



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO MEDIANTE
LA PIROLISIS DE ACEITES RESIDUALES LUBRICANTES DE
MOTOR**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: FRANKLIN JHONNY YUQUILEMA YUCAILLA

DIRECTOR: ING. ADRIÁN ALEJANDRO RODRÍGUEZ PINOS, MGS

Riobamba-Ecuador

2022

©2022, Franklin Jhonny Yuquilema Yucailla

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, FRANKLIN JHONNY YUQUILEMA YUCAILLA, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de Diciembre del 2021

Franklin Jhonny Yuquilema Yucailla

060359056-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, **OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO MEDIANTE LA PIROLISIS DE ACEITES RESIDUALES LUBRICANTES DE MOTOR**, realizado por el señor **FRANKLIN JHONNY YUQUILEMA YUCAILLA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Segundo Hugo Calderón, Mgs DELEGADO PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: SEGUNDO HUGO CALDERON .	2022-03-03
Ing. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos, Mgs. DIRECTOR/A DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado electrónicamente por: ADRIAN ALEJANDRO RODRIGUEZ PINOS	2022-03-03
Ing. Rosa Elena Pinos Neira, Mgs. MIEMBRO DE TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: ROSA ELENA PINOS NEIRA	2022-03-03

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis queridos padres Laura Yucailla y José Yuquilema, por su apoyo y sacrificio incondicional que han permitido alcanzar mis objetivos. Siempre cuento con su ayuda en todo momento, simplemente gracias por ser mis padres. Los quiero mucho.

Franklin

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por llenarme de bendiciones y guiarme por el camino correcto hasta lograr mis metas.

A mis padres, sin su ayuda nada de lo que hasta hoy he conseguido no hubiera sido posible, todo lo obtenido los debo a ellos incluyendo este trabajo. Gracias por ser los principales motores de mis sueños.

Ingeniero Adrián Rodríguez director del trabajo de titulación y a la Ingeniera Rosa Pinos por su gran predisposición en compartir sus conocimientos, orientación e inculcar el valor de la responsabilidad para llevar a cabo este trabajo.

Ingeniero Paúl Palmay, por su enseñanza, conocimiento y paciencia brindada hacia los estudiantes, su trabajo realizado es fuente de inspiración.

A mis hermanas Patricia, Mayra, Alicia; hermanos Fernando y Edwin, todos ustedes me brindaron su apoyo incondicional les estaré eternamente agradecido.

Franklin

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL.....	3
1.1. Antecedentes de la investigación.....	3
1.2. Marco teórico.....	3
1.2.1. Aceites lubricantes.....	3
1.2.2. Composición de los aceites lubricantes.....	4
1.2.2.1. Bases orgánicas.....	4
1.2.2.2. Los aditivos.....	4
1.2.3. Propiedades los aceites lubricantes.....	4
1.2.3.1. Viscosidad.....	4
1.2.3.2. Densidad.....	5
1.2.3.3. Punto de inflamación.....	5
1.2.4. Clasificación de los aceites.....	6
1.2.4.1. Aceites orgánicos.....	6
1.2.4.2. Aceites minerales.....	6
1.2.4.3. Aceites sintéticos.....	6
1.2.5. Degradación del aceite lubricante.....	7
1.2.6. Aceites lubricantes de motor usados.....	7
1.2.7. Origen de un aceite lubricante usado.....	8
1.2.8. Propiedades fisicoquímicas del aceite usado.....	9
1.2.9. Usos inadecuados del aceite lubricante usado.....	10
1.2.10. Efectos a la salud de los contaminantes del aceite usado.....	10
1.2.11. Efectos medioambientales del aceite usado.....	11
1.2.12. Etapas de manejo de aceites lubricantes usados.....	12
1.2.12.1. Recolección.....	12

1.2.12.2.	<i>Almacenamiento</i>	13
1.2.12.3.	<i>Transporte</i>	13
1.2.12.4.	<i>Tratamientos</i>	13
1.2.12.5.	<i>Disposición final</i>	14
1.2.13.	<i>Aprovechamiento energético</i>	14
1.2.13.1.	<i>Reutilización</i>	14
1.2.13.2.	<i>Re-refinación</i>	15
1.2.13.3.	<i>Valoración energética</i>	15
1.2.13.4.	<i>Incineración</i>	15
1.2.14.	<i>Reutilización como portador energético</i>	15
1.2.15.	<i>Potencial para uso en motores de combustión interna (MCI)</i>	16
1.2.16.	<i>Pirolisis</i>	16
1.2.17.	<i>Tipos de pirolisis</i>	17
1.2.18.	<i>Pirolisis térmica</i>	17
1.2.18.1.	<i>Pirolisis flash o ultrarrápida</i>	18
1.2.18.2.	<i>Pirolisis rápida</i>	18
1.2.18.3.	<i>Pirolisis convencional o lenta</i>	19
1.2.19.	<i>Pirolisis catalítica</i>	19

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	20
2.1.	Objetivos	20
2.1.1.	<i>General</i>	20
2.1.2.	<i>Específicos</i>	20
2.2.	Hipótesis y especificación de variables	20
2.2.1.	<i>Hipótesis general</i>	20
2.2.2.	<i>Hipótesis específica</i>	20
2.2.3.	<i>Identificación de variables</i>	21
2.2.3.1.	<i>Variables independientes</i>	21
2.2.3.2.	<i>Variables dependientes</i>	21
2.2.4.	<i>Operacionalización de variables</i>	22
2.2.5.	<i>Matriz de consistencia</i>	24
2.3.	Tipo y diseño de la investigación	26
2.3.1.	<i>Tipo de investigación</i>	26
2.3.2.	<i>Diseño de la investigación</i>	26
2.3.2.1.	<i>Primera etapa</i>	26

2.3.2.2.	<i>Segunda etapa</i>	26
2.3.2.3.	<i>Tercera etapa</i>	26
2.4.	Unidad de análisis	27
2.5.	Población de estudio	27
2.6.	Tamaño de la muestra	27
2.7.	Selección de la muestra	27
2.8.	Técnicas de recolección de datos	27
2.8.1.	<i>Análisis para la caracterización del aceite residual</i>	28
2.8.1.1.	<i>Filtración de aceite lubricante residual</i>	28
2.8.1.2.	<i>Determinación de la densidad según la norma NTE INEN 2903</i>	28
2.8.1.3.	<i>Determinación de la viscosidad cinemática según la norma ASTM D-445</i>	29
2.8.1.4.	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	30
2.8.2.	<i>Pirólisis térmica del aceite lubricante usado</i>	31
2.8.2.1.	<i>Análisis sensorial</i>	37
2.8.2.2.	<i>Rendimiento de productos finales</i>	37
2.8.2.3.	<i>Perfil de temperaturas</i>	37
2.8.2.4.	<i>Velocidad de calentamiento</i>	38
2.8.3.	<i>Análisis fisicoquímico de la fracción líquida</i>	38
2.8.3.1.	<i>Determinación de Espectroscopia Infrarroja FT-IR</i>	38
2.8.4.	<i>Pruebas para combustible</i>	39
2.8.4.1.	<i>Poder calorífico</i>	39
2.8.4.2.	<i>Destilación</i>	39
2.8.4.3.	<i>Índice de cetanos</i>	40
2.8.4.4.	<i>Punto de inflamación</i>	41
2.8.4.5.	<i>Densidad</i>	42
2.8.4.6.	<i>Viscosidad cinemática</i>	42
2.8.4.7.	<i>Contenido de azufre</i>	43
2.8.4.8.	<i>Análisis estadístico</i>	44
2.8.4.9.	<i>Cromatografía de gases GC-MS</i>	45

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.1.	Resultados	47
3.1.1.	<i>Resultado de caracterización fisicoquímica del aceite lubricante residual</i>	47
3.1.1.1.	<i>Prueba de densidad</i>	47
3.1.1.2.	<i>Prueba de viscosidad</i>	47

3.1.1.3.	<i>Filtración del aceite lubricante residual</i>	48
3.1.1.4.	<i>Determinación de espectroscopia</i>	48
3.1.2.	Resultados de la pirolisis térmica del aceite lubricante residual	51
3.1.2.1.	<i>Análisis sensorial fracción líquida</i>	51
3.1.2.2.	<i>Perfil de temperaturas</i>	52
3.1.2.3.	<i>Velocidad de calentamiento</i>	53
3.1.2.4.	<i>Rendimiento de los productos finales</i>	54
3.1.2.5.	<i>Análisis estadístico</i>	56
3.1.2.6.	<i>Determinación de espectroscopia infrarroja FT-IR</i>	60
3.1.3.	Pruebas para combustible	66
3.1.3.1.	<i>Poder calórico</i>	66
3.1.3.2.	<i>Destilación</i>	66
3.1.3.3.	<i>Índice de cetanos</i>	68
3.1.3.4.	<i>Punto de inflamación</i>	70
3.1.3.5.	<i>Densidad y gravedad API</i>	70
3.1.3.6.	<i>Viscosidad cinemática</i>	71
3.1.3.7.	<i>Contenido de azufre</i>	72
3.1.3.8.	<i>Análisis de Cromatografía de gases GC-MS</i>	72
3.2.	Pruebas de hipótesis	74
3.2.1.	Hipótesis general	74
3.2.2.	Hipótesis específica	74
3.2.2.1.	<i>Hipótesis I</i>	74
3.2.2.2.	<i>Hipótesis II</i>	75
3.2.2.3.	<i>Hipótesis III</i>	75
3.3.	Discusión	76
CONCLUSIONES		78
RECOMENDACIONES		80
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante virgen	5
Tabla 2-1:	Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante usado.....	9
Tabla 1-2:	Operacionalización de variables	22
Tabla 2-2:	Matriz de consistencia	24
Tabla 1-3:	Análisis del espectro IR del aceite lubricante residual	49
Tabla 2-3:	Análisis sensorial de fracción líquida.....	52
Tabla 3-3:	Rendimiento de productos finales de la pirolisis de aceite lubricante residual ...	54
Tabla 4-3:	Promedio de rendimientos finales	55
Tabla 5-3:	Datos preliminares del ANOVA	56
Tabla 6-3:	Análisis de la varianza.....	57
Tabla 7-3:	Condiciones prueba Tukey	57
Tabla 8-3:	Posibles comparaciones entre grupos basados en la diferencia de sus medias....	57
Tabla 9-3:	Análisis del Test TUKEY variable temperatura.....	58
Tabla 10-3:	Análisis del Test TUKEY variable tiempo.....	58
Tabla 11-3:	Datos preliminares del ANOVA	59
Tabla 12-3:	Análisis de la varianza.....	59
Tabla 13-3:	Análisis del Test TUKEY.....	59
Tabla 14-3:	Análisis del espectro IR de la fracción líquida 350°C-60 minutos	62
Tabla 15-3:	Análisis del espectro IR de la fracción líquida 350°C-120 minutos	63
Tabla 16-3:	Análisis del espectro IR de la fracción líquida 400°C-60 minutos	64
Tabla 17-3:	Análisis del espectro IR de la fracción líquida 400°C-120 minutos	65
Tabla 18-3:	Datos de destilación para la muestra de 400°C con 60 minutos	66
Tabla 19-3:	Datos de destilación para la muestra de 400°C con 120 minutos	67
Tabla 20-3:	Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API	70
Tabla 21-3:	Clasificación del crudo de acuerdo a la gravedad API.....	71
Tabla 22-3:	Resultados de Cromatografía de gases GC-MS	72
Tabla 23-3:	Resultados de distribución de carbonos.....	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Espectro IR del aceite lubricante residual	49
Gráfico 2-3:	Espectro IR del aceite lubricante residual	51
Gráfico 3-3:	Perfil de temperatura de la pirólisis.....	53
Gráfico 4-3:	Rendimiento de la fracción líquida.....	55
Gráfico 5-3:	Gráfica representativa del Test de Tukey	58
Gráfico 6-3:	Gráfica representativa del Test de Tukey	60
Gráfico 7-3:	Espectro IR de la fracción líquida a 350°C-60 minutos	61
Gráfico 8-3:	Espectro IR de la fracción líquida a 350°C-120 minutos	61
Gráfico 9-3:	Espectro IR de la fracción líquida a 400°C-60 minutos	62
Gráfico 10-3:	Espectro IR de la fracción líquida a 400°C-120 minutos	62
Gráfico 11-3:	Curva de destilación del aceite pirolítico a 400°C-60 minutos.....	67
Gráfico 12-3:	Curva de destilación del aceite pirolítico a 400°C-120 minutos.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Balanza digital	32
Figura 2-2:	Sistema de enfriamiento.....	32
Figura 3-2:	Reactor Batch.....	33
Figura 4-2:	Bomba de vacío.....	33
Figura 5-2:	Cilindro del reactor	34
Figura 6-2:	Nitrógeno gaseoso.....	34
Figura 7-2:	Atmosfera Inerte	35
Figura 8-2:	Control automático del reactor.....	36
Figura 9-2:	Peso de producto	36
Figura 10-2:	Equipo de destilación fraccionada	40
Figura 11-2:	Equipo Flash Point.....	42
Figura 12-2:	Viscosímetro	43
Figura 1-3:	Peso de la muestra.....	47
Figura 2-3:	Peso de filtrado	48
Figura 3-3:	Producto de pirólisis	52

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PODER CALÓRICO FRACCIÓN LÍQUIDA A 400°C-60 MINUTOS

ANEXO B: PODER CALÓRICO, AZUFRE FRACCIÓN LÍQUIDA A 400°C-120 MINUTOS

ANEXO C: CROMATOGRAMA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA A 350°C-60 MINUTOS.

