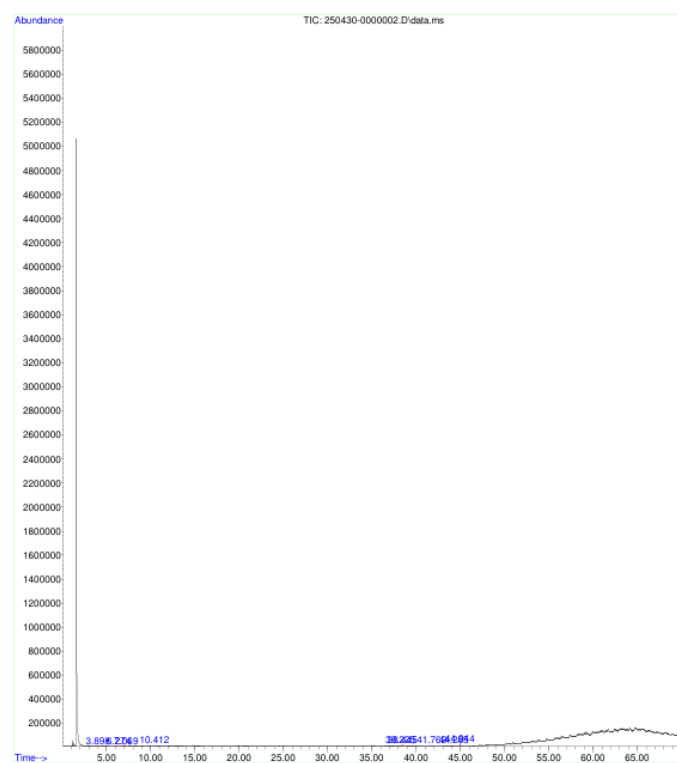
Se muestra el primer espectrograma GC-Masa del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Cuadro 7. Compuestos presentes en el aceite de motor usado en la segunda corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	3.899	12.81	p-xileno
2	6.274	8.58	1-etil-2-metilbenceno
3	7.070	9.20	1-etil-2-metilbenceno
4	10.413	8.50	Endo-triciclo[5.2.1.0(2.6)]decano
5	38.223	5.58	6-metil-1-heptanol
6	38.446	17.98	Eicosano
7	41.771	9.60	Hexadecano
8	44.264	3.03	Diéster alilo–tridecilo del ácido oxálico.
9	44.946	24.72	Hexatriacontano

Se observan los compuestos presentes en el aceite de motor usado empleando un Espectrofotómetro GC-Masas. Segunda corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 31. Segundo espectrograma GC-Masa del aceite de motor usado a pirolizar



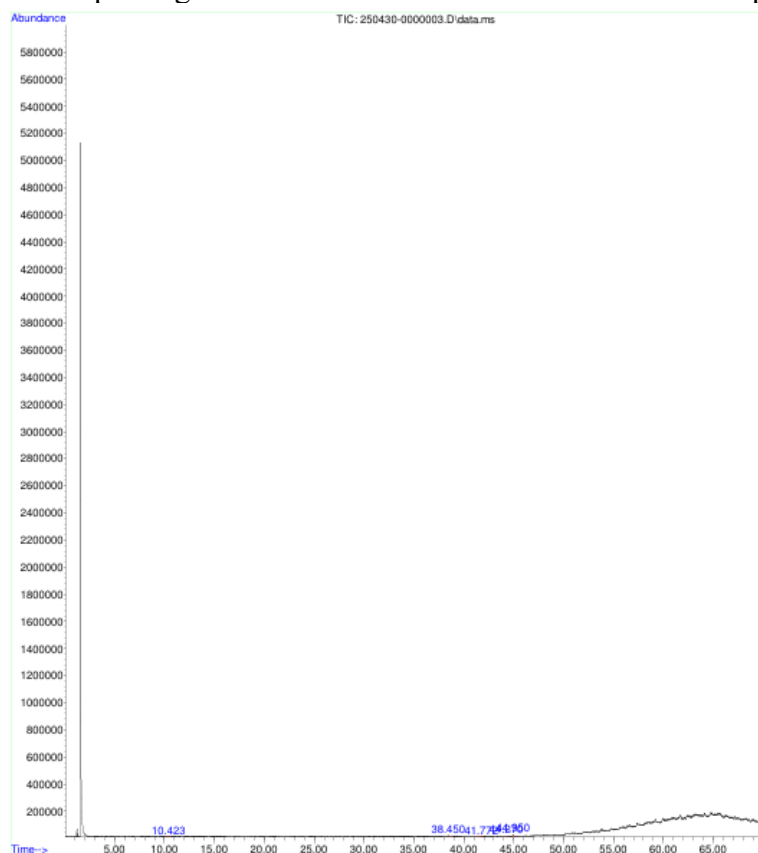
Se muestra el segundo espectrograma GC-Masa del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Cuadro 8. Compuestos presentes en el aceite de motor usado en la tercera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	10.422	9.33	Endo-triciclo[5.2.1.0(2.6)]decano
2	38.450	27.42	2,4,6-trimetiloctano
3	41.771	15.10	1-(Hexiloxi)-3-metilhexano
4	44.268	5.59	Diéster alilo-tridecilo del ácido oxálico
5	44.950	42.56	Heptacosano

Se observan los compuestos presentes en el aceite de motor usado empleando un Espectrofotómetro GC-Masas. Segunda corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 32. Tercer espectrograma GC-Masa del aceite de motor usado a pirolizar



Se muestra el tercer espectrograma GC-Masa del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Cuadro 9. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del aceite de motor usado a temperatura ambiente

Número de corrida	Calibración Tiempo (± 0.01 s)	Aceite de motor @23 °C Tiempo (± 0.01 s)
1	4.39	64.02
2	4.94	63.05
3	4.93	64.11
4	4.17	62.90
5	4.08	65.03

Se muestran los tiempos recolectados de manera experimental para la calibración, empleando agua destilada y la muestra, aceite de motor usado. Las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó el software Vegas Pro para el cálculo del tiempo en segundos.

Cuadro 10. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del aceite de motor usado a 40 °C

Número de corrida	Calibración Tiempo (± 0.01 s)	Aceite de motor 40 °C Tiempo (± 0.01 s)
1	4.97	39.86
2	4.09	38.97
3	4.06	38.86
4	4.12	38.09
5	4.09	38.84

Se muestran los tiempos recolectados de manera experimental para la calibración, empleando agua destilada a 40 °C y la muestra, aceite de motor usado a la misma temperatura. Las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó el software Vegas Pro para el cálculo del tiempo en segundos.

Cuadro 11. Pesos experimentales para cálculo de densidad del aceite de motor usado a temperatura ambiente

Número de corrida	Calibración Peso (± 0.0001 g)	Aceite de motor Peso (± 0.0001 g)	Volumen estándar – Picnómetro (mL)
1	24.2052	21.1148	24.36
2	24.1985	21.0438	24.36
3	24.2152	21.0869	24.36

Se muestran los pesos recolectados de manera experimental para la calibración, empleando agua destilada y la muestra, aceite de motor usado. Las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó un picnómetro de vidrio con capacidad de 24.360 mL y una balanza analítica OHAUS con incertidumbre ± 0.0001 .

Cuadro 12. Datos para determinar la cantidad de residuos sólidos presentes en el aceite de motor usado a pirolizar

Número de corrida	Peso de residuos sólidos ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso de muestra aceite de motor usado ($\pm 0.0001\text{g}$)
1	0.1285	4.7384
2	0.1046	4.8591
3	0.1166	4.9410

Se muestran los pesos recolectados de manera experimental de los sólidos presentes en la muestra de aceite de motor usado. Las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una centrifugadora Benchmark LC-8 Series, con un tiempo de centrifugación de 15 minutos y una velocidad 4000 revoluciones por minuto.

Cuadro 13. Datos para determinar la humedad presente en el aceite de motor usado

Número de corrida	Peso de muestra aceite de motor ($\pm 0.001\text{g}$)	Porcentaje de humedad (%MC) (± 0.01)
1	1.078	0.86
2	0.981	0.92
3	1.002	0.90
4	1.021	0.88
5	1.009	0.89

Se muestran las humedades recolectadas de manera experimental de la muestra de aceite de motor usado con sus respectivos pesos de muestra. Las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una balanza de humedad OHAUS para su medición.

Cuadro 14. Recolección de datos de cada corrida para la construcción de la rampa de temperatura de 8 °C/30 minutos

Temperatura (°C)	Tiempo acumulado (min)	Corrida 1 Peso (±0.0001 g)	Corrida 2 Peso (±0.0001 g)	Corrida 3 Peso (±0.0001 g)
380	30	0.7950	0.8138	0.9653
388	60	1.6253	2.5137	2.9049
396	90	4.4601	5.0741	5.4754
404	120	8.2025	8.6063	8.9021
412	150	13.1704	13.3192	13.3461
420	180	18.8721	18.8681	18.8232
428	210	24.3604	24.3549	24.1386
436	240	28.0339	28.1472	28.0988
444	270	29.7448	29.6654	29.7827
452	300	30.2852	30.0232	30.1582
460	330	30.4675	30.0948	30.2454

En el cuadro anterior se reportan los pesos acumulados durante la pirólisis con una rampa de 8 °C con tiempos de residencia de 30 minutos, las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una balanza analítica Pioneer con incertidumbre ± 0.0001 . La cantidad de aceite de motor que ingresó al reactor fue de aproximadamente 40.0 g.

Cuadro 15. Recolección de datos de cada corrida para la construcción de la rampa de temperatura de 12 °C/30 minutos

Temperatura (°C)	Tiempo acumulado (min)	Corrida 1 Peso (±0.0001 g)	Corrida 2 Peso (±0.0001 g)	Corrida 3 Peso (±0.0001 g)
380	30	0.4895	0.4623	0.8363
392	60	2.3618	2.3933	3.0503
404	90	5.6550	5.5671	6.7176
416	120	11.4021	11.1227	12.7862
428	150	19.5926	18.9699	21.064
440	180	27.4183	26.465	28.4044
452	210	30.7789	30.1201	31.1524
464	240	31.6942	30.8303	31.5739

En el cuadro anterior se reportan los pesos acumulados durante la pirólisis con una rampa de 12 °C con tiempos de residencia de 30 minutos, las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una balanza analítica Pioneer

con incertidumbre ± 0.0001 . La cantidad de aceite de motor que ingresó al reactor fue de aproximadamente 40.0 g.

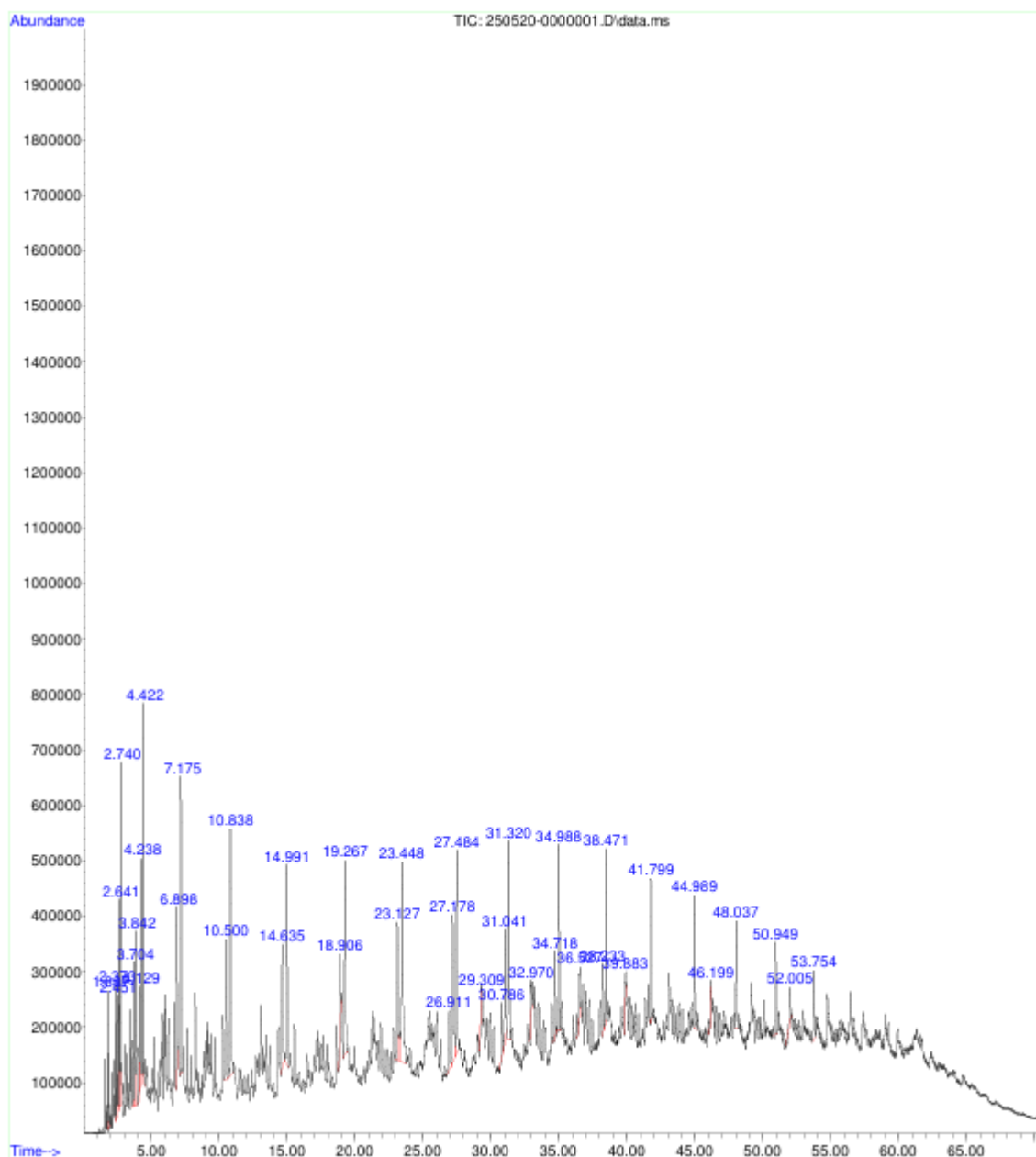
Cuadro 16. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/30 minutos de la primera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.889	0.84	Heptano
2	2.371	0.99	2-Metilheptano
3	2.453	1.09	3-Metilheptano
4	2.639	1.79	1-Octeno
5	2.739	2.29	Octano
6	3.703	2	2,4-Dimetilheptano
7	3.84	2.19	3-Metiloctano
8	4.131	1.31	2,6-Dimetil-1-hepteno
9	4.24	2.51	1-Noneno
10	4.422	3.88	Nonano
11	6.897	2.43	1-Deceno
12	7.174	4.28	Decano
13	10.499	3.12	1-Undeceno
14	10.84	4.8	Undecano
15	14.634	3.03	1-Dodeceno
16	14.993	4.39	Dodecano
17	18.905	0.88	1-Trideceno
18	19.269	4.69	Tridecano
19	23.126	3.76	2-Tetradeceno
20	23.449	6.46	Tetradecano
21	26.911	1.64	1-Undeceno, 5-metil
22	27.179	4.64	1-Pentadeceno
23	27.484	4.94	Pentadecano
24	29.308	-0.3	2-hexil-1-decanol
25	30.786	1.08	3-Hexadeceno
26	31.041	2.48	1-Nonadeceno
27	31.318	4.3	Hexadecano
28	32.969	0.49	1-Pentadeceno
29	34.716	1.67	1-Nonadeceno
30	34.989	3.67	Heptadecano
31	36.526	1.23	5-propildeceno
32	38.232	1.4	1-Octadeceno
33	38.469	3.42	Octadecano

34	39.883	0.36	2-metilundecano
35	41.798	2.6	Hexadecano
36	44.991	3.03	Eicosano
37	46.197	0.03	1,1,4,4,7,7-hexametil-ciclononano
38	48.039	2.36	Heneicosano
39	50.950	1.96	1-cloro-Heptacosano
40	52.005	0.70	Nonadecano
41	53.752	1.54	1-heptadeceno

Se observan los compuestos presentes con sus respectivos tiempos de retención y área bajo la curva en el combustible líquido de pirólisis de la rampa 8 °C/30 minutos. Primera corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 33. Primer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min



Se muestra el primer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

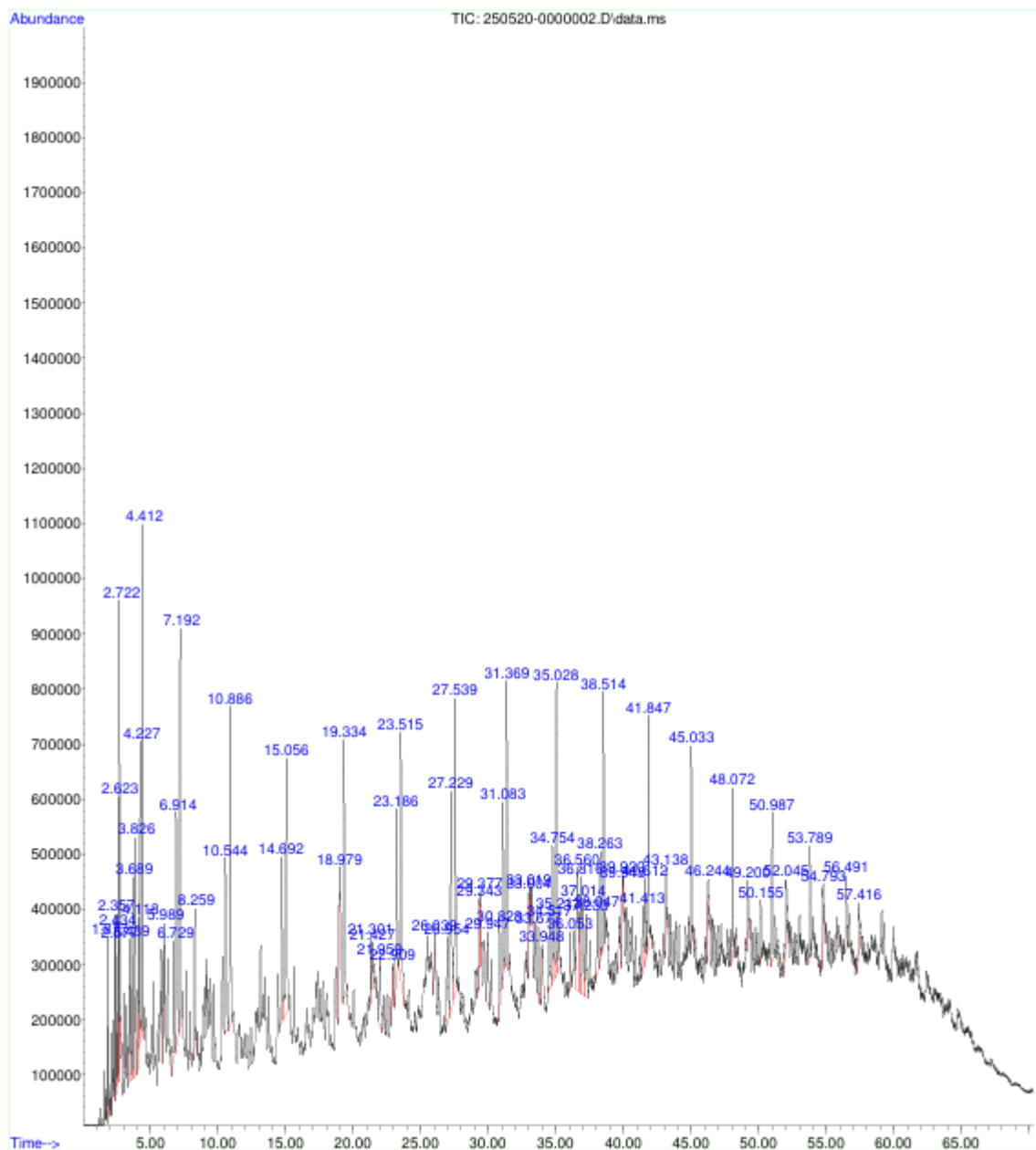
Cuadro 17. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/30 minutos de la segunda corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.875	0.57	Heptano
2	2.357	0.71	2-Metilheptano
3	2.435	0.78	3-Metilheptano
4	2.576	0.49	2-Metil-1-hepteno
5	2.621	1.29	1-Octeno
6	2.721	1.62	Octano
7	3.44	0.85	2,6-Dimetil-1-hepteno
8	3.69	1.47	2,4-Dimetilheptano
9	3.827	1.56	3-Metiloctano
10	4.118	1.09	2,6-Dimetil-1-hepteno
11	4.227	1.69	1-Noneno
12	4.413	2.84	Nonano
13	5.987	0.67	4-Metilnonano
14	6.729	1.15	2-Metil-1-noneno
15	6.915	2.52	1-Deceno
16	7.193	3.21	Decano
17	8.262	0.94	Ácido sulfuroso, éster undecilo
18	10.545	2.17	1-Undeceno
19	10.886	3.4	Undecano
20	14.693	2.45	1-Dodeceno
21	15.057	3.44	Dodecano
22	18.978	0.53	1-Trideceno
23	19.333	3.51	Tridecano
24	21.302	0.51	Ácido sulfuroso, éster dodecilo
25	21.425	0.33	Benceno, 1-(dodeciloxi)-2-nitro
26	21.957	1.06	Ciclotetradecano
27	22.908	0.09	7-Metil-3-undeceno
28	23.186	2.19	1-Tetradeceno
29	23.518	3.76	Tetradecano
30	26.038	-0.02	Ácido oxálico, éster ciclobutilpentadecilo
31	26.952	1.36	1-Undeceno, 5-metil
32	27.229	3.69	1-Pentadeceno
33	27.539	3.81	Pentadecano
34	29.344	0.67	Ciclopentadecano
35	29.376	0.59	Ciclotetradecano
36	29.945	0.97	Tridecano
37	30.827	0.94	Ciclohexadecano

38	31.082	2.08	9-Eicoseno
39	31.369	3.16	Hexadecano
40	33.002	0.09	Ácido oxálico, éster ciclobutilpentadecilo
41	33.02	0.10	Ciclotetradecano
42	33.675	0.86	Ciclotetradecano
43	33.948	0.22	3-metilundecano
44	34.516	0.9	8-Heptadeceno
45	34.753	1.65	1-Heptadeceno
46	35.03	3.37	Heptadecano
47	35.212	0.74	E-14-Hexadecenal
48	36.054	0.67	5-octadeceno
49	36.559	2.27	2,6,11-Trimetildodecano
50	36.818	1.45	Etil-ciclododecano
51	37.013	1.54	Ciclopentadecano
52	37.232	1.19	Ciclotetradecano
53	38.046	0.73	3-Eicoseno
54	38.264	1.12	1-Octadeceno
55	38.515	2.64	Octadecano
56	39.92	0.3	Octadecano
57	39.947	0.01	1,1,4,4,7,7-hexametil-ciclononano
58	41.412	0.78	9-Nonadeceno
59	41.612	0.89	1-Nonadeceno
60	41.849	2.11	Nonadecano
61	43.136	0.7	Nonadecano
62	45.033	1.82	Eicosano
63	46.243	0.19	Eicosano
64	48.071	1.71	Heneicosano
65	49.199	0.58	1,1,4,4,7,7-hexametil-ciclononano
66	50.154	0.54	Eicosano
67	50.987	1.7	Nonadecano
68	52.047	1.2	Heneicosano
69	53.789	1.29	Eicosano
70	54.794	0.72	2,6,11-Trimetildodecano
71	56.491	0.96	Heneicosano
72	57.416	0.77	Eicosano

Se observan los compuestos presentes con sus respectivos tiempos de retención y área bajo la curva en el combustible líquido de pirólisis de la rampa 8 °C/30 minutos. Segunda corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 34. Segundo espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 8 °C/30 min



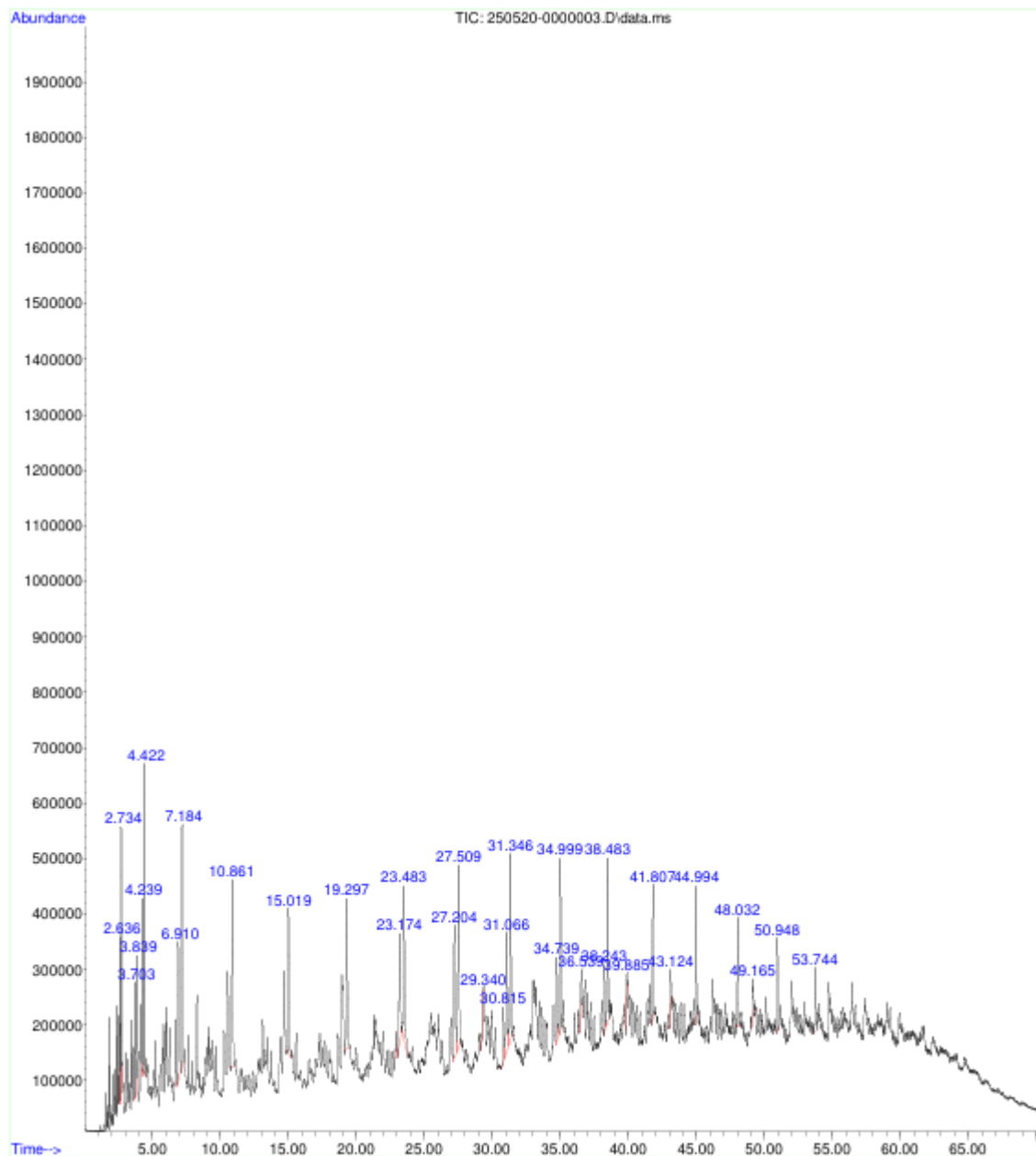
Se muestra el segundo espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Cuadro 18. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 8 °C/30 minutos de la tercera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	2.635	1.89	1-Octeno
2	2.735	2.34	Octano
3	3.704	1.92	2,4-Dimetilheptano
4	3.84	1.91	3-Metiloctano
5	4.24	2.39	1-Noneno
6	4.422	4.19	Nonano
7	6.911	3.73	1-Deceno
8	7.183	4.81	Decano
9	10.859	4.99	Undecano
10	15.021	4.42	Dodecano
11	19.296	5.15	Tridecano
12	23.172	3.64	1-Tetradeceno
13	23.486	5.7	Tetradecano
14	27.207	5.5	1-Pentadeceno
15	27.507	5.86	Pentadecano
16	29.34	0.05	2-Piperidinona, N-[4-bromo-n-butil]
17	30.814	1.77	7-Hexadeceno
18	31.068	4.62	9-Eicoseno
19	31.346	5.56	Hexadecano
20	34.739	2.55	5-Octadeceno
21	34.998	4.75	Tetradecano
22	36.54	1.42	2-hexil-1-decanol
23	38.242	1.76	1-Octadeceno
24	38.483	4.17	Octadecano
25	39.884	0.15	1,1,4,4,7,7-hexametil-ciclononano
26	41.808	3.17	Nonadecano
27	43.122	0.7	Heptadecano
28	44.992	2.87	Eicosano
29	48.03	2.55	Heneicosano
30	49.167	1.15	1,1,4,4,7,7-hexametil-ciclononano
31	50.95	2.43	1-Hexadeceno
32	53.743	1.89	1-cloro-Heptacosano

Se observan los compuestos presentes con sus respectivos tiempos de retención y área bajo la curva en el combustible líquido de pirólisis de la rampa 8 °C/30 minutos. Tercera corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 35. Tercer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 8 °C/30 min



Se muestra el tercer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/ 30 min del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Cuadro 19. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min a temperatura ambiente

Número de corrida	Calibración Tiempo (± 0.01 s)	Combustible líquido Tiempo (± 0.01 s)
1	1.96	1.99
2	1.95	2.00
3	2.02	1.99

Se muestran los tiempos recolectados de manera experimental para la calibración, empleando agua destilada y la muestra, del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min. Las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó el software Vegas Pro para el cálculo del tiempo en segundos.