ANEXO D: CROMATOGRAMA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA A 400°C-120 MINUTOS.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo obtener un combustible alternativo mediante un proceso de pirólisis térmica utilizando como materia prima el aceite lubricante residual de motor, el aceite fue obtenido de las empresas lubricadoras de la ciudad de Riobamba. Este reciclaje de tipo químico se llevó a cabo en un rango de temperaturas de 350-400 grados Celsius con un tiempo de residencia de 60-120 minutos, para analizar el efecto de estas dos variables sobre el rendimiento de los productos finales. La parte experimental se llevó a cabo en un reactor tipo Batch con atmosfera inerte de nitrógeno gaseoso inyectado a través de las válvulas, con un sistema de refrigeración de agua a 10 grados Celsius, dando lugar a la producción de productos líquidos, gaseosos y sólidos. Para el análisis de la fracción líquida se aplicó técnicas de espectroscopía FT-IR, cromatografía de gases GC-MS y pruebas de para combustibles tales como densidad, viscosidad cinemática, punto de inflamación, destilación, índice de cetanos y contenido de azufre. El resultado de la pirólisis fue un líquido aceitoso compuesto por parafinas, olefinas y aromáticos, con un poder calorífico de entre 45,517-45,750 MJ/kg. El rendimiento de la fracción líquida más alto fue de 81,432% obtenido a una temperatura de 400 grados Celsius con un tiempo de 120 minutos. Se determinó que el ensayo óptimo es el mencionado anteriormente debido a que las muestras analizadas presentan la misma composición en compuestos parafínicos, olefínicos y aromáticos con distribución de carbonos de entre C6-C20. De esta manera se verificó que el aumento de temperatura y tiempo favorece a la formación de productos gaseosos condensables. Se recomienda el uso del producto pirolizado como combustible industrial en hornos y calderas o a su vez su utilidad como aceite de uso general debido a este producto es considerado como un aceite regenerado.

Palabras clave: <PIRÓLISIS TÉRMICA>, <ACEITE LUBRICANTE RESIDUAL USADO>, <COMBUSTIBLE>, <TEMPERATURA DE PIRÓLISIS>, <TIEMPO DE PIRÓLISIS>.

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.11.15
11:15:21 -05'00'



2094-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

The objective of this research was to obtain an alternative fuel through a thermal pyrolysis process using residual motor lubricating oil as raw material, the oil was obtained from the lubricating companies in Riobamba. This chemical type recycling was carried out in a temperature range of 350-400 degrees Celsius with a residence time of 60-120 minutes, to analyze the effect of these two variables on the performance of the final products. The experimental part was carried out in a reactor type Batch with an inert atmosphere of gaseous nitrogen injected through the valves, with a water cooling system at 10 degrees Celsius, leading to the production of liquid, gaseous and solid products. For the analysis of the liquid fraction, FTIR spectroscopy techniques, GC-MS gas chromatography and tests for fuels such as density, kinematic viscosity, flash point, distillation, cetane index and sulfur content were applied. The result of the pyrolysis was an oily liquid composed of paraffins, olefins and aromatics, with a calorific power of between 45,517-45,750 MJ/kg. The yield of the highest liquid fraction was 81.432% obtained at a temperature of 400 degrees Celsius with a time of 120 minutes. It was determined that the optimal test is the one mentioned above because the analyzed samples have the same composition in paraffinic, olefinic and aromatic compounds with carbon distribution between C6-C20. In this way, it was verified that the increase in temperature that favors the formation of condensable gaseous products. The use of the pyrolyzed product is recommended as industrial fuel in ovens and boilers or its utility as a general use oil due to this product being considered as a regenerated oil.

Keywords: <THERMAL PYROLYSIS>, <USED RESIDUAL LUBRICANT OIL>, <FUEL>, <PYROLYSIS TEMPERATURE>, <PYROLYSIS TIME>.



Firmado electrónicamente por:
**NANCI
MARGARITA INCA
CHUNATA**

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el aceite lubricante para motores de combustión es uno de los derivados del petróleo que se produce a gran escala, debido a la gran demanda del producto en la industria automotriz conlleva a ser un pilar muy importante en el desarrollo de dicha industria. De la misma manera el aceite lubricante al culminar su etapa útil en los motores genera una gran cantidad de desechos residuales que son contraproducentes tanto para el medio ambiente como para los seres humanos.

Los aceites residuales de motores son materiales líquidos que producen altos niveles de contaminación, sino se someten a tratamientos adecuados, los mismos que se deben gestionar de una manera responsable un su posterior reciclaje o eliminación hacia el medio, estos residuos en su gran mayoría contienen la presencia de algunos aditivos metálicos y compuestos orgánicos, compuestos que contienen azufre, hidrocarburos aromáticos policíclicos y residuos carbonosos los cuales constituyen un problema medio ambiental esencial (El-Mekkawi et al., 2020, p. 2).

Colocar el aceite lubricante usado de motor y desechos contaminados en los rellenos sanitarios o en los botaderos a cielo abierto, no es una solución adecuada. Innegablemente, el aceite se convierte en parte del lixiviado y va a parar en las aguas subterráneas, haciendo que ésta no sea apta para el consumo humano. La contaminación del agua superficial o del suelo no solamente es perjudicial para el hombre, sino para todas las demás formas de vida, puesto que la presencia del aceite altera los procesos de intercambio en los ecosistemas. El aceite lubricante usado que se quema bajo condiciones no controladas puede emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente industrial, según estudios desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2015).

En el Ecuador en el año 2019 con fecha de 16 de mayo se suscribe el acuerdo ministerial donde se otorga un plazo de 180 días a las lubricadoras y distribuidoras de este insumo, para que establezcan una empresa recicladora que se encargue de su tratamiento adecuado, en el país el 63% de aceite lubricante es desechado y que un galón de este insumo puede contaminar 1.000 litros de agua.

De acuerdo con datos de la compañía Quiteña Arc y Pieper, que se dedica a esta labor, se desechan 54 millones de litros de aceites usados al año en el Ecuador. El 70% (9,45 millones de galones) corresponde a uso doméstico y el resto (4,05 millones) al sector automotor e industrial. En la actualidad, se recolecta 35 000 galones mensuales de 1 300 lavadoras, mecánicas, vulcanizadoras e industrias, y representa el 55% de aceites que se utiliza en Cuenca (COMERCIO, 2018).

De las 5 municipalidades (Cuenca, Ambato, Ibarra, Quito y Orellana) que gestionan y promueven el reciclaje y su posterior tratamiento, es únicamente la ciudad de Cuenca que tiene la licencia ambiental para el reciclaje y su debido tratamiento del aceite de lubricantes de motor. Pero en la mayoría de las ciudades como Riobamba no cuentan con este tipo de reciclaje y tratamiento que

permita disminuir el impacto ambiental en las zonas aledañas a su descarga por medio del alcantarillado.

Una manera práctica de dar solución a esta problemática es el reciclaje y su posterior tratamiento, de tal forma que el material no solamente sea almacenado sino también se dé un procedimiento adecuado para transformar este residuo en combustible alternativo mediante la aplicación de la pirolisis del aceite residual de motores. Este proyecto de investigación se orienta en los aceites usados de motores de automóviles provenientes principalmente de las lubricadoras de la localidad, para lo cual se debe realizar un reciclaje previo de dicho material para su tratamiento posterior, también por medio de este trabajo se quiere dar a conocer la importancia del reciclaje y la reutilización de los productos que se desechan a menudo en los alcantarillados de la ciudad, en ocasiones estos residuos son utilizados como combustible de hornos en la industria de cal, lo que provoca una grave contaminación ya que el aceite usado al ser combustionado genera contaminantes peligrosos a la atmósfera y dar un tratamiento mediante la obtención de productos combustibles a partir de la pirolisis, sería una buena opción de reutilizar el material.

Existen varios métodos para el reciclaje de aceites lubricantes entre los que se puede mencionar esta la re-refinación, gasificación, la extracción por solventes, la hidrogenación y la destilación; estas técnicas resultan tener varias limitaciones como el alto costo, necesidad de grandes cantidades de reactivos y al final se obtiene un rendimiento no deseado. Sin embargo la pirolisis resulta ser un reciclaje de desechos de hidrocarburos de gran aceptabilidad tomando en cuenta las limitaciones mencionadas anteriormente. Este proceso es prácticamente útil para el tratamiento de desechos que contienen mezclas de hidrocarburos de cadena larga, como los aceites lubricantes usados (El-Mekkawi et al., 2020, p. 3).

En la actualidad en la ciudad de Riobamba la mayoría de las lubricadoras no cuenta con un manejo y reciclaje adecuado de este material residual, por tal motivo existe la posibilidad de realizar este proyecto con una gran aceptación en dichas empresas productoras de este aceite residual puedan brindar las facilidades para la obtención de la materia prima para este proyecto y de cierta manera motiva a estos locales a dar un reciclaje adecuado y disminuir la contaminación en la población contribuyendo así a un desarrollo sostenible en el ámbito medio ambiental de la ciudad y de esta manera generar nuevos combustibles alternativos que sean de gran utilidad en la actualidad, ya que dicho combustible puede ser utilizado en varios procesos, incluso si se da una adecuada refinación con equipos apropiados para el proceso de paralización se puede decir que se obtiene un combustible muy similar al diésel.

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes de la investigación

La producción y acumulación de los aceites residuales de los motores de combustión interna ha sido un problema que mediante estudios realizados se pueden dar solución, en los últimos años se han estudiado nuevas formas de dar un tratamiento adecuado a este residuo, una de ellas es el tratamiento por el proceso de la pirolisis mediante el cual se puede obtener un combustible alternativo aprovechando su poder energético en diferentes procesos incluido su uso en motores como combustible mediante una mezcla adecuada con los combustibles tradicionales. De esta manera se puede reutilizar el aceite residual y dar un nuevo uso, disminuyendo así la contaminación que genera el desechar este material al ambiente. La pirolisis de aceites lubricantes es una técnica interesante para convertir materiales de desechos en productos de ida útil, mediante la descomposición térmica a temperaturas elevadas en condiciones inertes (Adeniyi, Adewoye y Ighalo, 2018, p. 1).

En los estudios realizados por Razo y Riesco Dávila se menciona que el producto de la pirolisis tiene características que permiten direccionar su uso: Aunque, la intención inicial era obtener combustibles con propiedades similares al diésel o gasolina, que son utilizados principalmente en motores de combustión interna reciprocantes, se encontró que el producto de la destilación a 360°C tiene características similares al diésel comercial y representa una alternativa viable para disponer de los residuos de aceites lubricantes usados (Razo y Riesco, 2019, p. 12).

1.2. Marco teórico

1.2.1. Aceites lubricantes

Se define como aceite lubricante a la sustancia líquida que se deriva del petróleo, que tiene como objetivo reducir la fricción de las partes rodantes y móviles, proteger contra el proceso de corrosión, enfriar sistemas y de limpiar algunas piezas y partes relacionadas al automóvil. Son el resultado de una combinación entre aceite base y aditivos (Ortiz y Piloto, 2019, p. 3).

El aceite lubricante es una mezcla líquida en un porcentaje de entre 80- 90% aproximadamente de hidrocarburos y de entre 10 - 20% aproximadamente de aditivos, la cual se utiliza en equipos como motores, compresores y turbinas para disminuir el desgaste ocasionado por el rozamiento de sus piezas (Ramírez y Rodríguez, 2019, p. 5).

1.2.2. Composición de los aceites lubricantes

Los aceites lubricantes usados de automóviles están compuesto de base orgánica y por aditivos.

1.2.2.1. Bases orgánicas

Esta parte orgánica está formada por cientos de miles de compuestos de tipo orgánico, principalmente compuestos aromáticos polinucleares, con estructura de 4,5 y 6 anillos, los mismo que son considerados cancerígenos como es el caso del benzopireno, por lo cual el aceite lubricante virgen como es usado son la mayor fuente de preocupación a nivel de la contaminación ambiental que afronta el planeta (Builes, 2007, p. 7).

1.2.2.2. Los aditivos

El aceite debe estar acompañado por aditivos de la base orgánica que por lo general constituyen el 30% del aceite lubricante virgen, estos aditivos evitan el desgaste acelerado del aceite. Los aditivos son compuestos químicos que otorgan propiedades específicas, la mayoría de estos aditivos reduce la tasa a la cual ocurren cambios indeseados en el aceite. Estos aditivos pueden tener efectos negativos especialmente cuando su dosis es excesiva o si ocurren reacciones indeseables entre aditivos (Builes, 2007, p. 7-9).

1.2.3. Propiedades los aceites lubricantes

La gran mayoría de los aceites lubricantes está fabricado de un material base de hidrocarburo de origen del petróleo pesado y espeso, siendo una característica fundamental que en su estructura contienen entre 18-32 carbonos por molécula (Laz, 2017, p. 62).

Los aceites lubricantes de motor deben tener ciertas propiedades, debido a que se mezclan con el refrigerante, lo que requiere algunas especificaciones para decir que es un buen aceite lubricante, por lo que el soportar altas y bajas temperaturas, sin perder la viscosidad suficiente ya que el aceite debe permanecer fluido en todas las partes que lubrica. Entre las propiedades más importantes se mencionan las siguientes:

1.2.3.1. Viscosidad

La viscosidad es una de las propiedades más importantes del aceite lubricante de motor, debido a que es la que se encarga de mantener una película lubricante entre las partes móviles que está en contacto con el fluido lubricante. Esta propiedad se puede considerar como una medida de la

resistencia al flujo y debe ser lo suficientemente alta como para mantener una capa lubricante, pero también lo suficientemente baja como para que fluya por todas las piezas del motor en cualquier condición de operación.