Cuadro 20. Pesos experimentales para cálculo de densidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min a temperatura ambiente

Número de corrida	Calibración (Agua) Peso (± 0.0001 g)	Aceite de motor Peso (± 0.0001 g)	Volumen estándar – Picnómetro (mL)
1	24.3125	19.9902	24.36
2	24.3125	19.9971	24.36
3	24.3125	19.949	24.36

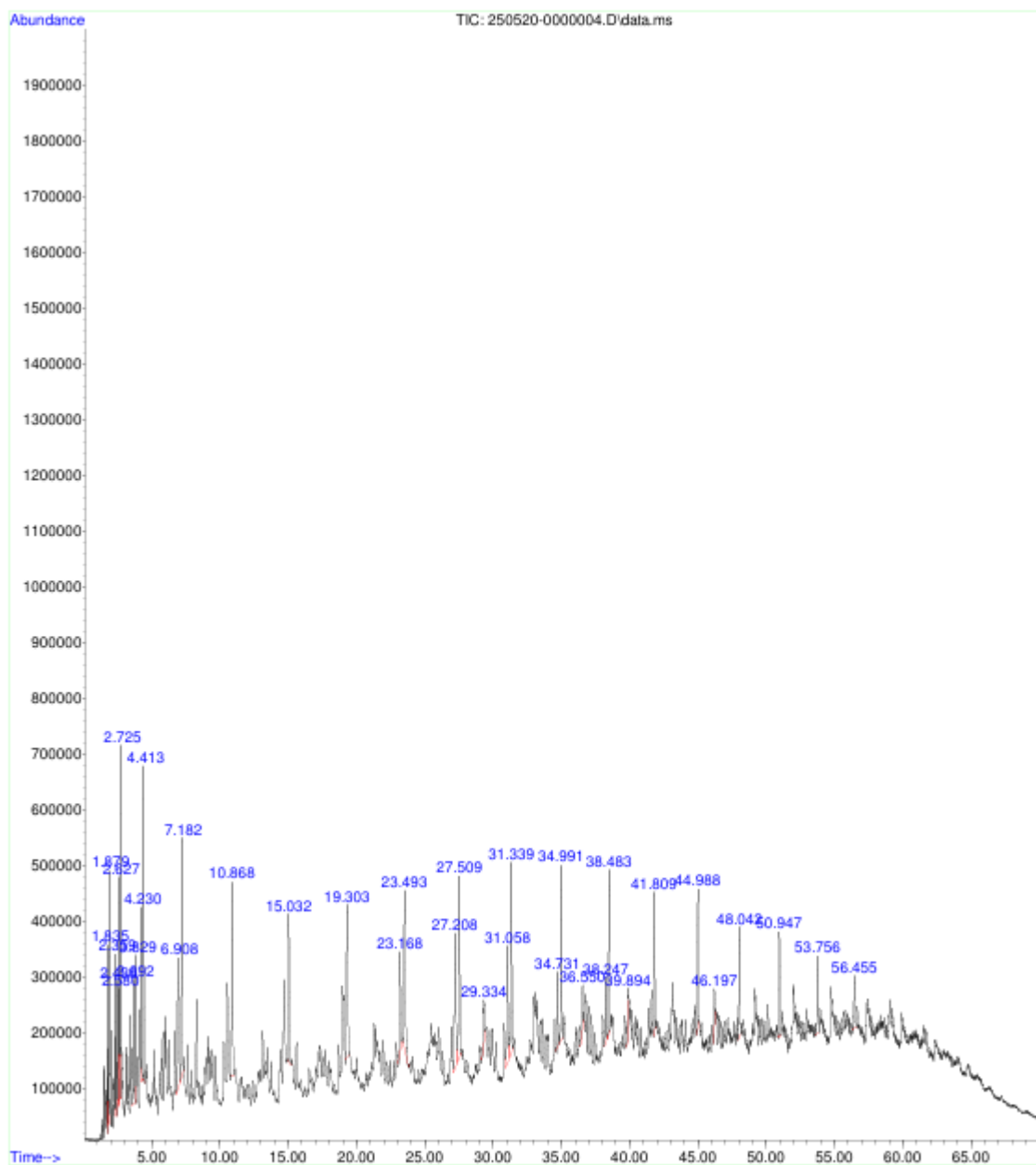
Se muestran los pesos recolectados de manera experimental para la calibración, empleando agua destilada y la muestra, combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min. Las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó un picnómetro de vidrio con capacidad de 24.360 mL y una balanza analítica Pioneer con incertidumbre ± 0.0001 .

Cuadro 21. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 minutos de la primera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.834	1.47	1-Hepteno
2	1.88	1.86	Heptano
3	2.357	1.34	2-Metilheptano
4	2.439	1.36	3-Metilheptano
5	2.58	0.89	2-Metil-1-hepteno
6	2.626	2.31	1-Octeno
7	2.726	2.7	Octano
8	3.69	1.85	2,4-Dimetilheptano
9	3.831	1.58	3-Metiloctano
10	4.231	2.28	Ciclopropano, 1-metil-2-pentil-
11	4.413	3.98	Nonano
12	6.911	3.27	1-Deceno
13	7.183	4.38	Decano
14	10.868	4.67	Undecano
15	15.03	4.04	Dodecano
16	19.301	4.71	Tridecano
17	23.167	3.11	1-Tetradeceno
18	23.495	5.32	Tetradecano
19	27.207	4.93	1-Pentadeceno
20	27.511	5.43	Pentadecano
21	29.335	1.35	Ciclotetradecano
22	31.059	4.03	1-Nonadeceno
23	31.341	5.01	Hexadecano
24	34.73	1.86	1-Nonadeceno
25	34.989	4.01	Tetradecano
26	36.549	1.3	Ácido oxálico, éster dodecil isobutil
27	38.246	1.59	Ácido 2-cloropropanoico, éster octadecil
28	38.483	3.86	Octadecano
29	39.893	0.58	2-Piperidinona, N-[4-bromo-n-butil]-
30	41.808	3.06	Nonadecano
31	44.987	2.78	Eicosano
32	46.197	0.79	2-Piperidinona, N-[4-bromo-n-butil]-
33	48.044	2.56	Heneicosano
34	50.946	2.36	Tridecano
35	53.757	1.82	Ácido sulfuroso, éster 2-propil tetradecil
36	56.454	1.55	Tetracosano

Se observan los compuestos presentes con sus respectivos tiempos de retención y área bajo la curva en el combustible líquido de pirólisis de la rampa 12 °C/30 minutos. Primera corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 36. Primer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min



Se muestra el primer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/ 30 minutos del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

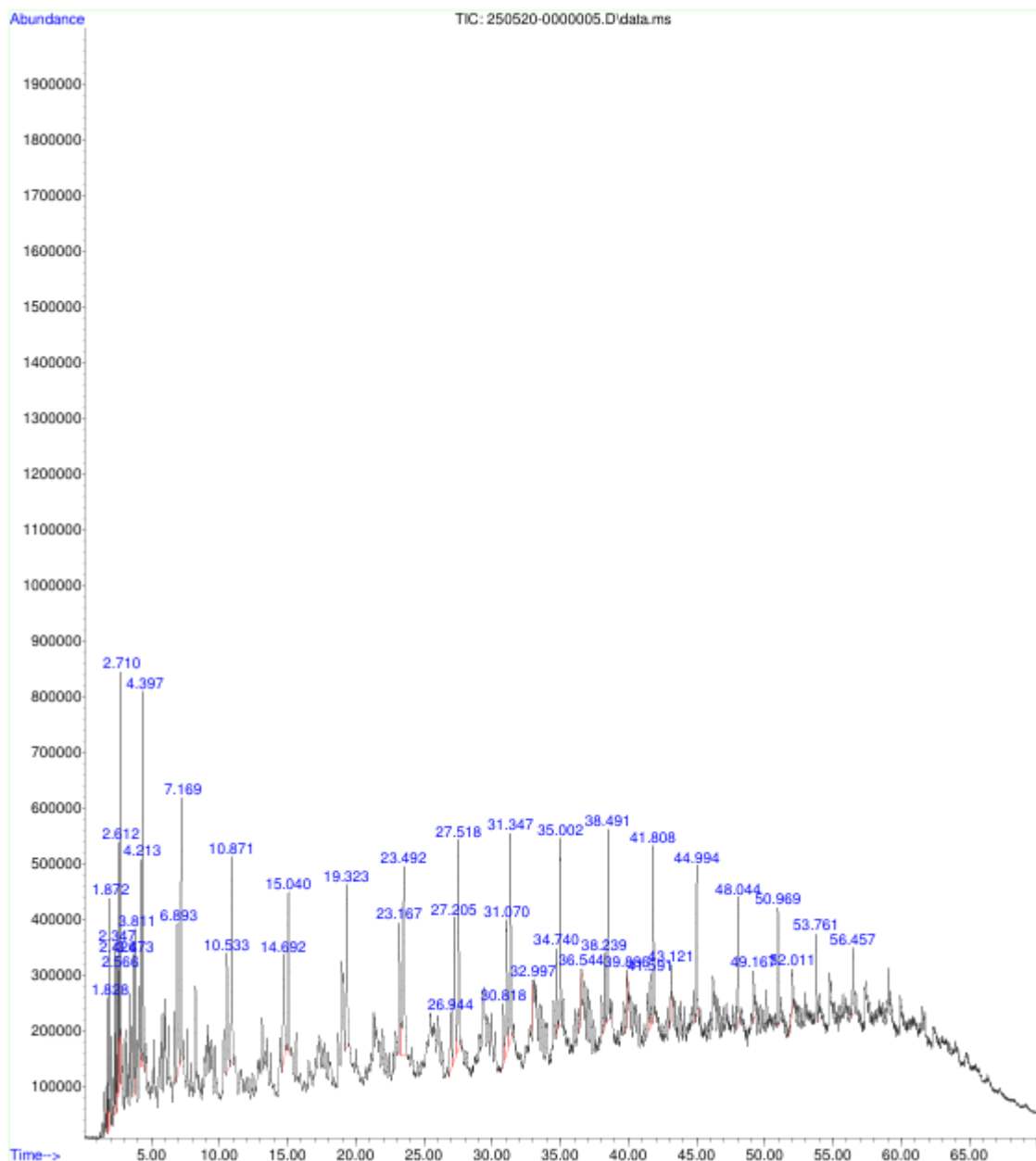
Cuadro 22. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 minutos de la segunda corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.83	0.85	1-Hepteno
2	1.871	1.54	Heptano
3	2.348	1.13	2-Metilheptano
4	2.426	1.23	(2,2-Dimetilciclobutil)metilamina
5	2.567	0.74	2-Metil-1-hepteno
6	2.612	1.97	1-Octeno
7	2.712	2.51	Octano
8	3.672	1.69	2,4-Dimetilheptano
9	3.813	1.58	3-Metiloctano
10	4.213	2.01	1-Noneno
11	4.395	3.77	Nonano
12	6.892	3	1-Deceno
13	7.17	3.94	Decano
14	10.531	2.77	3-Undeceno (E)
15	10.872	3.96	Undecano
16	14.693	2.64	3-Dodeceno (E)
17	15.039	3.39	Dodecano
18	19.324	4.08	Tridecano
19	23.167	3.71	4-Tetradeceno (E)
20	23.49	6.09	Tetradecano
21	26.943	1.62	9-Metil-1-deceno
22	27.207	4.48	1-Pentadeceno
23	27.52	4.77	Pentadecano
24	30.818	1.49	3-Hexadeceno (Z)
25	31.068	3.73	1-Heptadeceno
26	31.346	4.48	Hexadecano
27	32.997	-0.29	Ácido oxálico, éster ciclobutil pentadecil
28	34.739	1.51	1-Nonadeceno
29	35.003	3.63	Heptadecano
30	36.545	-0.08	2-Piperidinona, N-[4-bromo-n-butil]-
31	38.237	1.29	5-Octadeceno (E)
32	38.492	3.49	Octadecano

33	39.888	0.03	2-Piperidinona, N-[4-bromo-n-butil]-
34	41.589	1.17	1-Nonadeceno
35	41.808	2.86	Tetradecano
36	43.122	0.72	2-Piperidinona, N-[4-bromo-n-butil]-
37	44.996	2.67	Eicosano
38	48.044	2.31	Heneicosano
39	49.167	1.27	Etanol, 2-(octadeciloxi)-
40	50.969	2.17	Hexadecano
41	52.01	0.93	1-Clorononadecano
42	53.762	1.72	1-Cloroheptacosano
43	56.459	1.46	Tetracosano

Se observan los compuestos presentes con sus respectivos tiempos de retención y área bajo la curva en el combustible líquido de pirólisis de la rampa 12 °C/30 minutos. Segunda corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 37. Segundo espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 12 °C/30 min



Se muestra el segundo espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 minutos del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

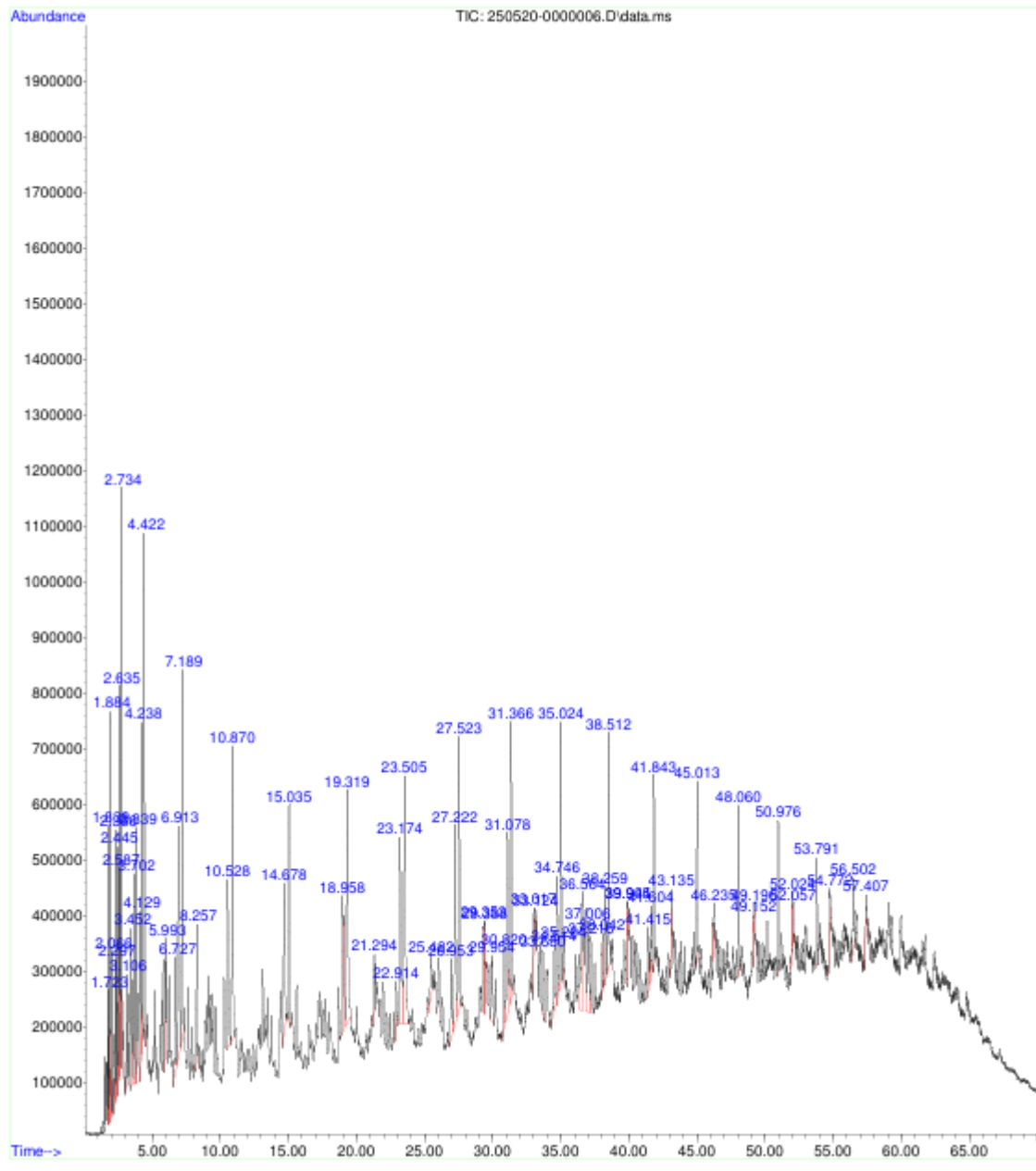
Cuadro 23. Compuestos presentes en el combustible líquido de la rampa 12 °C/30 minutos de la tercera corrida de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Número de pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.721	0.38	Pentano, 2,4-dimetil-
2	1.839	1.11	1-Hepteno
3	1.884	1.16	Heptano
4	2.066	0.6	Metilciclohexano
5	2.298	0.62	1-Hexeno, 4-etil-
6	2.366	1.05	2-Metilheptano
7	2.444	1.13	4-Etilheptano
8	2.589	0.71	2-Metil-1-hepteno
9	2.635	1.8	1-Octeno
10	2.735	1.97	Octano
11	3.108	0.61	Ciclohexeno, 3,5-dimetil-
12	3.454	0.95	2,6-Dimetil-1-hepteno
13	3.704	1.56	2-Metiloctano
14	3.84	1.61	3-Metiloctano
15	4.131	0.99	2,6-Dimetil-1-hepteno
16	4.24	1.81	1-Noneno
17	4.422	2.81	Nonano
18	5.992	0.67	3-Etil-4-metilhexano
19	6.729	1.11	2-Metil-1-noneno
20	6.915	2.46	1-Deceno
21	7.188	2.97	Decano
22	8.257	0.94	Ácido sulfuroso, éster cicloxilmetílico tetradecil
23	10.527	2.1	1-Undeceno
24	10.872	3.15	Undecano
25	14.68	1.97	1-Dodeceno
26	15.034	2.65	Dodecano
27	18.955	1.57	1-Trideceno
28	19.319	3.63	Tridecano
29	21.293	0.51	2,4,4,6,6,8,8-Heptametil-2-noneno
30	22.913	0.56	Ciclotetradecano
31	23.176	3.07	1-Tetradeceno
32	23.504	4.55	Tetradecano
33	25.483	0.71	1-Pentadeceno
34	26.952	1.24	Ciclopentadecano
35	27.22	3.46	1-Pentadeceno
36	27.525	3.57	Pentadecano
37	29.354	1.19	1-Hexadeceno

38	29.39	0.76	Ciclotetradecano
39	29.954	0.91	Dodecano
40	30.818	1.19	3-Hexadeceno
41	31.077	2.5	1-Nonadecano
42	31.364	3.35	Hexadecano
43	33.015	0.32	Tridecano
44	33.124	0.05	2-Hexil-1-decanol
45	33.679	0.83	3,8-Dimetildecano
46	34.512	0.97	3-Heptadeceno
47	34.748	1.68	1-Heptadeceno
48	35.026	2.92	Heptadecano
49	35.203	0.31	E-14-Hexadecenal
50	36.563	2.19	Tetradecano
51	37.004	1.43	Ciclopentadecano
52	37.218	1.02	2-Piperidona, N-[4-bromo-n-butilo]
53	38.041	0.38	3-Eicoseno (E)
54	38.26	1.07	1-Octadeceno
55	38.51	2.44	Octadecano
56	39.906	0.38	Ciclononano, 1,1,4,4,7,7-hexametil-
57	39.943	0.07	1-Cloro-octadecano
58	41.416	0.64	9-Nonadecano
59	41.603	0.79	1-Nonadecano
60	41.844	1.92	Pentadecano
61	43.136	0.18	2-Piperidona, N-[4-bromo-n-butilo]
62	45.014	1.71	Eicosano
63	46.233	0.41	Nonadecano
64	48.062	1.61	Heneicosano
65	49.154	0.01	1-Docoseno
66	49.195	0.08	1-Cloro-nonadecano
67	50.978	1.58	Nonadecano
68	52.024	0.54	Nonadecano
69	52.056	0.21	Nonadecano
70	53.793	1.21	Eicosano
71	54.771	0.22	2,6,11-Trimetildodecano
72	56.504	1.03	Heneicosano
73	57.41	0.13	Tetracosano

Se observan los compuestos presentes con sus respectivos tiempos de retención y área bajo la curva en el combustible líquido de pirólisis de la rampa 12 °C/30 minutos. Tercera corrida del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Figura 38. Tercer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa 12 °C/30 min



Se muestra el tercer espectrograma GC-Masa del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min del triplicado realizado con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle.

Cuadro 24. Tiempos experimentales para cálculo de viscosidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min a temperatura ambiente

Número de corrida	Calibración Tiempo (± 0.01 s)	Combustible líquido de pirólisis Tiempo (± 0.01 s)
1	1.96	2.02
2	1.95	2.00
3	2.02	2.01

Se muestran los tiempos recolectados de manera experimental para la calibración, empleando agua destilada y la muestra, del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min. Las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó el software Vegas Pro para el cálculo del tiempo en segundos.

Cuadro 25. Pesos experimentales para cálculo de densidad del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min a temperatura ambiente

Número de corrida	Calibración Peso (± 0.0001 g)	Combustible líquido de pirólisis Peso (± 0.0001 g)	Volumen estándar Picnómetro (mL)
1	24.3125	19.9376	24.36
2	24.3125	19.9715	24.36
3	24.3125	19.9130	24.36

Se muestran los pesos recolectados de manera experimental para la calibración, empleando agua destilada y la muestra, combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min. Las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó un picnómetro de vidrio con capacidad de 24.360 mL y una balanza analítica Pionner con incertidumbre ± 0.0001 .

Cuadro 26. Poder calorífico del combustible líquido obtenido en la pirólisis con dos diferentes rampas de temperatura

Número de corrida	Rampa 8 °C/30 min Poder calorífico (± 1 J/g)	Rampa 12 °C/30 min Poder calorífico (± 1 J/g)
1	44716	45199
2	45180	44816
3	44721	45055

Se muestran los poderes caloríficos recolectados de experimentalmente de ambos combustibles líquidos obtenidos en la pirólisis. Las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una bomba calorimétrica IKAC200.

D. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Tamaño de corridas experimentales

$$n = \frac{(1.96)^2(0.04)^2}{(0.05)^2} = 2.46 \cong 3 \text{ corridas}$$

Se muestra el cálculo del tamaño de muestra haciendo uso de la Ecuación 1 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la cantidad de corridas de pirólisis por rampa de temperatura a emplear.

Cálculo 2. Tamaño de muestras experimentales (Cantidad de vehículos)

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)^2}{(0.20)^2} = 24.01 \cong 24 \text{ vehículos}$$

Se muestra el cálculo del tamaño de muestra haciendo uso de la Ecuación 1 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar que se requieren 24 vehículos para obtener una muestra representativa del aceite de motor usado bajo las condiciones definidas, estableciendo así el número mínimo de cambios de aceite necesarios para conformar la muestra compuesta utilizada en el presente estudio.

Cálculo 3. Constante de calibración para viscosímetro capilar

$$C_c = \frac{0.979 \frac{mm^2}{s}}{4.50 s} = \frac{0.217 mm^2}{s^2}$$

Se muestra el cálculo de la calibración de viscosidad haciendo uso de la Ecuación 2 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la constante de calibración empleando agua como referencia a la temperatura específica que se iba medir el fluido de interés.

Cálculo 4. Viscosidad cinemática

$$v_m = (64.02 s) \left(0.217 \frac{mm^2}{s^2} \right) = 13.92 \frac{mm^2}{s}$$

Se muestra el cálculo de la viscosidad cinemática de la muestra haciendo uso de la Ecuación 3 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la viscosidad cinemática empleando agua como referencia a la temperatura específica que se iba medir el fluido de interés, multiplicado por el tiempo que tomó el fluido en recorrer la

misma distancia que la medida en la calibración. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones y muestras empleadas.

Cálculo 5. Densidad

$$\rho = \frac{21.1148 \text{ g}}{24.36 \text{ mL}} = 0.867 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Se muestra el cálculo de la densidad de la muestra haciendo uso de la Ecuación 4 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la viscosidad, se empleó agua como referencia a la temperatura específica que se iba medir el fluido de interés, empleando un picnómetro de vidrio calibrado con un volumen estándar de 24.36 mL. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones y muestras empleadas.

Cálculo 6. Viscosidad dinámica o absoluta

$$\mu = (867) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(13.92 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right) \left(\frac{1\text{m}}{1000\text{mm}} \right)^2 = 0.01206 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Se muestra el cálculo de la viscosidad dinámica de la muestra haciendo uso de la Ecuación 5 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la viscosidad, empleando la viscosidad cinemática y la respectiva densidad del mismo fluido a una misma temperatura. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones y muestras empleadas.

Cálculo 7. Fracción másica (% m/m)

$$\% \frac{\text{m}}{\text{m}} = \frac{0.1285 \text{ g}}{4.7384 \text{ g}} * 100$$

Se muestra el cálculo de la fracción másica de la muestra haciendo uso de la Ecuación 6 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la cantidad de sólidos en el aceite de motor. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones realizadas.

Cálculo 8. Masa de gases no condensables por medio del balance de masa

$$m_{gas} = 40.7654\text{g} - (30.4110\text{g} + 0.082\text{g} + 1.9534\text{g}) = 8.319\text{g}$$

Se muestra el cálculo del balance de masa del proceso haciendo uso de la

Ecuación 7 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la masa de gas no condensable de la primera corrida de la rampa 8 °C/30 min. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones realizadas.

Cálculo 9. Rendimiento de los productos (% m/m)

$$\% \frac{m}{m} = \frac{29.5714g}{40.7654g} * 100 = 72.5 \% m/m$$

Se muestra el cálculo del rendimiento másico del proceso haciendo uso de la Ecuación 8 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar el rendimiento másico del combustible líquido de la primera corrida de la rampa 8 °C/30 min. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones realizadas.

Cálculo 10. Flujo másico de agua de enfriamiento para condensador

$$\dot{m}_{H_2O} = \left(5.32 * 10^{-6} \frac{m^3}{s} \right) * \left(997.8 \frac{kg}{m^3} \right) = 0.0053 \frac{kg H_2O}{s}$$

Se muestra el cálculo del flujo másico haciendo uso de la Ecuación 9 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar el flujo de agua en masa utilizado para el enfriamiento en el condensador. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones realizadas.