El índice de viscosidad es una medida de cuánto cambia la viscosidad del aceite a medida que cambia la temperatura. Un índice de viscosidad más alto indica que la viscosidad cambia menos con la temperatura que un índice de viscosidad más bajo (Laz, 2017, p. 62).

1.2.3.2. Densidad

La densidad hace referencia a su masa específica y al volumen conocido que ocupa el aceite, razón por la cual se sabe que muchos de los aceites flotan al entrar en contacto con el agua, sin embargo, existen otros aceites que son más densos que el agua y se hunden en ella, estos aceites son los del grupo IV del sistema API.

Es importante el control de la densidad en las máquinas, ya que la variación de la misma puede significar un sobrecalentamiento de sus piezas. La densidad tiene un papel fundamental en el funcionamiento del lubricante y el rendimiento de las máquinas. Esto se debe a que los equipos se diseñan según la densidad del aceite que se utilizará en el sistema, y cualquier cambio en esta propiedad comprometer su rendimiento. De forma similar, mayores densidades en el aceite indicarán mayor tiempo de permanencia de las partículas en suspensión (Hernández, 2018, p. 1).

1.2.3.3. Punto de inflamación

Esta propiedad hace relación a la temperatura más baja a la cual se evapora y al mismo tiempo puede encenderse formando una llama que arde, en el proceso de refinación del aceite se toma en cuenta esta propiedad debido a su peligrosidad en el ambiente, por lo que se aplica una destilación fraccionada para eliminar los compuestos más volátiles e inestables. Es peligroso que el aceite de un motor se encienda y se queme, por lo que es deseable un punto de inflamación alto (Laz, 2017, p. 62).

En la tabla 1-1 se indican algunas propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante virgen.

Tabla 1-1: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante virgen

Propiedad	Tolerancia	Unidades
Viscosidad a 40°C, SSU	3,8 - 21,9	°C
Nitrógeno en lubricantes	0,05	% masa
Metales: Ba, Mg, Zn, Ca,	-	-
Valores > 100 ppm	-10 %, +15%	Ppm
Valores < 100 ppm	-15 %, + 20%	Ppm

Fuente: Smith, 2004.

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

1.2.4. Clasificación de los aceites

Los aceites lubricantes según su origen y finalidad de uso se clasifican en:

1.2.4.1. Aceites orgánicos

Este tipo de aceites se extraen principalmente de animales y de la parte vegetal antes que se conociera el petróleo, actualmente se emplea mezcla con los aceites minerales para obtener ciertas propiedades como adherencia y pegajosidad en la superficie. Este tipo de aceites al entrar en contacto con el calor se descomponen fácilmente; por el contrario a bajas temperaturas se oxidan dando lugar a la formación de gomas, quedando defectuosa su función de lubricación (Luna y Batidas, 2011, p. 34).

1.2.4.2. Aceites minerales

Su origen parte de la refinación del petróleo, estructuralmente está compuesto por moléculas complejas de alrededor de 20 a 70 átomos de carbono, este tipo de aceite está formado por una base lubricante y de aditivos químicos. Los aceites minerales en su estado puro no contienen compuestos inestables como son el nitrógeno, oxígeno, azufre y compuestos de ácidos, los cuales repercuten en la vida útil del aceite (Luna y Batidas, 2011, p. 34).

1.2.4.3. Aceites sintéticos

Los aceites sintéticos son los aceites básicos que están formados por polialfaolefinas, contienen una estructura y tamaño uniforme, tienen uniones fuertes con estructuras saturadas. Una característica propia es que contiene alto índice de viscosidad. Debido a que la síntesis es hecha de un gas, los sólidos como las ceras, no son contenidas en los productos finales (Luna y Batidas, 2011, p. 34).

Existe otra pequeña clasificación según (CONUEE, 2018, p. 8), de acuerdo a su naturaleza los aceites lubricantes se clasifican en:

- Parafínicos. - Usados en plastificantes
- Aromáticos. - Aceite para motor, turbinas, transmisiones y engranajes.
- Nafténicos. - Grasas, fluido para temple de metales, Aceite de transformadores y refrigeración.

1.2.5. Degradación del aceite lubricante

Posterior al su uso el aceite lubricante adquiere concentraciones elevadas de metales producto del desgaste del motor o máquina que lubrico en su vida útil, esto también se da por contacto con el combustible, esto hace que el aceite lubricante tenga grados de desgaste y se genere el cambio de aceite, para que el nuevo aceite siga cumpliendo su función.

Según (Macian, Tormos y Miró, 2015, p. 729-744) "La degradación del aceite lubricante es un proceso a través del cual se reduce la capacidad del lubricante para realizar las funciones para las cuales ha sido diseñado (tareas de lubricación, refrigeración, protección, limpieza y sellado)"

La degradación del aceite lubricante inicia al momento de entrar en contacto con el aire, en este instante se da la oxidación del aceite, la misma que afecta el aspecto del aceite sin afectar a su comportamiento, al momento del cambio del aceite el aceite nuevo siempre se mezcla con el antiguo que no afecta al aceite nuevo, sin embargo, al próximo cambio eso se verá degradado.

El proceso de degradación de un aceite lubricante inicia con diferentes causas entre las que se puede destacar son el entorno y el trabajo a realizar por el fluido lubricante, una de las causas más comunes es el proceso de la oxidación.

La oxidación se da por la presencia de oxígeno en el aceite lubricante, con esto la degradación no se da de manera instantánea, sino que se va detectando gradualmente conforme se usa el aceite, llegando así al punto que el producto ya no cumple sus funciones para la cual fue creada y el aceite se dice que está desgastado y se debe realizar una sustitución por otro nuevo aceite.

Otro tipo de desgaste es por las partículas de metales provenientes de las maquinarias que están en contacto con el aceite y mediante su funcionamiento se generan partículas metálicas. Hay que tomar en cuenta que entre más partículas metálicas se generan mayor será el desgaste del aceite; estas partículas pueden ser cobre, hierro y plomo, las mismas que aceleran el proceso de oxidación (Jaramillo, Redrovan y Urgiles, 2011, p. 79).

1.2.6. Aceites lubricantes de motor usados

Se considera como aceite lubricante usado a todo tipo de aceite, incluye aceite de motor, de transmisión o hidráulico, de origen sintético o mineral, el cual es originado a partir del momento en el que deja de cumplir la función para la cual que creada, convirtiéndolo en un desecho (MAVDT, 2006, p. 17).

Luego de su vida útil los aceites lubricantes adquieren altas concentraciones de metales pesados producto del desgaste del motor o máquinas que lubrico y por contacto con combustible. También en este se encuentran solventes clorados provenientes de la refinación, la presencia de solventes clorados en conjunto con altas concentraciones de metales constituye la principal preocupación de los aceites. La descomposición del aceite se debe principalmente a una reacción de oxidación,

está en fase líquida algunas veces se orienta a una reacción radicalaria en cadena. Posterior a su uso en los aceites queda hollín que resulta ser una especie de hidrocarburo quemado (Builes, 2007, p. 15).

Este aceite es un desecho que se origina en centros industriales, mineros y principalmente del sector del transporte, un vea que este producto haya cumplido su ciclo de vida útil debe ser reciclado de manera adecuada, para prevenir problemas en la salud de las personas y del medio ambiente en general.

1.2.7. Origen de un aceite lubricante usado

Los aceites lubricantes usados conforman una gran cantidad de residuos a nivel de industrias, principalmente se originan del campo automotriz, tomando en cuenta los talleres, estaciones de servicio, servicio técnico automotriz, empresas de transporte y quizá el que más aporta con este tipo de aceites son los talleres de cambio de aceites. Sin embargo, existe también otra fuente de origen de este producto residual, la industria, estas pueden ser de tipo, metalúrgica, textil, productos de cemento, minería, química, plásticos, construcción de maquinarias, producción de energía eléctrica y electrónica, entre las más importantes y que aportan con un porcentaje considerable a la producción de dicho residuo.

El cambio de aceite es quizá el más importante y a su vez el que más contaminación genera en las urbes y ciudades, debido a que el cambio de aceite de los vehículos se lo realiza con mucha frecuencia con cantidades considerables en relación a los generados por la industria. El cambio de aceite consiste es una operación de mantenimiento en el cual se reemplaza el aceite usado por aceite nuevo, con la finalidad de asegurar las condiciones necesarias de funcionamiento y lubricación en las máquinas y equipos. Se recomienda realizar esta actividad con las mejores prácticas y evitando aquellas que puedan generar riesgos para la salud humana y contaminación del medio ambiente (MAVDT, 2006, p. 23).

A continuación, se menciona algunas de las fuentes más comunes que dan origen al aceite usado.

- Aceites de motores de combustión y transmisión.
- Refrigerantes y lubricantes sintéticos.
- Aceites de máquinas y turbinas.
- Lodos provenientes de separadores de aceites.
- Residuos acuosos provenientes de la refinación de aceites usados.
- Lodos provenientes de la limpieza de tanques y barriles que han contenido aceite usado.
- Residuos de separadores de bencina y aceite.
- Los generados por el sector comercial - navegación.

1.2.8. *Propiedades fisicoquímicas del aceite usado*

Una vez que el aceite ha concluido con su vida útil de funcionamiento, estos van perdiendo la característica ya sea por el uso o por acción de la temperatura del trabajo a la cual se somete en su utilidad, las propiedades fisicoquímicas, con una adecuada caracterización dan lugar a la reutilización de dicho aceite, mediante tratamientos de regeneración o procesamiento.

En la tabla 2-2 se muestran las propiedades más importantes que se toman en cuenta para su reutilización.

Tabla 2-1: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante usado

Propiedad	Valor
Viscosidad a 40° C, SSU	97-120
Gravedad a 15,6°C, °API	19-22
Peso específico a 15,6°C	0,9396-0,8692
Agua,% vol.	0,2-33,8
Insolubles Bencenos,% vol.	0,1-4,2
Solubles en gasolina, % peso	0,56-33,3
Punto de ignición, °C	78-220
Potencia calorífica MJ/kg	31,56-44,88

Fuente: Minambiente, 2014, p. 18.

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Si se toma en consideración que el aceite va ser tratado para dar lugar a un posible combustible, otra propiedad de vital importancia es la gravedad específica que permite conocer el valor calórico de la sustancia, esto se debe a que mientras se incrementa el valor de esta propiedad, el valor calórico también lo hace, por incremento del peso molecular de las sustancias que lo componen; así como la potencia calorífica que muestra cual sería el desempeño de aceite en caso de usarse como fuente de combustión o para pirolisis (Tejada, Quiñones y Fong, 2017, p. 135-144).

Otra propiedad a considerar es el contenido de agua presente en el aceite, esto debido a que la presencia del agua en el aceite ayuda a su envejecimiento acelerado, por otra parte se pueden dar reacciones no deseadas en el aceite como es el caso de los esteres fosfatados y dibásicos, llevando al aceite a deteriorarse con mayor facilidad y por ende a disminuir su desempeño (Ramírez y Rodríguez, 2019, p. 8).

Finalmente, la propiedad que conlleva a la seguridad en el transporte, manejo y uso del aceite es el punto de ignición, debido a que si el punto de ignición es por debajo de la temperatura ambiente su utilidad resulta peligrosa, de esta forma se considera un producto no explosivo y estable ante condiciones ambientales.

1.2.9. Usos inadecuados del aceite lubricante usado

Una de las preocupaciones a nivel mundial es la utilización de los aceites lubricantes residuales, que generalmente existen practicas inadecuadas que de cierta manera perjudican a diversas zonas, estas malas prácticas se pueden enumerar de la siguiente manera.

- Vertido al suelo, a fuentes de agua, al alcantarillado y a sistemas de drenaje.
- Impermeabilización de suelos.
- Control de maleza.
- Inmunización de madera.
- Mezclas con plaguicidas.
- Mezclas con solventes (rebajador de pinturas y otros), agua y aceites dieléctricos.
- Mezclas con aceites dieléctricos contaminados con PCB.
- Uso como combustible en quemas a cielo abierto y en combustiones no controladas (Minambiente, 2014, p. 18).

1.2.10. Efectos a la salud de los contaminantes del aceite usado

Los efectos presentes sobre la salud humana que conlleva la exposición de cualquier contaminante va depender de la dosis, duración del contaminante y tipo de exposición, tomando en cuenta esto el aceite usado conserva muchas características del aceite original, esto ocasiona efectos en la salud humana causados por las principales sustancias presentes en el aceite, dichas sustancias que se encuentran con más frecuencia son:

- **Plomo.** - El plomo es un elemento muy perjudicial para la mayoría de los órganos y sistemas del cuerpo, siendo el más sensible el sistema nervioso, en adultos esto puede causar un deterioro de las funciones del sistema nervioso, además produce debilidad en los dedos, muñecas y tobillos. Una exposición a niveles altos de plomo puede dañar de manera severa el cerebro y riñones de niños y en adultos causar la muerte (ATSDR, 2010).
- **Nitrobenceno.** – La exposición a este compuesto puede causar irritación al entrar en contacto con la piel o los ojos, puede causar metahemoglobinemia, que es la reducción del transporte de oxígeno en la sangre, investigaciones afirman que existe evidencia que al inhalar altos contenidos de nitrobenceno daña el hígado, también se dan efectos como dolor de cabeza, irritabilidad, mareos y somnolencia (ATSDR, 2010).
- **Fenilos policlorados.** - El efecto que se observa más comúnmente en gente expuesta a grandes cantidades de PCB son efectos en la piel como acné o salpullido. En estudios en trabajadores expuestos se han observado alteraciones en la sangre y la orina que pueden indicar daño al hígado (ATSDR, 2010).