Cálculo 11. Masa de agua de enfriamiento para condensador

$$m_{H_2O} = 0.0053 \frac{kg H_2O}{s} \left(\frac{3600 s}{1 h} \right) * (5h) = 95.5 kg$$

Se muestra el cálculo de la masa de agua empleada haciendo uso de la Ecuación 10 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la masa de agua requerida para el enfriamiento en el condensador. Se realizó el mismo cálculo para todas las repeticiones realizadas.

Cálculo 12. Energía en forma de calor proporcionada por la mufla

$$Q = \left(3095 \frac{J}{s} \right) \left(\frac{3600 s}{1 h} \right) \left(\frac{1 kJ}{1000 J} \right) * (5h) = 38997 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía proporcionada por la Mufla haciendo uso de la Ecuación 11 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía suministrada al proceso por la mufla. Se realizó el mismo cálculo para todas las

repeticiones realizadas.

Cálculo 13. Energía interna de materia prima

$$Q_{alim} = (40.0g) * \left(38319 \frac{J}{g}\right) = 1532.76 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía interna de la materia prima haciendo uso de la Ecuación 12 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía del aceite de motor usado empleado.

Cálculo 14. Energía en forma de calor sensible de la materia prima

$$Q_{sensible} = (40.0g) \left(\frac{1 kJ}{1000 J}\right) * \left(2.13 \frac{kJ}{kg ^\circ C}\right) * (460 - 25)^\circ C = 36.2 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía de calor sensible requerido para el proceso haciendo uso de la Ecuación 13 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía empleada para el calentamiento del aceite de motor usado empleado en la pirólisis.

Cálculo 15. Energía en forma de calor latente de la materia prima

$$Q_{latente} = (40.0g) \left(\left(0.3610 \frac{kJ}{g}\right) (0.372) + \dots + \left(0.2821 \frac{kJ}{g}\right) (0.059) \right) = 13.6 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía en forma calor latente requerido para el proceso haciendo uso de la Ecuación 14 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía empleada para la vaporización de los compuestos presentes en el aceite de motor usado empleado en la pirólisis.

Cálculo 16. Energía para rotura de enlaces

$$Q_{rotura} = \left(348.0 \frac{kJ}{mol}\right) (2.47 mol) + \left(413.0 \frac{kJ}{mol}\right) (5.74 mol) \\ + \left(358.0 \frac{kJ}{mol}\right) (0.001 mol) + \left(518.0 \frac{kJ}{mol}\right) (0.215 mol) = 3345.7 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía requerida para la rotura de enlaces de los compuestos identificados en el proceso haciendo uso de la Ecuación 15 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía para el rompimiento de enlaces de los compuestos presentes en el aceite de motor usado empleado en la pirólisis.

Cálculo 17. Energía para formación de enlaces

$$Q_{formación} = \left(348.0 \frac{kJ}{mol}\right)(1.715 mol) + \left(413.0 \frac{kJ}{mol}\right)(4.00 mol) \\ + \left(358.0 \frac{kJ}{mol}\right)(0.007 mol) + \left(614.0 \frac{kJ}{mol}\right)(0.056 mol) = 2265.1 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía requerida para la formación de enlaces de los compuestos identificados en el proceso haciendo uso de la Ecuación 16 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía para la formación de enlaces de los compuestos presentes en los combustibles obtenidos en la pirólisis.

Cálculo 18. Energía interna del gas no condensable

$$Q_{gas} = (8.15 g) * \left(50.2 \frac{kJ}{g}\right) = 409.20 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía interna de los gases no condensables haciendo uso de la Ecuación 17 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía proporcionada por los gases no condensables presentes en el proceso de pirólisis. Se emplearon los valores teóricos de antecedentes para el cálculo.

Cálculo 19. Energía interna del combustible líquido

$$Q_{liq} = (29.052 g) * \left(44.87 \frac{kJ}{g}\right) = 1303.63 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía interna del combustible líquido obtenido haciendo uso de la Ecuación 18 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía proporcionada por el combustible líquido obtenido en el proceso de pirólisis. Se empleó el poder calorífico obtenido experimentalmente para el cálculo.

Cálculo 20. Energía interna del producto sólido

$$Q_{sol} = (1.628 g) * \left(22.543 \frac{kJ}{g}\right) = 36.70 kJ$$

Se muestra el cálculo de la energía interna del producto sólido obtenido haciendo uso de la Ecuación 19 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la energía proporcionada por el producto sólido obtenido en el proceso de pirólisis. Se empleó el poder calorífico obtenido experimentalmente para el cálculo.

Cálculo 21. Porcentaje de abundancia de compuestos identificados por Cromatografía GC-MS

$$\% \text{ Abundancia} = \frac{79.58}{300} = 26.5 \%$$

Se muestra el cálculo del porcentaje de abundancia de los compuestos identificados haciendo uso de la Ecuación 20 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la abundancia de Eicosano como ejemplo, realizándose así para cada compuesto del aceite de motor y los productos obtenidos.

E. Análisis de error

Cálculo 22. Media muestral

$$\bar{X} = \frac{13.9217 + 13.7108 + 13.9413 + 13.6782 + 14.1414}{5} = 13.8787 \frac{mm^2}{s}$$

Se muestra el cálculo de la media muestral por medición haciendo uso de la Ecuación 21 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la media de la viscosidad cinemática del aceite de motor usado como ejemplo, se realizó para cada una de las mediciones realizadas a lo largo de la experimentación.

Cálculo 23. Desviación estándar muestral

$$\sigma = \sqrt{\frac{(13.9 - 13.9)^2 + (13.7 - 13.9)^2 + (13.9 - 13.9)^2 + (14.1 - 13.9)^2 + (13.7 - 13.9)^2}{4}} \\ = 0.1892$$

Se muestra el cálculo de la desviación estándar muestral por medición haciendo uso de la Ecuación 22 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la desviación estándar de la viscosidad cinemática del aceite de motor usado como ejemplo, se realizó para cada una de las mediciones realizadas a lo largo de la experimentación.

Cálculo 24. Coeficiente de variación

$$C.V. = \frac{0.1892}{13.8787} * 100 = 1.36 \%$$

Se muestra el cálculo del coeficiente de variación por medición haciendo uso de la Ecuación 23 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar el coeficiente de variación de la viscosidad cinemática del aceite de motor usado como ejemplo, se realizó para cada una de las mediciones realizadas a lo largo de la experimentación.

Cálculo 25. Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones

$$S_y = 13.92 * \sqrt{\left(\frac{0.01}{64.02}\right)^2 + \left(\frac{0.000495}{0.2175}\right)^2} = \pm 0.03$$

Se muestra el cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones por medición haciendo uso de la Ecuación 24 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la incertidumbre para multiplicaciones y divisiones de la viscosidad cinemática del aceite de motor usado como ejemplo, se realizó para cada una de las mediciones realizadas a lo largo de la experimentación.

Cálculo 26. Cálculo de incertidumbres para sumas y restas

$$S_y = \sqrt{(0.03)^2 + (0.03)^2 + (0.03)^2 + (0.03)^2 + (0.03)^2} = \pm 0.07$$

Se muestra el cálculo de incertidumbres para sumas y restas por medición haciendo uso de la Ecuación 25 en la sección de Ecuaciones. El cálculo fue realizado para determinar la incertidumbre para sumas y restas de la viscosidad cinemática del aceite de motor usado como ejemplo, se realizó para cada una de las mediciones realizadas a lo largo de la experimentación.

Cálculo 27. Cálculo de varianza combinada

$$s_p^2 = \frac{(3-1)(266.46)^2 + (3-1)(193.46)^2}{3+3-2} = 54212.8$$

Se muestra el cálculo de la varianza combinada para los conjuntos de datos obtenidos en los ensayos de poder calorífico utilizando diferentes rampas de calentamiento, haciendo uso de la Ecuación 26 presentada en la sección de Ecuaciones. Este cálculo fue realizado con el objetivo de estimar la variabilidad conjunta de ambas series de mediciones y permitir la comparación estadística entre los resultados obtenidos con las rampas de 8 °C/30 min y 12 °C/30 min. El procedimiento se aplicó considerando las desviaciones estándar y el número de corridas experimentales de cada conjunto de datos.

Cálculo 28. Prueba de medias para poder calorífico de combustible de ambas rampas de temperatura

$$t = \frac{44872.33 - 45023.33}{(232.8)\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{3}}} = -0.79$$

Para $gl = 4$ y $\alpha = 0.05$ (bilateral), $t_{critico} \pm 2.776$

$|t| = 0.79 < 2.776$, *no se rechaza la hipótesis nula.*

Se muestra el cálculo de la prueba t de comparación de medias para evaluar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de poder calorífico obtenidos con las dos rampas de calentamiento evaluadas, utilizando la Ecuación 27 presentada en la sección de Ecuaciones. Este análisis fue realizado a partir de las medias y la varianza combinada de ambos conjuntos de datos, con el propósito de determinar si las diferencias observadas entre los resultados experimentales pueden atribuirse a variaciones experimentales o si representan una diferencia significativa entre las condiciones de análisis.

F. Datos calculados

Cuadro 27. Resumen de los compuestos presentes en el aceite de motor por medio de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

Compuesto	Suma área bajo la curva (%)	Composición porcentual (%)	Fórmula química	Número de carbonos por cadena	Peso molecular (g/mol)
6-metil-1-heptanol	5.58	1.9	C ₈ H ₁₈ O	8	130
p-xileno	12.81	4.3	C ₈ H ₁₀	8	106
1-etil-2-metilbenceno	17.78	5.9	C ₉ H ₁₂	9	120
Endo- tríciclo[5.2.1.0(2.6)]dec ano	17.83	5.9	C ₁₀ H ₁₆	10	136
2,4,6-trimetiloctano	65.82	21.9	C ₁₁ H ₂₄	11	156
1-(Hexiloxi)-3- metilhexano	15.1	5.0	C ₁₃ H ₂₈ O	13	200
Hexadecano	9.6	3.2	C ₁₆ H ₃₄	16	226
Diéster alilo-tridecilo de ácido oxálico	8.62	2.9	C ₁₈ H ₃₂ O ₄	18	344
Eicosano	79.58	26.5	C ₂₀ H ₄₂	20	282
Heptacosano	42.56	14.2	C ₂₇ H ₅₆	27	380
Hexatriacontano	24.72	8.2	C ₃₆ H ₇₄	36	506

En el cuadro anterior se reporta el resumen de la suma del área bajo la curva promedio y la composición porcentual ponderada. Se muestra la fórmula química de cada compuesto, el número de carbonos presente por compuesto y su peso molecular. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos y el aceite se analizó en triplicado.

Cuadro 28. Viscosidad del aceite de motor usado a pirolizar

Número de corrida	Aceite de motor a 23 °C		Aceite de motor a 40 °C	
	Cinemática (±0.03 mm ² /s)	Dinámica (±7.0 x10 ⁻⁵ kg/m s)	Cinemática (±0.002 mm ² /s)	Dinámica (±2.7x10 ⁻⁵ kg/m s)
1	13.92	0.01206	6.148	0.005230
2	13.71	0.01188	6.010	0.005113
3	13.94	0.01207	5.994	0.005099
4	13.68	0.01185	5.875	0.004998
5	14.14	0.01225	5.991	0.005096

En el cuadro anterior se reporta la medición de densidad de la materia prima a utilizar, aceite de motor usado, las mediciones se realizaron a 23 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una pipeta volumétrica de 5.0 mL, una balanza analítica OHAUS con incertidumbre ± 0.0001 y el software Vegas Pro para el cálculo del tiempo en segundos. La viscosidad fue medida con relación al agua en cada una de sus respectivas temperaturas.

Cuadro 29. Densidad del aceite de motor usado a pirolizar

Número de corrida	Densidad (± 0.0045 g/mL)	Densidad (± 4.5 kg/m ³)
1	0.8667	866.7
2	0.8636	863.6
3	0.8660	866.0

En el cuadro anterior se reporta la medición de densidad de la materia prima a utilizar, aceite de motor usado, las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó un picnómetro de 24.360 mL y una balanza analítica OHAUS con incertidumbre ± 0.0001 .

Cuadro 30. Cantidad de residuos sólidos en el aceite de motor usado a pirolizar

Número de corrida	Cantidad de sólidos (± 0.002 % m/m)
1	2.71
2	2.15
3	2.36
4	2.43

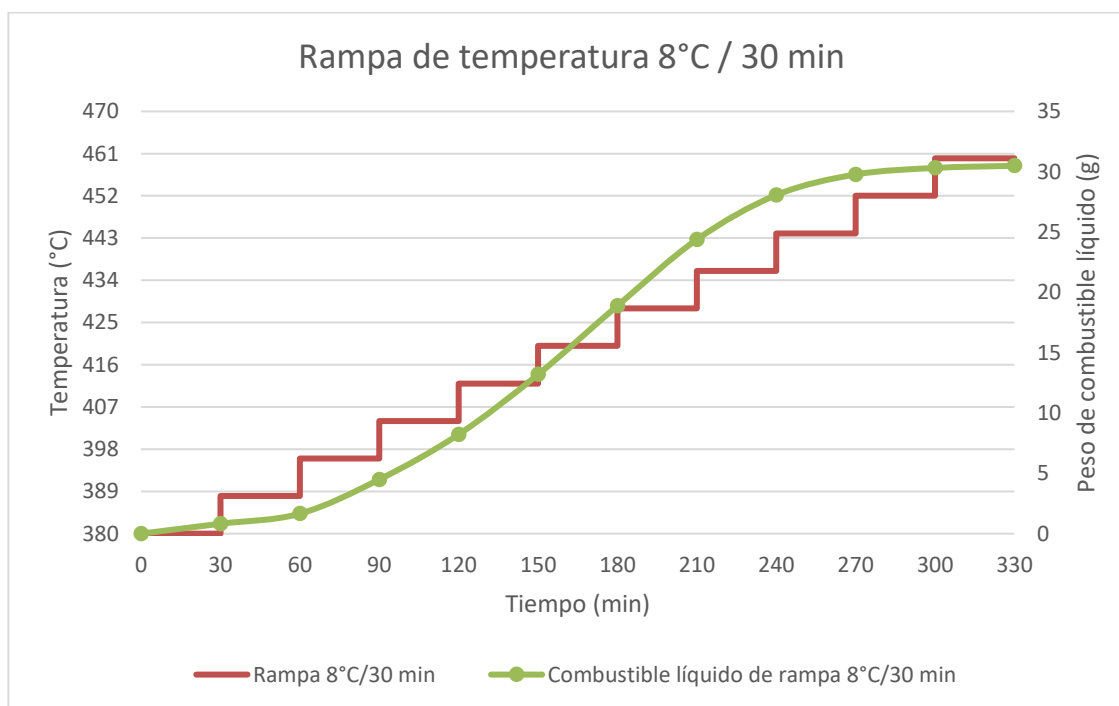
En el cuadro anterior se reporta la medición de cantidad de sedimentos de la materia prima a utilizar, aceite de motor usado, las mediciones se realizaron a 25 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una centrifugadora Benchmark LC-8 Series, con un tiempo de centrifugación de 15 minutos y una velocidad 4000 revoluciones por minuto.

Cuadro 31. Rendimiento de cada corrida de pirólisis empleando la rampa de temperatura 8 °C/30 min

Producto	Corrida 1 (± 0.25 % m/m)	Corrida 2 (± 0.25 % m/m)	Corrida 3 (± 0.25 % m/m)
Combustible líquido	72.5	72.2	73.2
Residuos sólidos	4.8	3.3	4.3
Gases no condensables	20.4	20.9	19.8
Contenido ceroso y sólidos suspendidos	2.3	3.5	2.8

En el cuadro anterior se reporta los rendimientos de cada corrida de pirólisis realizada con la rampa de temperatura de 8 °C/30 min, las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó un reactor de pirólisis, una mufla ThermoScientific y una balanza analítica OHAUS con incertidumbre ± 0.0001 . La cantidad de aceite de motor que ingresó al reactor fue de aproximadamente 40.0 g.

Figura 39. Rampa de temperatura con aumentos de 8 °C y tiempo de residencia de 30 minutos



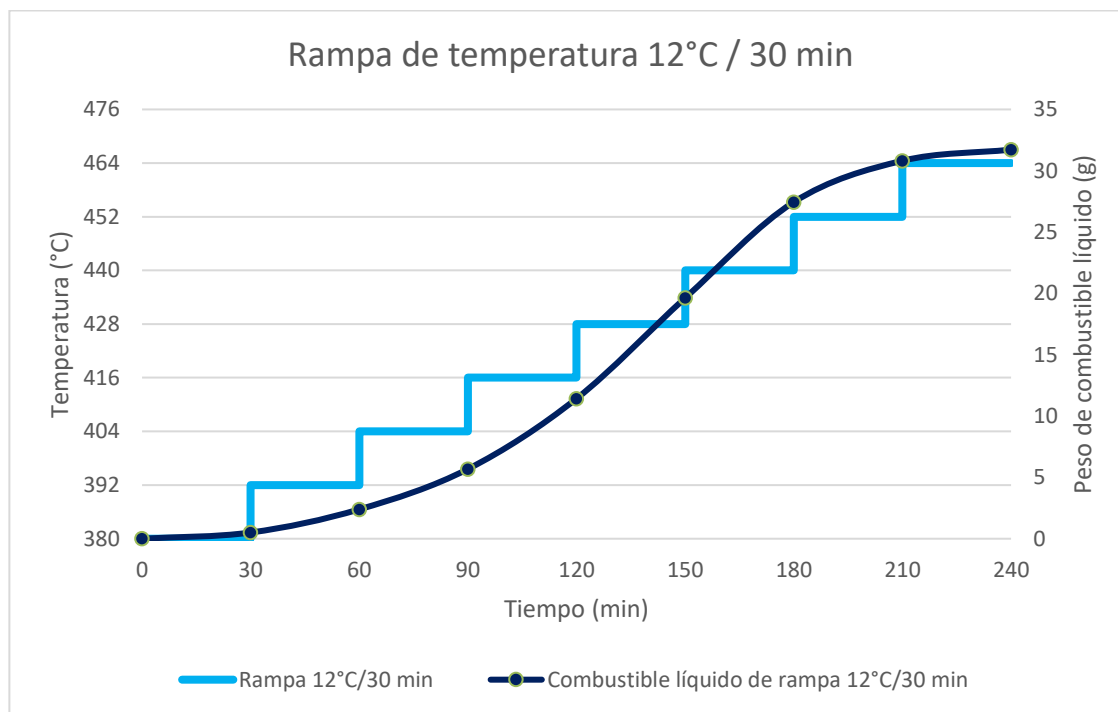
En la figura anterior se muestra la relación entre los aumentos progresivos de temperatura (eje y primario) con respecto al tiempo donde se realizaron aumentos de 8 °C partiendo desde los 380 °C y realizando un tiempo de residencia de 30 minutos. A su vez, se relaciona el peso del combustible líquido obtenido de manera acumulada (eje y secundario). Se graficaron los valores de peso promedio que fueron recolectados en las diferentes corridas.

Cuadro 32. Rendimiento de cada corrida de pirólisis empleando la rampa de temperatura 12 °C/30 min

Producto	Corrida 1 (± 0.25 % m/m)	Corrida 2 (± 0.25 % m/m)	Corrida 3 (± 0.25 % m/m)
Combustible líquido	73.7	74.9	75.8
Residuos sólidos	8.1	6.5	2.8
Gases no condensables	13.1	15.4	18.5
Contenido ceroso y sólidos suspendidos	5.1	3.2	3.0

En el cuadro anterior se reporta los rendimientos de cada corrida de pirólisis realizada con la rampa de temperatura de 12 °C/30 min, las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó un reactor de pirólisis, una mufla ThermoScientific y una balanza analítica OHAUS con incertidumbre ± 0.0001 . La cantidad de aceite de motor que ingresó al reactor fue de aproximadamente 40.0 g.

Figura 40. Rampa de temperatura con aumentos de 12 °C y tiempo de residencia de 30 minutos



En la figura anterior se muestra la relación entre los aumentos progresivos de temperatura (eje y primario) con respecto al tiempo donde se realizaron aumentos de 12 °C partiendo desde los 380 °C y realizando un tiempo de residencia de 30 minutos. A su vez, se relaciona el peso del combustible líquido obtenido de manera acumulada (eje y secundario). Se graficaron los valores de peso promedio que fueron recolectados en las diferentes corridas.

Cuadro 33. Resumen de los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 8 °C/30 min por el método de GC-MS

Compuesto	Suma área bajo la curva (%)	Composición porcentual (%)	Número de carbonos por cadena	Peso molecular (g/mol)
Heptano	1.41	0.47 %	7	100
2-Metilheptano	1.7	0.57 %	8	114
3-Metilheptano	1.87	0.62 %	8	114
2-Metil-1-hepteno	0.49	0.16 %	8	112
1-Octeno	4.97	1.66 %	8	112
Octano	6.25	2.08 %	8	114
2,6-Dimetil-1-hepteno	2.16	0.72 %	9	126
2,4-Dimetilheptano	5.39	1.80 %	9	128

3-Metiloctano	5.66	1.89 %	9	128
2,6-Dimetilheptano	1.09	0.36 %	9	128
1-Noneno	6.59	2.20 %	9	126
Nonano	10.91	3.64 %	9	128
4-Metilnonano	0.67	0.22 %	10	142
2-Metil-1-noneno	1.15	0.38 %	10	140
1-Deceno	8.68	2.89 %	10	140
Decano	12.3	4.10 %	10	142
1-Undeceno	5.29	1.76 %	11	154
Undecano	13.19	4.40 %	11	156
1-Dodeceno	5.48	1.83 %	12	168
Dodecano	12.25	4.08 %	12	170
7-Metil-3-undeceno	0.09	0.03 %	12	168
5-Metil-1-undeceno	3	1.00 %	12	168
2-Metilundecano	0.58	0.19 %	12	170
1-Trideceno	1.41	0.47 %	13	182
Tridecano	14.32	4.77 %	13	184
Ciclotetradecano	3.8	1.27 %	14	196
1-Tetradeceno	9.59	3.20 %	14	196
Tetradecano	20.67	6.89 %	14	198
Etilciclododecano	1.45	0.48 %	14	198
1-Pentadeceno	14.32	4.77 %	15	210
Pentadecano	14.61	4.87 %	15	212
Ciclopentadecano	2.21	0.74 %	15	210
2,6,11-Trimetildodecano	2.99	1.00 %	15	212
1,1,4,4,7,7-Hexametilciclononano	1.92	0.64 %	15	210
Ciclohexadecano	0.94	0.31 %	16	224
Hexadecano	15.62	5.21 %	16	226
Hexadecenal	0.74	0.25 %	16	238
Hexadeceno	3.51	1.17 %	16	224
1-Heptadeceno	3.28	1.09 %	17	238
8-Heptadeceno	5.15	1.72 %	17	238
Heptadecano	7.74	2.58 %	17	240
Ácido sulfuroso, éster cicloximetílico undecílico	0.94	0.31 %	18	332
1-(Dodecilo)benzoceno	0.33	0.11 %	18	262
1-Octadeceno	7.5	2.50 %	18	252
Octadecano	10.53	3.51 %	18	254
Ácido sulfuroso, éster cicloximetílico dodecílico	0.51	0.17 %	19	346
9-Nonadeceno	3.34	1.11 %	19	266
Nonadecano	8.38	2.79 %	19	268
Eicosano	17.21	5.74 %	20	282
3-Eicoseno	0.73	0.24 %	20	280

Heneicosano	8.78	2.93 %	21	296
Ácido oxálico, éster ciclobutil hexadecílico	0.05	0.02 %	22	368
Dodecano, 1,1'-oxibis-	2.65	0.88 %	24	354
Heptacosano 1-cloro	3.85	1.28 %	27	415

En el cuadro anterior se reporta el resumen de la suma del área bajo la curva promedio y la composición porcentual incluyendo el análisis en triplicado. Se muestra el número de carbonos presente por compuesto. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos.

Cuadro 34. Resumen de los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 12 °C/30 min por el método de GC-MS

Compuesto	Suma área bajo la curva (%)	Composición porcentual (%)	Número de carbonos por cadena	Peso molecular (g/mol)
1-Hepteno	3.43	1.14 %	7	98
Heptano	4.56	1.52 %	7	100
Metilciclohexano	0.6	0.20 %	7	98
2,2-Dimetilpentano	1.61	0.54 %	7	100
1-Hexeno, 4-etil-	0.62	0.21 %	8	112
2-Metilheptano	2.47	0.82 %	8	114
3-Metilheptano	2.41	0.80 %	8	114
2-Metil-1-hepteno	2.34	0.78 %	8	112
Ciclohexeno, 3,5-dimetil-	0.61	0.20 %	8	110
1-Octeno	6.08	2.02 %	8	112
Octano	7.18	2.39 %	8	114
2,6-Dimetil-1-hepteno	1.94	0.65 %	9	126
2,4-Dimetilheptano	3.54	1.18 %	9	128
4-Etilheptano	1.13	0.38 %	9	128
3-Metiloctano	6.33	2.10 %	9	128
1-Noneno	6.1	2.03 %	9	126
Nonano	10.56	3.51 %	9	128
2-Piperidona, N-[4-bromo-n- butilo]	3.7	1.23 %	9	264
4-Metilnonano	0.67	0.22 %	10	142
2-Metil-1-noneno	1.11	0.37 %	10	140
1-Deceno	8.73	2.90 %	10	140
Decano	11.29	3.75 %	10	142
1-Undeceno	4.87	1.62 %	11	154
Undecano	11.78	3.92 %	11	156
9-Metil-1-deceno	1.62	0.54 %	11	154

1-Dodeceno	4.61	1.53 %	12	168
Dodecano	11.82	3.93 %	12	170
1-Trideceno	1.57	0.52 %	13	182
Tridecano	15.1	5.02 %	13	184
Ciclotetradecano	2.67	0.89 %	14	196
1-Tetradeceno	9.89	3.29 %	14	196
Tetradecano	22.16	7.37 %	14	198
1-Pentadeceno	13.58	4.52 %	15	210
Pentadecano	16.07	5.34 %	15	212
Ciclopentadecano	2.67	0.89 %	15	210
1,1,4,4,7,7-Hexametilcyclononano	1.27	0.42 %	15	210
2,4,4,6,6,8,8-Heptametil-2-noneno	0.51	0.17 %	16	238
Ciclohexadecano	0.76	0.25 %	16	224
Hexadecano	15.01	4.99 %	16	226
Hexadeceno	3.87	1.29 %	16	224
1-Heptadeceno	6.38	2.12 %	17	238
Heptadecano	6.55	2.18 %	17	240
1-Octadeceno	3.95	1.31 %	18	252
Octadecano	9.79	3.26 %	18	254
Ácido oxálico, éster dodecil isobutilo	1.3	0.43 %	18	332
9-Nonadeceno	12.5	4.16 %	19	266
Nonadecano	9.89	3.29 %	19	268
Eicosano	10.09	3.35 %	20	282
3-Eicoseno	0.38	0.13 %	20	280
Heneicosano	7.51	2.50 %	21	296
Ácido sulfuroso, éster cicloxilmetílico tetradecil	0.94	0.31 %	21	360
Tetracosano	3.14	1.04 %	24	338
Heptacosano 1-cloro	1.87	0.62 %	27	415

En el cuadro anterior se reporta el resumen de la suma del área bajo la curva promedio y la composición porcentual incluyendo el análisis en triplicado. Se muestra el número de carbonos presente por compuesto. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos.

Cuadro 35. Composición porcentual del área bajo la curva del GC-MS con respecto al número de carbonos por cadena

Número de carbonos por cadena	Rampa 8 °C / 30 min Composición porcentual (%)	Rampa 12 °C / 30 min Composición porcentual (%)
-------------------------------	---	--

7	0.5 %	3.4 %
8	5.1 %	7.2 %
9	10.6 %	11.1 %
10	7.6 %	7.2 %
11	6.2 %	6.1 %
12	7.1 %	5.5 %
13	5.2 %	5.5 %
14	11.8 %	11.5 %
15	12.0 %	11.2 %
16	6.9 %	6.7 %
17	5.4 %	4.3 %
18	6.4 %	5.0 %
19	4.1 %	7.4 %
20	6.0 %	3.5 %
21	2.9 %	2.8 %
>22	2.2 %	1.7 %

En el cuadro anterior se reporta la suma porcentual de los compuestos con su respectivo número de carbonos por compuesto del análisis del combustible líquido de ambas rampas de temperatura. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos.