1.2.11. Efectos medioambientales del aceite usado

Tomando en cuenta la composición química que presenta el aceite lubricante residual o usado, la gran demanda a nivel mundial y sobre todo el cuidado del medio ambiente, este aceite residual se considera como uno de los muchos problemas ambientales graves. Debido a sus orígenes del petróleo, estos son considerados tóxicos para el ambiente y muy difíciles de eliminar luego de su uso. El aceite usado se considera la mayor fuente de contaminación por hidrocarburos en los puertos y vías fluviales, con 36 millones de galones por año, principalmente por eliminación inadecuada. La contaminación por aceite en los ríos proviene de los desagües y los drenajes de las calles urbanas. Un galón de aceite usado puede crear una mancha de ocho acres en el agua superficial, amenazando a los peces, las aves acuáticas y otras formas de vida acuática (Laz, 2017, p. 9).

Los aceites residuales de motores son materiales líquidos que producen altos niveles de contaminación, estos residuos en su gran mayoría contienen metales pesados tales como el cromo, arsénico, plomo y entre otros, también contiene hidrocarburos aromáticos como por ejemplo el benceno, solventes clorados, que resultan un medio contaminante para la salud humana resultando ser cancerígenos y dañinos para el medio ambiente.

Los aceites lubricantes usados son considerados como residuo peligroso, los mismo que en la actualidad no se le da una adecuada disposición, causando la contaminación del suelo, aire y agua. A nivel del mundo existe un aproximado de 100 millones de automóviles que con el pasar de los años esta cifra se incrementa notablemente. Con este incremento, el consumo de bases lubricantes genera preocupación debido al impacto ambiental que este lleva consigo (Ramírez y Rodríguez, 2019, p. 1).

Adicionalmente, se sabe que, si se realizan prácticas inadecuadas como mezclar el aceite usado con PCB's y plaguicidas, las consecuencias en la salud humana pueden ser muy graves lo cual depende de las características de las sustancias con las cuales se haya mezclado el aceite usado.

Principalmente existe 3 hábitats ambientales que se ven seriamente afectados por la contaminación de aceites lubricantes usados, estos son:

- **Aire.** – Al quemarse el aceite lubricante usado bajo condiciones no controladas, esta combustión puede emitir más plomo que cualquier otra industria, los componentes aromáticos presentes en el aceite usado se evaporan en forma de gases o partículas las mismas que se incorporan a la atmosfera, causando la contaminación de la misma.
- **Agua.** - Los vertimientos a cuerpos de agua forman una película sobre la superficie ocasionando daños a los organismos además de perjudicar la transferencia de oxígeno y producir efectos tóxicos sobre organismos, como algas y peces.

- **Suelo.** - El contacto con el suelo de componentes no biodegradables, presentes en aceites lubricantes usados destruye el humus vegetal, alterando la fertilidad de los suelos y generando alto riesgo de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (CONAMA, 2006).

1.2.12. Etapas de manejo de aceites lubricantes usados

Las etapas de manejo constan de 5 partes fundamentales, las mismas que en sus instalaciones deben cumplir con todas las normas ambientales, asegurando así que todos los procesos de las etapas se realicen de manera segura, estas etapas son recolección, almacenamiento, tratamiento, regeneración y la disposición final. Esto se lo realiza debido a que los aceites lubricantes usados son altamente contaminantes

Aunque también existe la posibilidad aprovechar o valorizar los aceites dependiendo de los resultados de análisis en la etapa de tratamiento. Las instalaciones pertinentes deben cumplir con las normas ambientales establecidas y todas las operaciones en las distintas etapas se deben realizar de forma segura. En caso de accidentes (goteo, derrame o incendio), seguir los procedimientos según normas establecidas o manual de prácticas (Ortiz y Piloto, 2019, p. 11).

Un dato importante es al momento de la recogida, donde se debe hacer una separación de los distintos tipos de aceites, para facilitar su posterior regeneración, uso y aprovechamiento, esto también permite eliminar los contaminantes presentes en los productos finales.

1.2.12.1. Recolección

Este paso hace referencia sobre el área donde se va recolectar el material desechado, el mismo que debe cumplir ciertas características como tener pisos impermeables para evitar la filtración hacia el suelo, tener una buena ventilación, debido a que el aceite usado contiene sustancia tóxicas y es necesario evitar la inhalación de las mismas, estas especificaciones aplican para distintas áreas de trabajo con este material de residuo.

Otro factor importante a tomar en cuenta en esta etapa es el sistema de drenajes, que debe ser seguro para evitar los derrames, tanto en la recepción del aceite usado como en el traslado hasta el lugar donde se va almacenar de manera temporal, en este caso es recomendable la utilización de absorbentes industriales (Ortiz y Piloto, 2019, p. 12).

Siempre y cuando se vaya manipular los aceites es recomendable realizar un chequeo rutinario para que no existan fugas en toda el área del trabajo, estas pueden ser tanques, recipientes, válvulas, tuberías y todo lo que esté relacionado con el aceite usado en general.

1.2.12.2. Almacenamiento

Esta área destinada al almacenamiento del aceite usado debe estar protegida, para dar paso a la operación de carga y descarga, esta zona debe ser resistente a la acción de los hidrocarburos, debido a la corrosión, también debe tener un sistema de filtración que elimine ciertas partículas sólidas del material líquido viscoso.

El almacenamiento se puede considerar en una bodega con volúmenes considerables, evitando ser mezclados con otro material similar, esta operación termina cuando se bombea el aceite al recipiente de un vehículo que lo transporte para su posterior tratamiento.

Existen prácticas de manejo que no deben ser puestas en marcha las mismas que son según (Minambiente, 2014, p. 34);

- Almacenar aceites usados en tanques de concreto, revestidos en concreto o de asbestocemento. Permitir ingreso de otros elementos o residuos al almacenamiento de aceite usado.
- Realizar cambio de aceites usados en vía pública.
- Mezclar aceites usados con: solventes, refrigerantes, aceites de freno, PCB's, halógenos o con cualquier tipo de residuo sólido, líquido o agua.
- Drenar aguas contaminadas con aceites usados a los desagües o cuerpos de agua sin el tratamiento requerido de acuerdo con la normativa ambiental vigente.

1.2.12.3. Transporte

El transporte del aceite lubricante usado es considerado el de mayor riesgo, ya que es donde el derrame del material es el factor principal a tomar en cuenta, porque si existe una pérdida de material en esta etapa se estaría generando una contaminación, así también se estaría poniendo en riesgo al personal encargado de esta operación o también se puede dar un contacto con terceros ya sea por derrame o fuga del material residual.

Los recipientes o tanques donde se transporta el residuo deben tener información sobre el producto que lleva, también se debe verificar que contenga un tapón que cierre de manera hermética antes de cualquier movimiento, esto debido a cuestiones de seguridad. De ser posibles los vehículos para el transporte deben ser destinados a ello exclusivamente (Ortiz y Piloto, 2019, p. 13).

1.2.12.4. Tratamientos

En esta etapa el encargado de la operación debe tener las instalaciones con un área específica de almacenamiento con todas las condiciones y elementos necesario para recibir, almacenar y realizar el debido tratamiento de aceites lubricantes usados. Antes de destinar a cualquier

tratamiento es recomendable realizar algunos análisis como densidad, contenido de agua y sedimentos, metales, azufre y cloro. Cuando el transportista entrega a la empresa el aceite usado para su posterior tratamiento, el aceite recibe un almacenaje previo a la espera de los resultados de los análisis a realizar (Ortiz y Piloto, 2019, p. 14).

Por sus propiedades lubricantes y su alto contenido energético, el aceite lubricante usado constituye un valioso recurso que no puede desaprovecharse y que, de hecho, se utiliza en todo el mundo, ya sea como combustible industrial o como insumo para la industria, por lo que se le debe tratar para retirar contaminantes, agua, lodos y otras impurezas, antes de su utilización

El aceite lubricante usado gracias a sus propiedades y valor energético, es considerado como un valioso recurso que desecharlo sería un desperdicio, ya que a nivel mundial se usa mucho este recurso, tanto como combustible industrial y como insumo de industrias, por lo que se debe purificar este aceite usado eliminando los contaminantes e impurezas.

1.2.12.5. Disposición final

En esta última etapa se trata del proceso de aislar y confinar el aceite usado, de manera especial los que no son aprovechables como fuente de energía, esto se lo realiza en sitios establecidos con un diseño especial y apto para evitar la contaminación hacia la salud humana y al medio ambiente.

1.2.13. Aprovechamiento energético

El aceite lubricante usado en vista que tiene buenas propiedades que direccionan al aprovechamiento energético se han identificado 4 opciones de aprovechamiento energético, los mismos que son:

1.2.13.1. Reutilización

La reutilización del aceite es una de las opciones que se le puede atribuir al aceite usado, siempre y cuando la calidad del aceite sea el adecuado para su posterior uso; o a su vez luego de un tratamiento que permita la eliminación de contaminantes insolubles o productos de oxidación del aceite al entrar en contacto con el oxígeno (Ortiz y Piloto, 2019, p. 16).

En este proceso de aprovechamiento energético se debe tomar en cuenta que existe una litación para el uso, debido a que en su reutilización necesario asegurar que los productos tóxicos presentes sean eliminados, ya que como fuente de energía lo más probable es la utilización mediante una combustión lo que provoca una contaminación del aire con los gases emitidos en este proceso.

1.2.13.2. Re-refinación

“Mediante distintos tratamientos es posible la recuperación material de las bases lubricantes presentes en el aceite original de manera que resulten aptas para su reformulación y utilización.”(González, 2014, p. 19).por lo general todos los aceites son regenerables, sin embargo la dificultad y el costo económico que conlleva el proceso lo limita, de tal manera que resulta un camino imposible de llevar a cabo.

1.2.13.3. Valoración energética

Al mezclar el aceite usado con fuel oil por el proceso de la combustión, se puede usar como fuente de energía, ya que el aceite contiene un poder calorífico muy bueno, lo que posibilita su uso en calderas cementeras. Debido a que alcanzan temperaturas iguales o superiores a 1500 °C y a las propiedades de absorción del cemento, cal y arcilla, los hornos ideales son los de las cementeras en vista de que los hidrocarburos peligrosos se destruyen y los metales pesados, azufre y cloruros son absorbidos (González, 2014, p. 19).

Con los contaminantes emitidos hacia la atmosfera se minimizan con los sofisticados sistemas de purificación de gases, lo que resulta factible su utilización siempre y cuando se realice el control en las emisiones de los contaminantes.

1.2.13.4. Incineración

Una de las utilidades que se le puede asignar al aceite usado es como un reemplazo del combustible tradicional en las calderas y hornos industriales, sin embargo, en estos incineradores los residuos peligrosos presentes en el aceite como son los metales pesados, PCB's (policlorobifenilos o bifenilos policlorados), son los que impiden su utilización, ya que provocan altos niveles de contaminación.

Existen ciertas normas que se establecen para la reutilización del aceite usado entre las más importantes se destaca que si el contenido de PCB's y PCT's (Trifenilos policlorados) tienen una concentración menor a 50 ppm, el aceite es autorizado legalmente para su regeneración o utilización como combustibles (Ortiz y Piloto, 2019, p. 17).

1.2.14. Reutilización como portador energético

La energía que aporta el aceite usado se puede utilizar como combustible siempre y cuando sus contaminantes sean eliminados mediante procesos fisicoquímicos de tratamientos realizados al

residuo para su posterior uso, de esta forma evitar la emisión de gases tóxicos, que perjudican no solo el ambiente sino también a los equipos que se utilizan con este combustible.

El aceite usado puede ser usado como combustible alternativo en procesos industriales, previo a un tratamiento adecuado del aceite usado, de esta manera se puede sustituir a los comúnmente conocidos combustibles fósiles, las utilidades que se pueden dar es en centrales térmicas de cogeneración eléctrica, en cementeras, papeleras, hornos, equipos marinos o en otros procesos industriales (Minambiente, 2014, p. 61-62).

1.2.15. Potencial para uso en motores de combustión interna (MCI)

El aceite lubricante usado gracias a sus propiedades como poder calorífico alto quizá el método más eficiente desde el punto de vista de aprovechar el poder energético es el uso como combustible de motor, no obstante esta utilidad representa la destrucción total de la materia orgánica presente en el aceite usado, finalizando su vida útil tanto como aceite lubricante y como fuente de energía (Fuentes et al., 2007, p. 216).

Este proceso de utilización en motores de combustión interna conlleva algunos métodos de tratamientos entre los que se puede mencionar es mediante la adición de aditivos, como es el caso de un ácido acético.

Pero existe un proceso que es factible llevar acabo para obtener un mejor combustible para motores de combustión, este proceso es la pirolisis. La pirolisis se puede llevar a cabo en un reactor con una presión inerte, en el cual se somete a calentamiento por 35 min, con un producto pirolizado de 90 mL, donde se condensa el aceite, que da paso a residuos sólidos y gases condensables y no condensables. Los gases condensados tienen fracción ligera y pesada, los mismo que se separan por destilación debido a que la fracción ligera no se puede usar en MCI según (Demirbas et al., 2015, p. 129-138).

1.2.16. Pirolisis

La pirolisis es un proceso en el cual se da lugar a la degradación de una sustancia en ausencia de oxígeno es decir con atmosfera inerte, dichas sustancia se descomponen por acción de calor, tomando en cuenta que no se dé la reacción de combustión de los componentes. Las temperaturas de trabajo son entre 300°C a 800°C, para dar lugar a 3 tipos de productos que son parte gaseosa, líquida y sólida. Todos estos productos pueden ser aprovechados como combustibles alternativos en diferentes áreas industriales tales como plantas cementeras y en la producción de energía eléctrica.

Este proceso consiste en la descomposición del carbón en atmosfera exenta de oxígeno, siendo así la consecuencia de la destrucción del carbón de los cuales se obtiene gases combustibles, se

considera que la pirolisis es una técnica muy antigua, data del siglo XVIII, donde se permitía ya la separación de los fueles hidrocarbonados (Jesús, 2017, p. 1).

La pirolisis involucra tanto cambios físicos como cambios químicos, que permiten la transformación de la materia para dar paso a la obtención de compuestos útiles tales como; gases, combustibles, aceites, ceniza y carbón. La termólisis o también conocida como pirolisis se considera un tipo de reciclaje químico, que consiste en la obtención de monómeros mediante la ruptura de las cadenas de un polímero que contiene cadenas largas.

La pirolisis se considera como un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en combustible útiles, con un alto rendimiento, mediante calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno. Por su capacidad de tratamiento, es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables que sean aprovechadas de manera útil (Sullivan y Ball, 2012, p. 133-147).

Si el propósito fuera maximizar el rendimiento de los productos destilados que resultan de la pirolisis del petróleo crudo, se requeriría un proceso de baja temperatura, alta velocidad de calentamiento y corto tiempo de residencia del gas. Para una alta producción de petróleo pesado, se elegiría un proceso de baja temperatura y baja velocidad de calentamiento (Demirbas et al., 2015, p. 130).

1.2.17. Tipos de pirolisis

La pirolisis es la descomposición térmica de la materia orgánica que ocurre en ausencia de oxígeno o cuando hay una cantidad significativamente menor de oxígeno que el requerido para una combustión completa. Este proceso de craqueo se emplea a menudo en operaciones de refinería de petróleo para producir combustibles de hidrocarburos de menor peso molecular a partir de materias primas residuales. Estos incluyen gasolina de aceites más pesados, residuos de destilación y desechos plásticos (Demirbas et al., 2015, p. 130).

Existen dos tipos de pirolisis según su naturaleza de accionar cuando se da el proceso, estos son la pirolisis térmica y la pirolisis catalítica.

1.2.18. Pirolisis térmica

Este proceso de transformación de sustancias es conocido también como cracking térmico, como su nombre lo dice este tipo de pirolisis conlleva solo la utilización de un único recurso que es la temperatura para dar paso al rompimiento de cadenas de hidrocarburos de peso molecular alto y originar hidrocarburos de peso molecular bajo con cadenas cortas en relación a las cadenas del compuesto original.

La principal ventaja de la pirólisis es que permite tratar residuos difíciles de reciclar. Los desechos se agrietan térmicamente y se descomponen en una atmósfera inerte; las fracciones líquidas y gaseosas resultantes se pueden usar como combustible o materia prima y el carbón producido se usará como sustituto del carbón activado (Zouad et al., 2019, p. 1).

Los distintos tipos de proceso de pirolisis se clasifican tomando en cuenta la temperatura de trabajo, velocidad de calentamiento y tiempo de retención del material, y por tanto, estos se clasifican en pirólisis flash, rápida y convencional.

1.2.18.1. Pirolisis flash o ultrarrápida

En este proceso se consideran temperaturas por encima de los 1000 °C, por lo que los tiempos de residencia deben ser aún más cortos, debido a que es difícil y un tanto peligroso controlar temperaturas elevadas con productos orientados a combustibles. Este proceso ocurre de manera instantánea por consiguiente el suministro de calor debe ser lo más rápido posible para garantizar que el proceso no se oriente a una pirólisis rápida.

Según (Baray-Guerrero et al., 2019, p. 4-5) menciona; “En este caso, el mayor rendimiento corresponde a los gases. La pirolisis, es, por tanto, un proceso flexible, que permite, mediante el uso de la tecnología adecuada, favorecer la producción de gases, líquidos o aceites y sólidos.”

La pirólisis instantánea describe la temperatura rápida y moderada (450–650°C) pirólisis que produce líquidos. El petróleo crudo se calienta a velocidades de 100 a 10.000°C / seg y el tiempo de residencia del vapor es normalmente < a 2 segundos. Todo esto se logra con equipos muy avanzados donde el control de temperatura y la adición de calor sean lo más preciso posible, de lo contrario el proceso no daría buenos resultados, siendo esta una limitación al aplicar este tipo de pirolisis (Demirbas et al., 2015, p. 130).

1.2.18.2. Pirolisis rápida

Este proceso se caracteriza por tener velocidades de calentamiento altas, es decir que el material que sometido al proceso de pirolisis se calienta rápidamente en una atmósfera inerte con temperaturas superiores a los 650 °C, junto a un enfriamiento rápido provoca que la condensación de la fracción líquida se lleve a cabo sin el proceso de craqueo de compuestos con alto peso molecular, los mismos que pasan a los gases no condensables.

Su utilización se basa en la producción de bioaceites debido a que los rendimientos de los productos en peso de esta fracción son muy superiores a los que se obtienen en la pirólisis convencional. A escala comercial solamente se ha logrado con reactores de lecho fluido y se han instalado plantas piloto en varios lugares dentro de la Unión Europea (Baray-Guerrero et al., 2019, p. 4).

La pirólisis rápida (más exactamente definida como termólisis) es un proceso en el que un material se calienta rápidamente a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. El calentamiento rápido y el enfriamiento rápido produjeron los productos líquidos de pirólisis intermedios, que se condensan antes de que las reacciones posteriores descompongan las especies de mayor peso molecular en productos gaseosos. Las altas velocidades de reacción minimizan la formación de aceite pesado (Demirbas et al., 2015, p. 130).

1.2.18.3. Pirolisis convencional o lenta

La pirolisis convencional se da con una velocidad de calentamiento lenta, mediante la transferencia de calor hacia el material paralizado de manera controlada y convencional como su nombre lo indica, el rango de temperaturas de trabajo está entre los 500-600 °C. Bajo estas condiciones, el producto obtenido varía entre sólido, líquido y gases, que tienen proporciones significativas en relación al material alimentado.

La pirolisis lenta utiliza velocidades de calentamiento bajas (0,1-1k/s), con tiempo de residencia de los volátiles que varía entre los 5 y 60 minutos, sin embargo los componentes en la fase de vapor tienden a continuar la reacción uno con otro al tiempo que se está formando el producto sólido y el líquido (Baray-Guerrero et al., 2019, p. 4).

1.2.19. Pirolisis catalítica

También conocida como cracking catalítico, que consiste en la descomposición térmica de sustancia con la única diferencia de la pirolisis térmica es que en la catalítica se hace uso de un catalizador, comúnmente estos catalizadores son de zeolitas con altos contenidos de óxido de silicio y óxido de aluminio.

Al hacer uso de los catalizadores se evita la utilización de temperaturas elevadas de trabajo, como en la pirólisis térmica en forma de calor, el catalizador es de tipo arcilloso (que tiene una alta superficie de intercambio iónico que favorece la reacción de pirólisis), para la obtención de fracciones ligeras de combustibles con mayor rendimiento (Ipiates, 2018, p. 24).

Los catalizadores adecuados tienen la capacidad de controlar el rendimiento del producto final así como la distribución de productos de la degradación de un polímero, de tal manera que se reduzca la temperatura de reacción de manera significativa, que a su vez direcciona a un proceso bajo en recursos económicos con una obtención de productos más valiosos (Lin y Yang, 2007, p. 145).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Objetivos

2.1.1. *General*

- Obtener un combustible alternativo mediante la pirolisis de aceites residuales lubricantes de motor.

2.1.2. *Específicos*

- Realizar un pretratamiento físico a las muestras de aceites residuales obtenidas para eliminar las impurezas existentes previo al proceso de pirolisis.
- Determinar las características fisicoquímicas de los aceites residuales por medio de normas establecidos para este tipo de residuos líquidos.
- Efectuar la pirolisis de los aceites residuales en un reactor Batch a diferentes condiciones de temperatura y tiempo de residencia para obtener varios productos resultados de la descomposición térmica de los aceites.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de los productos obtenidos en el proceso de la pirolisis.

2.2. Hipótesis y especificación de variables

2.2.1. *Hipótesis general*

El combustible alternativo obtenido a partir del aceite residual puede ser utilizado como fuente de energía calorífica con un mezclado adecuado con los combustibles tradicionales para su uso convencional o de manera independiente sin mezcla alguna.

2.2.2. *Hipótesis específica*

- Con el pretratamiento físico del aceite residual, se va a reducir los contaminantes ajenos al aceite que se encuentran presentes en la muestra para determinar su uso óptimo en el proceso de la pirolisis térmica.

- Mediante la pirolisis de los aceites residuales a nivel del laboratorio en un reactor Batch, se obtendrá varios productos que son el resultado de la descomposición del aceite a diferentes temperaturas y así determinar la temperatura óptima para llegar al producto deseado.
- Mediante la determinación de las propiedades fisicoquímicas de los productos de la pirolisis se validará si el combustible obtenido es adecuado para utilizar en combinación con otros combustibles tradicionales o a su vez se puede utilizar de forma individual aprovechando su poder energético en motores de combustión interna.

2.2.3. Identificación de variables

2.2.3.1. Variables independientes

- Cantidad de muestra
- Tamaño de filtro
- Temperatura de pirolisis
- Tiempo de residencia
- Temperatura de condensación
- Densidad
- Viscosidad
- Presión
- Volumen

2.2.3.2. Variables dependientes

- % Rendimiento de la fracción residuo
- % Rendimiento de la fracción líquida
- Rendimiento fracción gaseosa
- Velocidad de calentamiento

2.2.4. Operacionalización de variables

Tabla 1-2: Operacionalización de variables

Variable	Tipo de variable	Definición operacional	Categorización	Indicadores	Instrumento de medición	Valor
cantidad de muestra	independiente unidimensional, continua	Es una porción significativa del material a utilizar, representa la magnitud de una propiedad medible	-	peso	balanza digital	-
Densidad	independiente unidimensional, continua	Es una magnitud física que se refiere a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia o un objeto sólido	-	masa/volumen	densímetro	-
Viscosidad	independiente unidimensional, continua	Una propiedad física muy importante que caracteriza la resistencia para ciertos líquidos	-	stocks	viscosímetro	-
Temperatura	independiente unidimensional, continua	Se define como la magnitud física que mide la cantidad de calor o energía térmica de un sistema	temperatura de pirolisis	calor	equipo de pirolisis	350-450 °C
			temperatura de condensación	calor	equipo de condensación	10 °C

velocidad de calentamiento	dependiente multidimensional, continua	Se define como la cantidad de calor en que puede incrementarse un sistema a tiempo determinado	-	calor tiempo	equipo de pirolisis	16°C/min
Presión	dependiente unidimensional, continua	Es la magnitud física encargada de medir la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie,	-	presión	equipo de pirolisis	0MPa
Volumen	independiente unidimensional, continua	Es una magnitud escalar que determina el espacio que ocupa un cuerpo.	-	volumen	probeta	-
rendimiento	dependiente unidimensional, continua	Se define como la cantidad de producto obtenido en una reacción química y su cálculo es la relación entre el producto obtenido y la muestra de ingreso, multiplicado por 100.	rendimiento fracción sólida	%	balanza analítica	15-20%
			rendimiento fracción líquida			75-80%
			rendimiento fracción gaseosa		-	2-5%

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

2.2.5. Matriz de consistencia

Tabla 2-2: Matriz de consistencia

Aspectos Generales				
Problema General		Objetivo General		Hipótesis General
Debido al aumento de la contaminación por residuos de aceites de motores, se ha visto la necesidad de dar un tratamiento y aprovechar sus propiedades como materia prima para la producción de combustibles alternativos.		Obtener un combustible alternativo mediante la pirolisis de aceites residuales lubricantes de motor.		El combustible alternativo obtenido a partir del aceite residual puede ser utilizado como fuente de energía calorífica con un mezclado adecuado con los combustibles tradicionales para su uso convencional.
Aspectos Específicos				
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables de las Hipótesis Específicas	Técnicas de recolección de datos
La muestra de aceite debe cumplir con ciertas características que permiten dar paso a la etapa de la pirolisis	<ul style="list-style-type: none"> Realizar un pretratamiento físico a las muestras de aceites residuales obtenidas para eliminar las impurezas existentes previo al proceso de pirolisis. Determinar las características físicas de los aceites residuales por medio de normas establecidos para este tipo de residuos líquidos. 	<ul style="list-style-type: none"> El pretratamiento físico del aceite residual, dependiendo la operación unitaria a realizar se puede tener una variación en el volumen de la muestra. También verificar si cumple con las normas establecidas de los aceites residuales y así verificar que sus propiedades físicas. 	<ul style="list-style-type: none"> Cantidad de muestra Tiempo Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> Revisión bibliográfica Densidad Viscosidad

<p>El tiempo que se demora en realizar la pirolisis, es un tanto elevado debido a que se logra tener resultados de la pirolisis de 4 a 6 horas en el reactor.</p>	<p>Efectuar la pirolisis de los aceites residuales en un reactor Batch a diferentes condiciones de temperaturas para obtener varios productos de la descomposición de los aceites.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mediante la pirolisis de los aceites residuales a nivel del laboratorio en un reactor Batch, se obtendrá varios productos que son el resultado de la descomposición del aceite a diferentes temperaturas y así determinar la temperatura óptima para llegar al producto deseado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de muestra • Temperatura • Presión • Tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión bibliográfica
<p>Se desconoce la composición química y propiedades fisicoquímicas del combustible obtenido con el proceso de la pirolisis</p>	<p>Determinar las propiedades fisicoquímicas de los productos obtenidos en el proceso de la pirolisis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mediante la determinación de las propiedades fisicoquímicas de los productos de la pirolisis se validará si el combustible obtenido es óptimo para usar mediante una óptima combinación con los combustibles tradicionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo • Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Cromatografía de gases • Viscosidad • Densidad • Revisión bibliográfica • Destilación

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

2.3. Tipo y diseño de la investigación

2.3.1. Tipo de investigación

El diseño de esta investigación es experimental ya que se van a manipular las variables y unidades de análisis, las variables independientes serán sometidas a manipulación experimentando los efectos en las variables dependientes, porque de estas depende el éxito del experimento y midiendo siempre las variaciones con precisión, probando el proceso en diferentes condiciones obteniendo resultados que presenten cierta variabilidad.