Cuadro 36. Composición porcentual del área bajo la curva del GC-MS con respecto al peso molecular de los compuestos de ambas rampas

Rango de peso molecular (g/mol)	Rampa 8 °C / 30 min Composición porcentual (%)	Rampa 12 °C / 30 min Composición porcentual (%)
100–120	5.6 %	10.6 %
121–140	13.9 %	11.3 %
141–160	10.5 %	12.6 %
161–180	7.1 %	2.1 %
181–200	17.1 %	13.6 %
201–220	12.0 %	18.1 %
221–240	12.3 %	9.2 %
241–260	6.0 %	3.5 %
261–280	4.3 %	11.1 %
281–300	8.7 %	3.5 %
>300	2.7 %	4.5 %

En el cuadro anterior se reporta la suma porcentual de los compuestos con su respectivo rango de peso molecular por compuesto del análisis del combustible líquido de

ambas rampas de temperatura. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos.

Cuadro 37. Viscosidad del combustible líquido obtenido de la pirólisis aceite de motor

Número de corrida	Rampa 8 °C/30 min		Rampa 12 °C/30 min	
	Cinemática ($\pm 0.007 \text{ mm}^2/\text{s}$)	Dinámica ($\pm 6.7 \times 10^{-6} \text{ kg/m s}$)	Cinemática ($\pm 0.007 \text{ mm}^2/\text{s}$)	Dinámica ($\pm 6.8 \times 10^{-6} \text{ kg/m s}$)
1	0.9212	0.000755	0.9351	0.000767
2	0.9258	0.000759	0.9258	0.000759
3	0.9212	0.000755	0.9304	0.000763

En el cuadro anterior se reporta la medición de viscosidad del combustible líquido de pirólisis de aceite de motor usado, las mediciones se realizaron a 27 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó una pipeta volumétrica de 5.0 mL, una balanza analítica OHAUS con incertidumbre ± 0.0001 y el software Vegas Pro para el cálculo del tiempo en segundos. La viscosidad fue medida con relación al agua en cada una de su respectiva temperatura.

Cuadro 38. Densidad combustible líquido obtenido de la pirólisis aceite de motor usado

Número de corrida	Rampa 8 °C/30 min Densidad ($\pm 4.36 \text{ kg/m}^3$)	Rampa 12 °C/30 min Densidad ($\pm 4.35 \text{ kg/m}^3$)
1	820.6	818.5
2	820.9	819.8
3	818.9	817.4

En el cuadro anterior se reporta la medición de densidad del combustible líquido de pirólisis de aceite de motor usado, aceite de motor usado, las mediciones se realizaron a 24 °C y a una presión atmosférica de 99.1 kPa. Se empleó un picnómetro de 24.360 mL y una balanza analítica OHAUS con incertidumbre ± 0.0001 .

Cuadro 39. Datos estadísticos de densidad y viscosidad para el combustible líquido de la rampa de 8 °C/30 minutos

Estadística	Densidad (g/mL)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Viscosidad dinámica (kg/m s)
Media	820.1 ± 7.56	0.9227 ± 0.011	0.000757 ± 1.17x10 ⁻⁵
Desviación estándar	1.068	0.002673	2.19x10 ⁻⁶
Coeficiente de variación	0.130 %	0.290 %	

Se reporta la estadística descriptiva de la medición de densidad y viscosidad del combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado con una rampa de calentamiento de 8 °C / 30 minutos. Se empleó el software Excel para el cálculo.

Cuadro 40. Datos estadísticos de densidad y viscosidad para el combustible líquido de la rampa de 12 °C/30 minutos

Estadística	Densidad (g/mL)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Viscosidad dinámica (kg/m s)
Media	818.6 ± 7.54	0.9304 ± 0.011	0.000763 ± 1.17x10 ⁻⁵
Desviación estándar	1.206	0.004629	3.80x10 ⁻⁶
Coeficiente de variación	0.147 %	0.498 %	

Se reporta la estadística descriptiva de la medición de densidad y viscosidad del combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado con una rampa de calentamiento de 12 °C / 30 minutos. Se empleó el software Excel para el cálculo.

Cuadro 41. Poder calorífico de los productos de pirólisis a distintas rampas de temperatura

Estadística	Poder calorífico Rampa 8 °C/30 min		Poder calorífico Rampa 12 °C/30 min	
	Combustible líquido (J/g)	Char (±1 J/g)	Combustible líquido (J/g)	Char (±1 J/g)
Media	44,872.3	22543	45,023.3	22961
Desviación estándar	266.5	-	193.5	-
Coeficiente de variación	0.59 %	-	0.43 %	-
Prueba de comparación de medias para poder calorífico				
Varianza combinada s_p	232.8			
$t_{experimental}$	0.79			
$t_{critico}$ ($gl = 4$ y $\alpha = 0.05$)	2.776			
Conclusión	No se rechaza la hipótesis nula.			

Se reporta la estadística descriptiva de los poderes caloríficos de los productos obtenidos de la pirólisis de aceite de motor usado. Se empleó el software Excel para el cálculo.

Cuadro 42. Balance energético interno del reactor de pirólisis

Distribución de energía en el reactor	Rampa 8/30 min Energía (kJ)	Rampa 12/30 min Energía (kJ)
Entrada del reactor		
Energía interna del aceite (40.0 g)	1532.8	1532.8
Potencia de Mufla (3095W)	55710.0	38997.0
Energía requerida para el proceso de pirólisis a escala de laboratorio		
Calor sensible del aceite de motor	13.6	13.6
Calor latente del aceite de motor	37.1	37.1
Energía rotura de enlaces	3345.7	3345.7
Energía formación de enlaces	-2265.1	-2801.8
Energía interna del combustible líquido	1303.6	1347.1
Energía interna del sólido (char)	36.7	53.0
Energía interna de gases no condensables	409.2	314.3
Energía total requerida	2716.0	2182.4
Pérdidas energéticas por diferencia	52830.1	36688.9

En el cuadro anterior se reporta el análisis energético interno y termodinámico del reactor de pirólisis para ambas rampas de temperatura planteadas. Se empleó el software Excel para el cálculo.

Cuadro 43. Cálculo de entalpía de combustión mediante los compuestos presentes en el aceite de motor usado

Compuesto	Composición porcentual (%)	ΔH_c° (kJ/g)	ΔH_c° ponderada (kJ/g)
6-metil-1-heptanol	1.9	51.5	0.80
p-xileno	4.3	41.7	2.66
1-etil-2-metilbenceno	5.9	50.8	3.01
Endo-triciclo[5.2.1.0(2.6)]decano	5.9	47.6	2.83
2,4,6-trimetiloctano	21.9	47.5	10.41
1-(Hexiloxi)-3-metilhexano	5.0	47.3	2.38
Hexadecano	3.2	47.5	1.52
Diéster alilo-tridecilo de ácido oxálico	2.9	47.5	1.37
Eicosano	26.5	47.8	12.67

Heptacosano	14.2	48.1	6.82
Hexatriacontano	8.2	48.5	4.00
Entalpía de combustión de compuestos de aceite de motor usado (kJ/g)			48.17

En el cuadro anterior se reporta la entalpía de combustión ponderando cada uno de los compuestos identificados. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos. Los valores de entalpía de combustión estándar fueron extraídos de (NIST 2025).

Cuadro 44. Cálculo de entalpía de combustión mediante los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 8 °C/30 min

Compuesto	Composición porcentual (%)	ΔH_c° (kJ/g)	ΔH_c° ponderada (kJ/g)
Heptano	0.47 %	47.91	0.23
2-Metilheptano	0.57 %	47.89	0.27
3-Metilheptano	0.62 %	47.89	0.30
2-Metil-1-hepteno	0.16 %	46.20	0.08
1-Octeno	1.66 %	46.20	0.77
Octano	2.08 %	47.89	1.00
2,6-Dimetil-1-hepteno	0.72 %	46.37	0.33
2,4-Dimetilheptano	1.80 %	47.87	0.86
3-Metiloctano	1.89 %	47.87	0.90
2,6-Dimetilheptano	0.36 %	47.87	0.17
1-Noneno	2.20 %	46.37	1.02
Nonano	3.64 %	47.87	1.74
4-Metilnonano	0.22 %	47.85	0.11
2-Metil-1-noneno	0.38 %	46.50	0.18
1-Deceno	2.89 %	46.50	1.35
Decano	4.10 %	47.85	1.96
1-Undeceno	1.76 %	46.54	0.82
Undecano	4.40 %	47.54	2.09
1-Dodeceno	1.83 %	46.46	0.85
Dodecano	4.08 %	47.52	1.94
7-Metil-3-undeceno	0.03 %	46.46	0.01
5-Metil-1-undeceno	1.00 %	46.46	0.46
2-Metilundecano	0.19 %	47.54	0.09
1-Trideceno	0.47 %	46.41	0.22
Tridecano	4.77 %	47.38	2.26
Ciclotetradecano	1.27 %	47.47	0.60
1-Tetradeceno	3.20 %	46.41	1.48
Tetradecano	6.89 %	47.36	3.26

Etilciclododecano	0.48 %	47.36	0.23
1-Pentadeceno	4.77 %	46.38	2.21
Pentadecano	4.87 %	47.32	2.30
Ciclopentadecano	0.74 %	47.32	0.35
2,6,11-Trimetildodecano	1.00 %	47.32	0.47
1,1,4,4,7,7-Hexametilciclononano	0.64 %	47.32	0.30
Ciclohexadecano	0.31 %	47.24	0.15
Hexadecano	5.21 %	47.24	2.46
Hexadecenal	0.25 %	46.25	0.11
Hexadeceno	1.17 %	46.25	0.54
1-Heptadeceno	1.09 %	46.22	0.51
8-Heptadeceno	1.72 %	46.22	0.79
Heptadecano	2.58 %	47.19	1.22
Ácido sulfuroso, éster cicloximetílico undecílico	0.31 %	46.64	0.15
1-(Dodecilo)benzoceno	0.11 %	47.08	0.05
1-Octadeceno	2.50 %	46.19	1.15
Octadecano	3.51 %	47.07	1.65
Ácido sulfuroso, éster cicloximetílico dodecílico	0.17 %	47.07	0.08
9-Nonadeceno	1.11 %	46.16	0.51
Nonadecano	2.79 %	47.04	1.31
Eicosano	5.74 %	47.78	2.74
3-Eicoseno	0.24 %	46.02	0.11
Heneicosano	2.93 %	47.78	1.40
Ácido oxálico, éster ciclobutil hexadecílico	0.02 %	46.55	0.01
Dodecano, 1,1'-oxibis-	0.88 %	47.77	0.42
Heptacosano 1-cloro	1.28 %	47.77	0.61
Entalpía de combustión de compuestos del combustible líquido obtenido en la rampa de 8 °C/30 min (kJ/g)			47.22

En el cuadro anterior se reporta la entalpía de combustión ponderando cada uno de los compuestos identificados. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos. Los valores de entalpía de combustión estándar fueron extraídos de NIST (2025).

Cuadro 45. Cálculo de entalpía de combustión mediante los compuestos presentes en el combustible líquido producto de la rampa de 12 °C/30 min