2.3.2. Diseño de la investigación

Para llegar a cumplir con el objetivo general planteado en este trabajo, el diseño experimental se basa, de manera general, en tres etapas que abarcan cada uno de los procedimientos realizados desde la recepción del aceite usado hasta la caracterización del combustible obtenido.

2.3.2.1. La Primera etapa

En esta primera etapa se realizó la caracterización de la materia prima a utilizar, con la idea de determinar las características iniciales del aceite usado. También se efectuó pruebas de densidad, viscosidad y espectroscopia FT-IR determinando los grupos funcionales de la materia inicial.

2.3.2.2. Segunda etapa

Se llevó a cabo de manera esencial, en la pirólisis térmica del aceite lubricante usado, mediante la realización de ensayos a diferentes temperaturas y tiempos de residencia, para la determinación de su rendimiento, también se aplicó un análisis sensorial para establecer las características organolépticas de cada una de las fracciones: sólida, líquida y gaseosa.

2.3.2.3. Tercera etapa

Finalmente se realizó la caracterización fisicoquímica del combustible obtenido para conocer sus propiedades, con la aplicación espectroscopia FT-IR, pruebas para análisis de combustible y cromatografía de gases.

2.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis para la presente investigación es: el aceite residual, el cual será sometido a métodos de ensayo para su caracterización física para su posterior proceso de pirolisis, así como los ensayos de caracterización del producto final (combustible alternativo).

2.5. Población de estudio

La población de estudio de esta investigación corresponderá a los principales productores de aceites residuales en la ciudad de Riobamba provincia de Chimborazo, en especial a las lavadoras y lubricadoras de vehículos.

2.6. Tamaño de la muestra

Para la determinación del tamaño de muestra en la caracterización del aceite que se tomará en cuenta el método de ensayo; para el proceso de pirolisis se tomará en una muestra aproximadamente entre 1-2kg de aceite residual, en cuanto a los análisis de caracterización fisicoquímico se dispondrá la cantidad establecida por las normas con las cuales se va trabajar.

2.7. Selección de la muestra

- Realizar una visita in situ a las lavadoras y lubricadoras de la ciudad de Riobamba.
- Verificar la calidad del aceite residual mediante una observación directa de la muestra tomada en el lugar.
- Realizar un pretratamiento físico al aceite residual.
- Caracterizar la muestra de aceite mediante los ensayos mencionados anteriormente.

2.8. Técnicas de recolección de datos

Para llevar a cabo la parte experimental de la investigación, las técnicas y procedimientos realizados durante la primera, segunda etapa y tercera etapa, es decir, la caracterización, pirólisis térmica del aceite usado, y parte de la caracterización fisicoquímica del producto de pirolisis tuvieron lugar en los laboratorios de:

- Química Instrumental
- Ingeniería Química del Petróleo
- Operaciones Unitarias

Pertencientes a la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) ubicada en la Panamericana Sur km 1½, de la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo.

Para parte de la tercera etapa, o determinación de poder calórico, contenido de azufre y cromatografía de gases, se efectuó a través de análisis de laboratorio adquirido en:

- Laboratorio de petróleos, energía y contaminación ubicado en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, Enrique Ritter s/n y Bolivia MC2201-P01-7. Quito.

Se debe tomar en cuenta que la recolección de datos fue verificada y complementada con la revisión bibliográfica de libros, artículos científicos, proyectos de postgrado, papers, entre otros.

2.8.1. Análisis para la caracterización del aceite residual

2.8.1.1. Filtración de aceite lubricante residual

Para la eliminación de materiales no deseados (trozos de metales, tierra, lodo, etc.) se realiza la filtración de la muestra de aceite lubricante residual. Para lo cual se toma en cuenta la bibliografía de (Demirbas et al., 2015, p. 131).

Materiales

- Vaso de precipitación
- Embudo de vidrio
- Papel filtro

Procedimiento

- Dejar en reposo la muestra de aceite durante 6 horas con el fin de que el aceite se seque al aire y también para que las partículas sólidas e insolubles lleguen a precipitarse hacia el fondo.
- Filtrar la muestra de aceite precipitado anteriormente, con el fin de separar la parte líquida de las partículas metálicas y otros materiales.
- Se purificó del aceite de polvo pequeño, hollín de carbón, partículas metálicas pequeñas y algunos materiales tipo goma.

2.8.1.2. Determinación de la densidad según la norma NTE INEN 2903

Esta norma describe el método de ensayo para la determinación, de la densidad, densidad relativa o gravedad API a 15,6 °C para petróleo, productos derivados de petróleo o mezclas de petróleo y productos no derivados de petróleo manejados normalmente como líquidos con una presión de vapor Reid de 101,325 KPa o menor, utilizando un hidrómetro (NTE INEN 2903, 2015, p. 1-14).

Materiales

- Probeta
- Varilla de agitación
- Termómetro

Equipos

- Hidrómetro

Procedimiento

- Llevar la probeta y el termómetro dentro de 5 °C aproximadamente de la temperatura de ensayo.
- Transferir la muestra a la probeta limpia sin salpicar, para evitar la formación de burbujas de aire y minimizar la evaporación de los componentes más volátiles.
- Colocar la probeta que contiene la muestra en una posición vertical en un lugar libre de corrientes de aire, donde la temperatura ambiente no cambie más de 2 °C durante el tiempo de ensayo. Cuando la temperatura de la muestra difiere más de 2 °C de la temperatura ambiente.
- Introducir el termómetro y mezclar la porción de muestra con una varilla de agitación, realizando movimientos verticales y giratorios para asegurar la uniformidad de la temperatura y densidad en la probeta.
- Registrar la temperatura de la muestra lo más cercana a 0,1 °C, retirar el termómetro y la varilla de agitación de la probeta.
- Introducir el hidrómetro lentamente en el interior de la probeta que contiene la muestra y soltarlo hasta que flote libremente. Evitar que el vástago se humedezca sobre el nivel en el cual está flotando.
- Para líquidos viscosos opacos, dejar que el hidrómetro se deposite lentamente en el líquido
- Cuando el hidrómetro ha llegado a la posición de reposo flotando libremente sin tener contacto con las paredes de la probeta, leer el hidrómetro lo más cercano a la división más próxima marcada en la escala, dependiendo de la apreciación del hidrómetro.
- Para líquidos opacos registrar la lectura del hidrómetro como el punto en la escala del mismo, en la cual se levanta la muestra por encima de su superficie, observando ligeramente por encima del plano de la superficie del líquido.

2.8.1.3. Determinación de la viscosidad cinemática según la norma ASTM D-445

Este método de prueba especifica un procedimiento para la determinación de la viscosidad cinemática, n , del petróleo líquido. Productos, tanto transparentes como opacos, midiendo el tiempo para que un volumen de líquido fluya por gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio calibrado (ASTM D 445, 2004, p. 1-10).

Materiales

- Vaso de precipitación
- Soporte universal
- Termómetro
- Franela
- Malla de asbesto
- Pinza para bureta
- Reverbero

Reactivos

- Agua destilada
- Thinner

Equipos

- Viscosímetro de tubo capilar de vidrio

Procedimiento

- Ajustar y mantener el baño del viscosímetro en el nivel requerido
- Seleccione un viscosímetro limpio, seco y calibrado que tenga un rango que cubre la viscosidad cinemática estimado.
- Calentar el baño para alcanzar la temperatura de la prueba
- Cuando la temperatura de prueba esté por debajo del punto de rocío, llene el viscosímetro de la manera normal.
- Coloque tapones de goma en los tubos para sujetar la porción de prueba en su lugar se inserte el viscosímetro en el baño.
- Después de la inserción, deje que el viscosímetro alcance la temperatura deseada.
- Luego se procede a quitar los tapone y a realizar las determinaciones de viscosidad de manera manual, mediante la toma del tiempo de recorrido del líquido.

2.8.1.4. Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR

Materiales

- Espátula
- Algodón

Reactivos

- Alcohol
- Muestra de aceite usado

Equipos

- Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR, modelo JASCO FT/IR-4100

Procedimiento

- Encender el equipo presionando el switch Power
- Para iniciar el barrido, ejecutar el software Spectra Manager en el ordenador conectado al equipo.
- Limpiar con algodón y alcohol el área de muestra (Cristal de seleniuro de zinc, soporte y capuchón de tornillo) ubicada en la parte interior central del equipo.
- Realizar el Background al verificar la ausencia de sustancia en el área de muestra, cerrar la tapa del equipo y presionar el botón Start ubicado en la parte frontal.
- Realizar el barrido espectral colocando la muestra sobre el cristal del área de muestra, quitar el seguro ubicado en la parte posterior, halar hacia adelante el tornillo de ajuste, ajustarlo hasta que muestre fricción, cerrar la tapa y pulsar Start.
- Procesar el espectro utilizando el programa Spectra Analysis, corregir las escalas seleccionando y eliminar el CO₂
- Identificar y etiquetar los picos más relevantes asignando límites de lectura.
- Guardar el espectro como un archivo del mismo programa o en un procesador de texto Word.
- Finalmente limpiar con alcohol la zona de muestra, cerrar todos los programas, apagar el equipo de ambos switch, apagar el ordenador y desconectar los equipos.

2.8.2. Pirólisis térmica del aceite lubricante usado

Una vez finalizado el pretratamiento físico y la caracterización fisicoquímica de la materia prima, la etapa siguiente es la pirólisis térmica. Se realizó 4 ensayos a dos temperaturas diferentes y a dos tiempos de residencia diferentes

Materiales

- Mangueras
- Recipientes ámbar oscuros
- Alicates

Reactivos

- Aceite lubricante usado
- Nitrógeno gaseoso
- Thinner

Equipos



Figura 1-2: Balanza digital

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Especificaciones

Modelo: CAMRY EK5450

Capacidad: 5kg/11lbs.

División: 1g/0.1onz.

Función de Tara



Figura 2-2: Sistema de enfriamiento

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Especificaciones

Tipo de flujo: flujo en contracorriente

Fuente: 110V

Capacidad: 80L

Tipo de Refrigerante: 404a

Caudal máximo: 0,60 L/h



Figura 3-2: Reactor Batch

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Especificaciones

Tipo: Batch

Fuente de conexión: 220V

Válvulas: 5

Temperatura máxima de operación: 650°C

Presión máxima: 0,9 MPa



Figura 4-2: Bomba de vacío

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Especificaciones

Tipo: Vacío

Fuente de conexión: 220V

Potencia: 1HP

Procedimiento

Para cada ensayo realizado se siguió el mismo procedimiento a detallar a continuación, con la diferencia que varían las temperaturas y tiempo de residencia.

- **Pesaje de la muestra**

Pesar 800g de aceite lubricante usado y colocar dentro del cilindro del reactor asegurándose de que esté tapada herméticamente.



Figura 5-2: Cilindro del reactor

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

- **Purificación del reactor mediante nitrógeno**

Una vez colocada la muestra dentro del reactor, se tapa verificando que no haya fugas tanto en el empaque de la tapa como en las válvulas del reactor. Para lo cual se inyecta nitrógeno gaseoso el cual incrementa la presión en el interior, es recomendado inyectar el nitrógeno hasta que la presión en el interior alcance los 0,4 MPa. Dejar en reposo por 5 min y verificar que la presión no disminuya caso contrario existirá fugas por alguna válvula o pared del reactor.



Figura 6-2: Nitrógeno gaseoso

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Formación de atmosfera inerte

Una vez verificado que no hay fugas se abre la válvula entre el sistema del condensador y el reactor para absorber el aire y el nitrógeno presente en el interior del reactor con la bomba de vacío, de esta manera generando el vacío para la pirolisis.



Figura 7-2: Atmosfera Inerte

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

- **Pirolisis térmica**

Encender el reactor mediante el panel de control automático, setear la temperatura deseada por seguridad se va seteando cada 50°C, mover la perilla de adición de calor y mandar a correr el panel de control automático. Cabe recalcar que se toma los datos de temperatura en función del tiempo.

Una situación importante es que el reactor no puede alcanzar la temperatura deseada de manera directa ya que en el proceso las temperaturas se disparan razón por la cual se debe manipular constantemente el flujo de calor hacia reactor, por lo que se va estabilizando conforme incrementa la temperatura hasta llegar al valor deseado de temperatura.

Otro aspecto a tomar en cuenta es que de temperaturas superiores a 300°C empiezan a generarse vapores por ende la presión aumenta, para liberar esta presión se abre la válvula que conecta al condensador con el reactor y se succiona mediante la bomba de vacío generando así la atmosfera inerte que da paso a la pirolisis. Esta succión se lo realiza cuando la presión en el manómetro supera los 0,2 MPa.

En cada succión se libera vapor que lleva fracción gaseosa que al pasar al condensador los gases condensables pasan a fase líquida obteniéndose el combustible, en cambio los gases no condensables se eliminan por acción de la bomba de vacío. Este estado se repite varias veces hasta haber degradado el aceite en su totalidad.



Figura 8-2: Control automático del reactor

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

- **Pesaje de productos finales**

Finalmente, haciendo uso de la balanza analítica se procede a pesar la fracción líquida obtenida en el proceso. Una vez termina la pirolisis por la parte inferior de reactor se abre la válvula y se retira el residuo acumulado. Terminado todo el proceso se espera que se enfríe el reactor y se procede a limpiar todos los materiales y equipos con la ayuda de una franela impregnada con Thinner.



Figura 9-2: Peso de producto

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

2.8.2.1. Análisis sensorial

El análisis sensorial, se aplica para determinar las características organolépticas de los productos de la fracción líquida, esta prueba llevó a cabo a través de los sentidos como vista, olfato y tacto que permiten apreciar el líquido a caracterizar.

2.8.2.2. Rendimiento de productos finales

El rendimiento de la fracción líquida y sólida se determinó a través de la ecuación de porcentaje de rendimiento mediante los pesos calculados de manera experimental.

$$R_L = \frac{P_L}{P_{MP}} * 100$$
$$R_S = \frac{P_S}{P_{MP}} * 100$$

Donde:

R_L : Rendimiento de la fracción líquida (%)

R_S : Rendimiento de la fracción sólida o residuo (%)

P_L : Peso de la fracción líquida (g)

P_S : Peso de la fracción sólida (g)

P_{MP} : Peso de la materia prima-aceite lubricante usado (g)

Cabe recalcar que para la fracción gaseosa no condensable, el rendimiento se calculó por diferencia de los calculados con la ecuación anterior; esta ecuación para la fase de gas es la siguiente:

$$R_G = 100 - (R_L + R_S)$$

Donde:

R_G : Rendimiento de la fracción gaseosa (%)

R_L : Rendimiento de la fracción líquida (%)

R_S : Rendimiento de la fracción sólida o residuo (%)

2.8.2.3. Perfil de temperaturas

Este parámetro se estableció para determinar el comportamiento que adquiere la temperatura de pirolisis al adicionar calor mediante la resistencia, esto se lo realizó mediante la toma de datos de manera periódica, estos datos son la temperatura en un intervalo de 5 minutos durante todos los ensayos presentados. Con estos datos se calcula el promedio de la temperatura en cada ensayo, para finalmente realizar la curva de temperatura en función del tiempo, que indica la variación de este parámetro.

2.8.2.4. *Velocidad de calentamiento*

En la velocidad de calentamiento se tomó en cuenta a dos variables: la temperatura y el tiempo. Para este caso, también se hizo uso de las mediciones de la temperatura efectuadas cada 5 min s durante todos los ensayos. Su cálculo se llevó a cabo mediante la ecuación:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_f - T_I}{t_f - t_i}$$

Donde:

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$: Velocidad de calentamiento (°C/min)

$T_f; T_I$: Temperatura final e inicial (°C)

$t_f; t_i$: Tiempo final e inicial (min)

2.8.3. *Análisis fisicoquímico de la fracción líquida*

2.8.3.1. *Determinación de Espectroscopia Infrarroja FT-IR*

Con la finalidad de determinar la composición estructural y grupos funcionales de los productos obtenidos en la pirolisis, se lleva a cabo la determinación espectroscópica FT-IR, este análisis se basa la vibración de onda que produce los diferentes grupos funcionales.

Materiales

- Espátula
- Algodón

Reactivos

- Alcohol
- Muestra de aceite usado

Equipos

- Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR, modelo JASCO FT/IR-4100

Procedimiento

El procedimiento a seguir es mismo que se detalla en el apartado 3.7.1.4, donde se aplica las muestras a analizar en forma de gotas sobre el cristal de muestra del equipo.

2.8.4. Pruebas para combustible

2.8.4.1. Poder calorífico

El poder calorífico se lo puede definir como la cantidad de energía liberada en forma de calor tomado en cuenta un kilogramo, o un metro cubico de combustible, cuando entra en combustión completa en un ambiente a presión constante de 101 KPa y 25°C, en condiciones normales. De otra manera el poder calorífico es el valor absoluto de la entalpia (Arroyo, 2016, p. 9).

El combustible siendo una sustancia capaz de liberar energía y a su vez generar calor, una de las propiedades fundamentales es el poder calorífico, por lo cual su determinación es necesaria debido a que brinda información referente a la eficiencia en la combustión, a su vez también hace referencia al rendimiento de equipos diseñados para la quema de aceites (Speight, 2015, p. 189).

El poder calorífico de los combustibles puede tomar diferentes valores dependiendo de cada tipo de combustible, sin embargo cuanto as alto sea este valor mayor será la eficiencia del comburente, esto se debe a que la energía que se libera en el proceso producirá una liberación de calor superior (Andrés y Antón, 2015, p. 138).

El poder calorífico es una medida directa del contenido de energía de un combustible y puede expresarse como la cantidad de calor que se libera por la combustión completa de una unidad de combustible con oxígeno dentro de un calorímetro. Comúnmente se expresa en unidades de kcal/kg o kJ/kg

Esta propiedad de los combustibles es una medida del contenido de energía, la cual es expresada en cantidades de calor que se genera y libera por acción de la combustión completa de la unidad de combustible en presencia del oxígeno dentro de un calorímetro. Las unidades que comúnmente son expresadas son en kcal/kg o KJ/kg.

2.8.4.2. Destilación

La destilación es el procedimiento mediante qué consiste en calentar un combustible con la finalidad de separar los componentes de la sustancia, esto con la ayuda de los rangos de ebullición dependiendo de cada fracción que compone el producto a destilar. El objetivo de este ensayo es el de cuantificar el porcentaje de combustible recuperado a la par que se incrementa la temperatura hasta el punto final del destilado. Los datos resultantes de esta prueba son los de la temperatura de ebullición de cada fracción, la misma que se utiliza para la construcción de la curva temperatura-porcentaje recuperada del combustible (Del Coro, Sánchez y Sánchez, 2017, p. 2-10). Este método de prueba cubre la destilación atmosférica de productos petrolíferos utilizando una unidad de destilación por lotes de laboratorio para determinar cuantitativamente las características del intervalo de ebullición de productos tales como gasolinas naturales, destilados ligeros y

medios, combustibles para motores de encendido por chispa, gasolinas de aviación, combustibles para turbinas de aviación, 1-D y 2-D regular y bajo en azufre combustibles diésel, alcoholes especiales de petróleo, naftas, alcoholes blancos, querosenos y combustibles para quemadores de grados 1 y 2 (ASTM D-86, 2004, p. 1).



Figura 10-2: Equipo de destilación fraccionada

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Para los líquidos la temperatura de ebullición se ve afectado por los cambios de presión atmosférica debido a la variación de altura, a medida que un sitio se encuentra más elevado sobre el nivel del mar, la temperatura de ebullición se hace menor. La norma ASTM D-86 establece la ecuación de Sydney Young, para la corrección de la temperatura variada por la presión atmosférica, esta ecuación se detalla a continuación:

$$C_c = 0.0009(101 - P_k)(273 + t_c)$$

Donde:

C_c : Correcciones que se agregarán algebraicamente a las lecturas de temperatura observadas

P_k : Presión barométrica, prevaleciente en el momento, kPa

t_c : La lectura de temperatura observada en ° C

2.8.4.3. Índice de cetanos

El número de cetanos es una medida de la capacidad de ignición que posee un combustible tipo diésel, se puede decir que representa un índice de inflamabilidad (Pardiñas, Feijó 2018, p. 300). Experimentalmente, la determinación de este número requiere de equipos especiales y costosos, además de adoptar procedimientos complejos. Debido a esto, se desarrolló un concepto

alternativo que permitiera la estimación de este número, dicha concepción es lo que hoy en día se conoce como índice de cetanos

El índice de cetanos es característico de combustibles tipo diésel, que tiene a ser una medida de la capacidad de ignición que caracteriza a un combustible, en otras palabras se puede hacer referencia a que representa un índice de inflamabilidad.

Para hacer la determinación de este parámetro se requiere de equipos especializados y un tanto costosos, razón por la cual se opta por otras opciones de cálculo.

El índice de cetanos de un combustible se puede determinar a partir de la densidad y las temperaturas de destilación con el uso de la ecuación planteada en la norma ASTM D 3747.

$$CCI = 45,2 + (0,0892)T_{10N} + [0,131 + (0,901)B][T_{50N}] + [0,0523 - (0,420)(B)][T_{90N}] + [0,00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)B + 60B^2$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1$$

$$DN = D - 0,85$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310$$

Donde:

D: Densidad a 15°C en g/ml

T₁₀: temperatura de recuperación del 10% en °C

T₅₀: temperatura de recuperación del 50% en °C

T₉₀: temperatura de recuperación del 90% en °C

En los combustibles el índice de cetanos indica el rendimiento y potencia de un motor de combustión. Por lo tanto si este índice toma valores altos significa que se puede tener mejor control de la combustión, con una reducción de humo y olores en el sistema de escape (Speight, 2015, p. 175).

Para este cálculo se requiere la utilidad de variables que de cierta manera describen algunas propiedades físicas del combustible, en este caso se toma en cuenta la densidad del líquido combustible y sus temperaturas de destilación, que de cierta manera actúan como parámetros directos de la inflamabilidad del combustible.

2.8.4.4. Punto de inflamación

El punto de inflamación se define como una propiedad de los combustibles y es la temperatura más baja a la cual el combustible se calienta desprendiendo vapores que son inflamables una vez que se ponga en contacto con una fuente de calor, específicamente con una llama.



Figura 11-2: Equipo Flash Point

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Esta propiedad es también conocida como flash point la cual representa una medida a la capacidad de un combustible para formar una mezcla inflamable con el aire en condiciones controladas, por lo general es en un laboratorio. Se considera como un factor extremadamente importante ya que sirve como un índice del riesgo de incendio relacionado al uso de un combustible (Speight, 2015, p. 45).

Cuanto más bajo sea el punto de inflamación, más volátil será el combustible, a su vez existe mayor probabilidad a que se inflame, esta característica es un indicador de la calidad de los mismos, ya que productos con mayor punto de inflamación son de mejor calidad (Sánchez et al., 2015, p. 187).

2.8.4.5. *Densidad*

Materiales

- Probeta
- Varilla de agitación
- Termómetro

Equipos

- Hidrómetro

Procedimiento

El procedimiento es el mismo que se detalla en el punto 2.8.1.2.

2.8.4.6. *Viscosidad cinemática*

Materiales

- Vaso de precipitación

- Soporte universal
- Termómetro
- Franela
- Malla de asbesto
- Pinza para bureta
- Reverbero

Reactivos

- Agua destilada
- Thinner

Equipos

- Viscosímetro de tubo capilar de vidrio



Figura 12-2: Viscosímetro

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Procedimiento

Seguir el procedimiento detallado en el apartado 2.8.1.3.

2.8.4.7. Contenido de azufre

Otros de los malestares, asociados a compuestos con azufre, es su contribución a causar corrosión en equipos. Debido a estas razones, en la actualidad hay una creciente insistencia en producir aceites combustibles con bajo contenido de azufre, sin embargo, esta es una propiedad que varía ampliamente dentro de los límites aproximados de 0.1 a 3.0 % P/P

El contenido de azufre de los combustibles es un parámetro importante a tomar en cuenta especialmente porque está relacionado directamente con la contaminación de la atmosfera, esta concentración o contenido de azufre de un combustible esta expresado en %P/P. al tener un alto

contenido de azufre un aceite durante su combustión emite altos niveles de dióxido de azufre que es el causante del fenómeno llamado lluvia ácida (Speight, 2015, p. 49).

En cuanto al combustible el alto contenido de azufre es que provocan la corrosión de los equipos que entran en contacto con ella, razón por la cual en la actualidad existe una gran demanda en la producción de aceites combustibles con bajo contenido en azufre, sin embargo, este parámetro puede tener una amplia variación dentro de los límites de 0.1% a 3% P/P.

El contenido de azufre según la norma ASTM D-4294, establece el uso del equipo Analizador de Fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF), generalmente este equipo es usado en el campo industrial para la determinación de minerales en industrias cementeras, petróleo, petroquímica e industrias de polímeros.