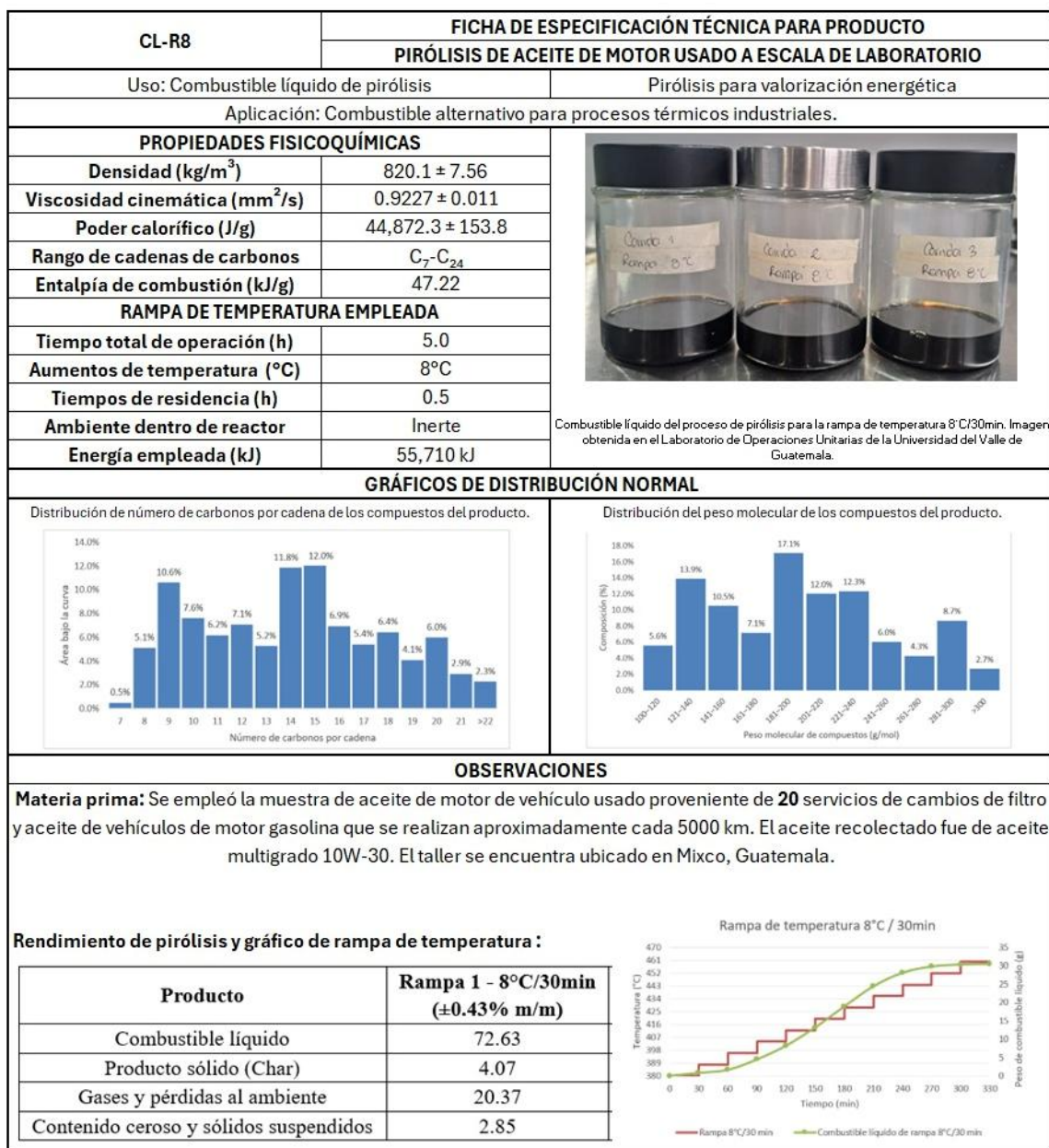
Compuesto	Composición porcentual	ΔH_c° (kJ/g)	ΔH_c° ponderada (kJ/g)
1-Hepteno	1.14 %	47.914	0.55
Heptano	1.52 %	47.914	0.73
Metilciclohexano	0.20 %	47.914	0.10
2,2-Dimetilpentano	0.54 %	47.914	0.26
1-Hexeno, 4-etil-	0.21 %	47.888	0.10
2-Metilheptano	0.82 %	47.888	0.39
3-Metilheptano	0.80 %	47.888	0.38
2-Metil-1-hepteno	0.78 %	47.888	0.37
Ciclohexeno, 3,5-dimetil-	0.20 %	47.888	0.10
1-Octeno	2.02 %	46.200	0.93
Octano	2.39 %	47.888	1.14
2,6-Dimetil-1-hepteno	0.65 %	47.868	0.31
2,4-Dimetilheptano	1.18 %	47.868	0.56
4-Etilheptano	0.38 %	47.868	0.18
3-Metiloctano	2.10 %	47.868	1.01
1-Noneno	2.03 %	46.367	0.94
Nonano	3.51 %	47.868	1.68
2-Piperidona, N-[4-bromo-n-butilo]	1.23 %	47.888	0.59
4-Metilnonano	0.22 %	47.852	0.11
2-Metil-1-noneno	0.37 %	46.501	0.17
1-Deceno	2.90 %	46.501	1.35
Decano	3.75 %	47.852	1.80
1-Undeceno	1.62 %	46.611	0.75
Undecano	3.92 %	47.839	1.87
9-Metil-1-deceno	0.54 %	46.611	0.25
1-Dodeceno	1.53 %	46.702	0.72
Dodecano	3.93 %	47.828	1.88
1-Trideceno	0.52 %	46.779	0.24
Tridecano	5.02 %	47.819	2.40
Ciclotetradecano	0.89 %	47.811	0.42
1-Tetradeceno	3.29 %	46.845	1.54
Tetradecano	7.37 %	47.811	3.52
1-Pentadeceno	4.52 %	46.903	2.12
Pentadecano	5.34 %	47.804	2.55
Ciclopentadecano	0.89 %	47.804	0.42
1,1,4,4,7,7-Hexametilciclononano	0.42 %	47.804	0.20
2,4,4,6,6,8,8-Heptametil-2-noneno	0.17 %	47.798	0.08
Ciclohexadecano	0.25 %	47.798	0.12
Hexadecano	4.99 %	47.798	2.39

Hexadeceno	1.29 %	46.953	0.60
1-Heptadeceno	2.12 %	47.792	1.01
Heptadecano	2.18 %	47.792	1.04
1-Octadeceno	1.31 %	47.788	0.63
Octadecano	3.26 %	47.788	1.56
Ácido oxálico, éster dodecil isobutilo	0.43 %	47.828	0.21
9-Nonadeceno	4.16 %	47.783	1.99
Nonadecano	3.29 %	47.783	1.57
Eicosano	3.35 %	47.78	1.60
3-Eicoseno	0.13 %	47.103	0.06
Heneicosano	2.50 %	47.776	1.19
Ácido sulfuroso, éster cicloxilmetílico tetradecil	0.31 %	47.852	0.15
Tetracosano	1.04 %	47.767	0.50
Heptacosano 1-cloro	0.62 %	47.761	0.30
Entalpía de combustión de compuestos del combustible líquido obtenido en la rampa de 12 °C/30 min (kJ/g)			47.64

En el cuadro anterior se reporta la entalpía de combustión ponderando cada uno de los compuestos identificados. Se empleó un Espectrofotómetro GC-Masas para la determinación de compuestos. Los valores de entalpía de combustión estándar fueron extraídos de NIST (2025).

G. Fichas técnicas de productos

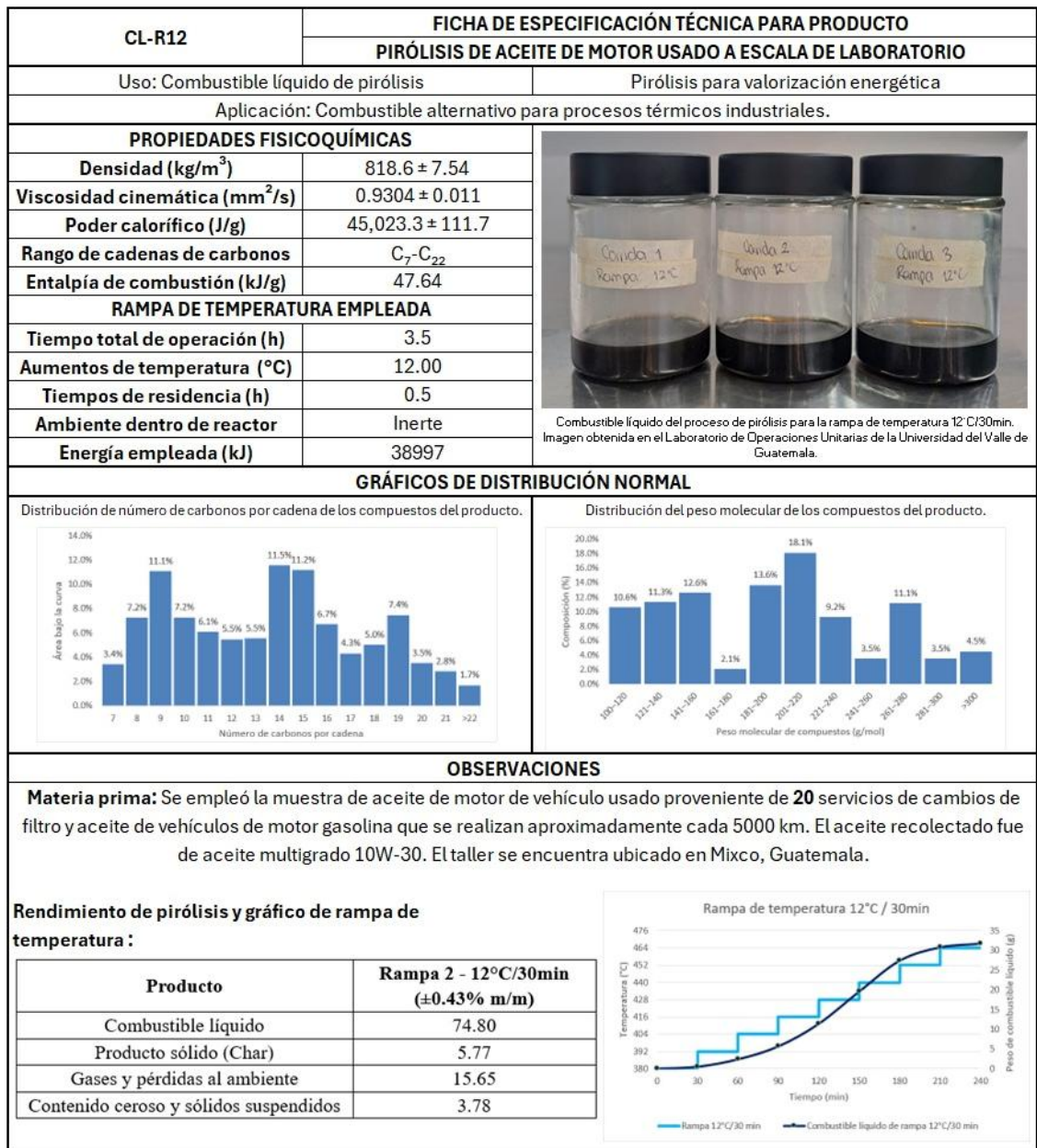
Figura 41. Ficha técnica de producto de rampa de 8 °C/30 min



Fuente: Propia

Se muestra la ficha técnica del producto obtenido mediante el proceso de pirólisis térmica empleando la rampa de aumentos de 8 °C con tiempos de residencia de 30 minutos. Se encuentran propiedades fisicoquímicas, incluyendo poder calorífico y otras características relevantes, determinadas mediante métodos analíticos estandarizados para evaluar su potencial de aprovechamiento energético.

Figura 42. Ficha técnica de producto de rampa de 12 °C/30 min

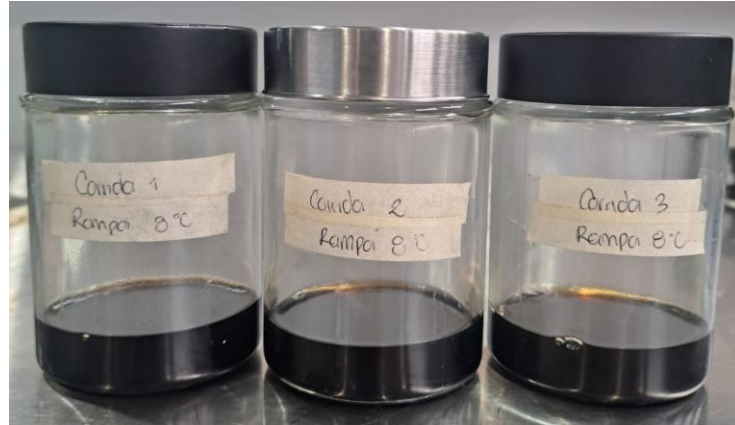


Fuente: Propia

Se muestra la ficha técnica del producto obtenido mediante el proceso de pirólisis térmica empleando la rampa de aumentos de 12 °C con tiempos de residencia de 30 minutos. Se encuentran propiedades fisicoquímicas, incluyendo poder calorífico y otras características relevantes, determinadas mediante métodos analíticos estandarizados para evaluar su potencial de aprovechamiento energético.

H. Figuras complementarias

Figura 43. Combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 8 °C con 30 minutos de residencia en el reactor



Fuente: Propia

Se muestra el combustible líquido del proceso de pirólisis para la rampa de temperatura 8 °C/30 min de cada una de las corridas realizadas. Imagen obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 44. Char obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 8 °C con 30 minutos de residencia en el reactor



Fuente: Propia

Se muestra el char obtenido del proceso de pirólisis para la rampa de temperatura 8 °C/30 min de cada una de las corridas realizadas. Imagen obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

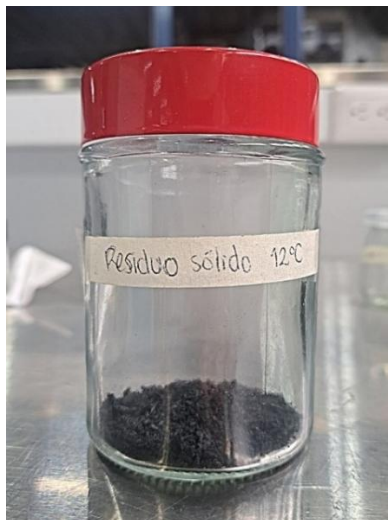
Figura 45. Combustible líquido obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 12 °C con 30 minutos de residencia en el reactor



Fuente: Propia

Se muestra el combustible líquido del proceso de pirólisis para la rampa de temperatura 12 °C/30 min de cada una de las corridas realizadas. Imagen obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 46. Char obtenido de la pirólisis de aceite de motor usado empleando la rampa de aumentos de 12 °C con 30 minutos de residencia en el reactor



Fuente: Propia

Se muestra el char obtenido del proceso de pirólisis para la rampa de temperatura 12 °C/30 min de cada una de las corridas realizadas. Imagen obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 47. Recolección de combustible líquido de la pirólisis de aceite de motor usado



Fuente: Propia

Se muestra la recuperación del combustible líquido a través de la condensación de los compuestos vaporizados. Imagen obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 48. Montaje de reactor de pirólisis y condensador



Fuente: Propia

Se muestra la Mufla ThermoScientific empleada para el control de temperatura donde está contenido el reactor de pirólisis, se observa su respectiva chimenea conectada al condensador para la obtención del combustible líquido. Imagen obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

XIII. GLOSARIO

Aceite de motor usado: Lubricante que ha cumplido su vida útil en un motor de combustión interna y contiene impurezas como metales pesados, hollín, agua, aditivos degradados y residuos de combustión.

Análisis fisicoquímico: Conjunto de pruebas de laboratorio que permiten determinar propiedades físicas (densidad, viscosidad) y químicas (composición elemental, presencia de compuestos específicos) de una sustancia.

Combustible líquido (Aceite pirolítico): Fracción obtenida en la pirólisis que presenta características apropiadas para ser utilizada como fuente de energía, ya sea directamente o tras un tratamiento posterior.

Hidrocarburos: Compuestos químicos formados por carbono e hidrógeno, principales constituyentes del petróleo, sus derivados y los productos obtenidos por pirólisis.

Peso molecular: Masa de una molécula expresada en g/mol, calculada como la suma de las masas atómicas de sus átomos.

Pirólisis: Proceso termoquímico de descomposición de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, que produce fracciones líquidas, gaseosas y sólidas a altas temperaturas.

Poder calorífico: Cantidad de energía liberada durante la combustión completa de una unidad de masa de combustible, generalmente expresado en MJ/kg o kcal/kg.

Producto sólido (Char): Material carbonoso no volátil que queda al final de la pirólisis, compuesto principalmente por carbono y cenizas, con posibles aplicaciones como combustible sólido o adsorbente.

Rendimiento: Porcentaje de la masa del aceite original que se transforma en un producto deseado, como combustible líquido, en relación con la masa total procesada.

Viscosidad: Medida de la resistencia de un líquido a fluir, importante en la evaluación del comportamiento del combustible en sistemas de transporte o combustión.