El concepto básico de todos los espectrómetros es una fuente de radiación, una muestra y un sistema de detección. En espectrómetros de EDXRF, el tubo de rayos X que actúa como fuente irradia una muestra directamente, y la fluorescencia procedente de la muestra se mide con un detector de dispersión de energía. Este detector es capaz de medir las diferentes energías de la radiación característica que proviene directamente de la muestra. El detector puede separar la radiación procedente de la muestra en la radiación de los diferentes elementos presentes en la muestra. Esta separación se denomina dispersión (Spectris Company, 2021).

2.8.4.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico en una investigación es un pilar importante debido a que mediante esto se debe tomar decisiones mediante el análisis de datos numéricos, en este proceso se trata de inferir a partir de datos experimentales que contienen información que permite valorar la relación entre los propiedades involucrados (Bouza, 2017, p. 2).

En la presente investigación el análisis estadístico se ejecutó con el objetivo de analizar la relación entre las variables; temperatura de pirólisis, tiempo de residencia y el rendimiento de la fracción líquida. De esta manera se determinó la temperatura y el tiempo de residencia a la cual el rendimiento en la fracción líquida tiene características significativas en relación a los demás ensayos, también se logra evidenciar el efecto de las variables sobre el rendimiento.

Anova de dos factores

El ANOVA de un solo factor es la técnica estadística que permite analizar la relación de dependencia entre una variable independiente de tipo categórica, en este caso la temperatura de pirólisis, y una variable dependiente representada por el rendimiento de la fracción líquida

El Anova de dos factores es un procedimiento estadístico que permite realizar un análisis de la relación de dependencia entre dos variables independientes de tipo categórica, y una variable dependiente, en esta investigación las dos variables independientes son el temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia y la variable dependiente es el porcentaje de rendimiento.

La información que facilita esta técnica analiza el efecto entre las variables de manera global, es decir, esta prueba solamente indicará la presencia o ausencia de alguna o algunas diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos, sin embargo no detectará la ubicación de las mismas (López y Fachelli, 2015, p. 42-45).

2.8.4.9. *Cromatografía de gases GC-MS*

Para esta investigación se utilizó la Cromatografía de Gases GC-MS, que significa cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas. Este es un proceso analítico que se dedica a la separación, identificación y cuantificación de mezclas de sustancias volátiles y semivolátiles.

“El acoplamiento GC-MS permite combinar sinérgicamente la alta resolución cromatográfica con las sensibilidades y selectividades altas de la espectrometría de masas, para detectar cantidades traza de biomarcadores dentro de mezclas de hidrocarburos altamente complejos” (Stashenko y Martínez, 2012, p. 12).

La cromatografía de gases es una técnica muy útil para de separación y determinación de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles que sean térmicamente estables. Acoplada a la espectrometría de masas, permite una identificación inequívoca de los distintos componentes separados sin necesidad de disponer de patrones de los mismos. En caso de poder comparar con los correspondientes patrones, se puede llevar a cabo, además, el análisis cuantitativo de los compuestos identificados (Gutiérrez y Droguet, 2002, p. 7).

La cromatografía de gases tiene la capacidad de separar mezclas muy complejas, sin embargo, esto permite separar, se detectar y cuantificar todos los componentes individuales de una muestra desconocida, el único dato que se obtiene es el tiempo de retención de los picos cromatográficos. Sin embargo, estos datos no son los suficientes para la identificación de compuestos sobre todo cuando la muestra tiene un gran número de componentes, como es frecuente en la cromatografía. De ahí parte la necesidad de la espectroscopía de masas la misma que puede identificar de manera inequívoca cualquier sustancia pura, pero por lo general no es capaz de identificar los componentes individuales de una mezcla sin antes separarlo previamente sus compuestos, esto se debe a la gran complejidad del espectro obtenido por superposición de los espectros individuales de cada componente.

El GS-MS es el equipo que permite cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas, donde consta de una microgeringa donde se inyecta la muestra en estado líquido a analizar, los componentes de la muestra son transferidos a la fase de vapor por acción del calentamiento, posterior a eso se da una separación cromatográfica de los componentes individuales esto se da en la columna cromatográfica del equipo, en la ionización y fragmentación las moléculas son ionizadas y sufren rupturas en fragmentos característicos, para luego ser separados en función de su masa y su carga, luego el equipo arroja un cromatograma donde cada pico genera un espectro

de masa del compuesto. El equipo consta de un inyector y entrada de corriente de gas como parte inicial en la parte central se ubica la columna cromatográfica y la espectroscopia de masa donde se encuentra la parte de ionización y fragmentación, luego está el sistema de vacío con el analizador de masas para pasar por un detector y finalmente esos datos son analizados mediante un software que genera un cromatograma de los elementos analizados (Hamid, Al-Talla y Kharbatia, 2010, p. 5).

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Resultado de caracterización fisicoquímica del aceite lubricante residual

3.1.1.1. Prueba de densidad

Al realizar la prueba de densidad se determinó que el aceite utilizado como materia prima para la obtención de combustible está dentro de los rangos de aceites lubricantes residuales con una densidad entre $0,897 \pm 2$ gr/ml.



Figura 1-3: Peso de la muestra

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Según (Tejada, Quiñones y Fong, 2017, p. 139) rangos de densidad de un aceite lubricante residual sin alteraciones esta entre 0,8659 – 0,9978 gr/ml dependiendo de la marca del aceite. En esta investigación cumple con el parámetro de aceite usado sin ningún tipo de alteraciones o modificaciones.

3.1.1.2. Prueba de viscosidad

La viscosidad cinemática a 40 °C del aceite residual lubricante de motor para esta prueba presenta un valor de 25,25 mm²/s esta medida se encuentra en los límites de viscosidad a para aceites lubricantes usados. En la dilución está presente una combinación de combustible o aceite más delgados, aceites nuevos o reciclados; o también debido a la humedad y algunos aditivos, los

cuales son los mayores diluyentes del aceite. Investigación como la de (Tejada, Quiñones y Fong, 2017, p. 140) reportan un valor de viscosidad de $24.8 \text{ mm}^2/\text{s}$, estudios repostado por (Jones, 2007, p. 13) indican que el aceite usado tiene una viscosidad cinemática de $20,98 \text{ mm}^2/\text{s}$. De cierta manera los valores obtenidos en esta investigación tienen relación con los estudios realizados anteriormente.

3.1.1.3. Filtración del aceite lubricante residual

Con la filtración del aceite lubricante usado se puede obtener material en forma de sedimentos o partículas sólidas una vez que el aceite usado atraviesa los poros del papel con un tamaño de $15 \mu\text{m}$, en el filtro queda una sustancia negra similar a una mancha impregnada en dicho papel. Para esta investigación de un total de 8858 gramos de aceite lubricante usado el peso de partículas solida encontradas es de 1,87 gramos, que viene a representar el 0,021%. Las muestras de aceite usado dan como resultado un porcentaje de sedimentos entre 0.01-1.57% dependiendo del origen del aceite usado.(Tejada, Quiñones y Fong, 2017, p. 139), comprando con esta referencia el porcentaje de sedimentos en este estudio está dentro de rango de aceites usados.



Figura 2-3: Peso de filtrado

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

3.1.1.4. Determinación de espectroscopia

El análisis de espectroscopia IR define cada una de las estructuras presentes en la muestra de aceite lubricante reciclado, en el grafico 1-3 se muestran los picos que se forman por la presencia de diferentes grupos funcionales, tomando en cuenta la longitud de onda los picos que sobresalen están entre $2500\text{-}3000 \text{ cm}^{-1}$ y entre los $1600\text{-}1400 \text{ cm}^{-1}$, sin embargo existen otros picos que no sobresalen mucho como es el caso de los picos 3500 , 2800 , 2300 , entre $2000\text{-}1500$ y $1000\text{-}550 \text{ cm}^{-1}$.

En la tabla 1-3: se menciona los picos citados anteriormente, así también los picos adicionales que se encuentran en el espectro IR.

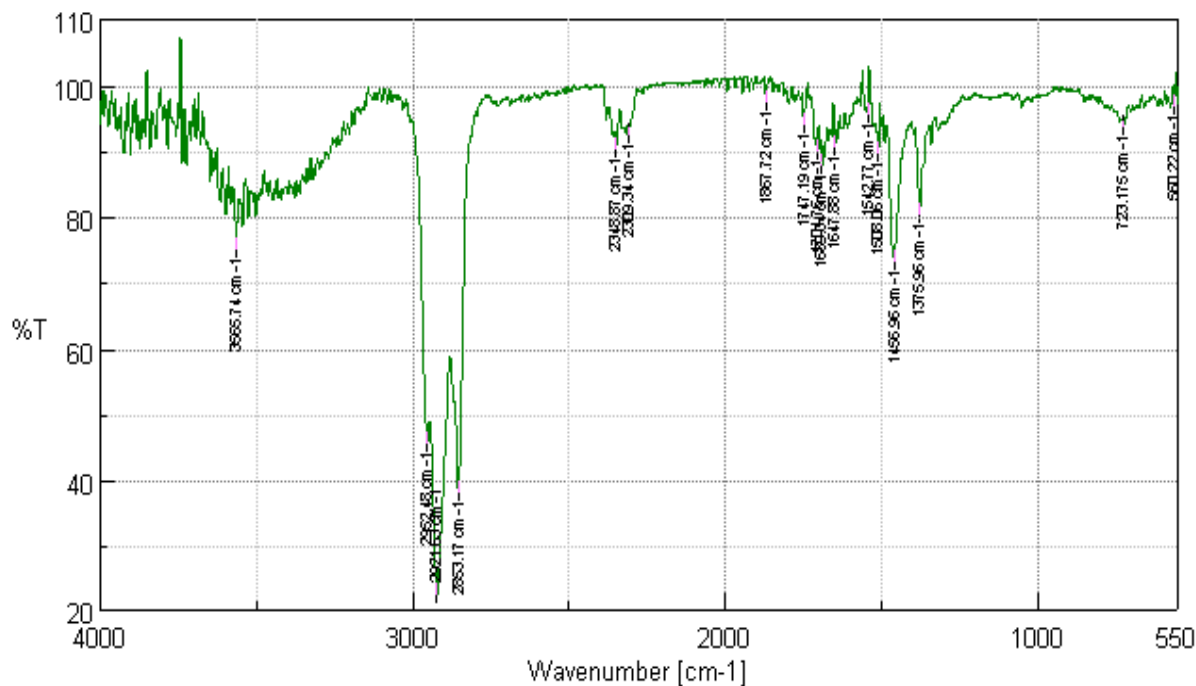
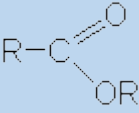
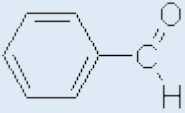
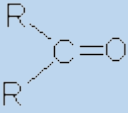
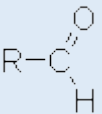
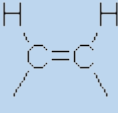


Gráfico 1-3: Espectro IR del aceite lubricante residual

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Tabla 1-3: Análisis del espectro IR del aceite lubricante residual

Aceite Residual					
N de pico	N de onda	Transmitancia (%)	Grupo funcional	Vibración	
1	3565,74	75,0023	O-H	Variable	
2	2952,48	45,5484	-CH ₃ ; -CH ₂ -	Fuerte	
3	2921,63	22,3955	-CH ₃ ; -CH ₂ -	Fuerte	
4	2853,17	37,913	-CHO	Débil	
5	2348,57	90,4494	$\begin{matrix} \diagup \\ \text{NH}_2^+ \\ \diagdown \end{matrix}$ $\begin{matrix} \diagup \\ \text{NH}^+ \\ \diagdown \end{matrix}$ $\begin{matrix} \diagup \\ \text{=NH}^+ \\ \diagdown \end{matrix}$	Medio	
6	2309,34	92,4701	$\begin{matrix} \diagup \\ \text{NH}_2^+ \\ \diagdown \end{matrix}$ $\begin{matrix} \diagup \\ \text{NH}^+ \\ \diagdown \end{matrix}$ $\begin{matrix} \diagup \\ \text{=NH}^+ \\ \diagdown \end{matrix}$	Medio	
7	1867,72	97,5842	$\begin{matrix} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ \text{R}-\text{C} \quad \text{C} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \quad \text{O} \end{matrix}$	Fuerte	

8	1747,19	94,1572		Fuerte
9	1704,76	89,9393		Fuerte
10	1689,34	87,8011		Fuerte
11	1647,88	90,595		Fuerte
12	1542,77	95,6046	-NH-	Débil
13	1508,06	89,8588	-CS-NH-	Fuerte
14	1456,96	73,2738	-CH3 ; -CH2-	Medio
15	1375,96	80,4153	-CH3	Fuerte: Modo Deformación C-H Simétrico
16	723,147	93,7074		Fuerte: Modo De Deformación C-H Fuera Del Plano
17	560,22	96,8247	C-Cl	Fuerte

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Al ser un aceite lubricante de motor de tipo residual, en el IR se observan ciertas variaciones en los picos, esto quiere decir que existe la presencia de constituyentes adicionales. Esto se debe a que existen diferentes tipos de aceites y una gran variedad de aditivos y lubricantes que se adicionan al aceite virgen que con el uso prolongado generan diferentes tipos de compuestos.

Los grupos funcionales encontrados en este análisis tienen una longitud de onda de entre 3565 cm^{-1} con grupo funcional de alcohol hasta 560 cm^{-1} , en los 2800-2900 cm^{-1} se tienen grupos funcionales con $-\text{CH}_3$, en la onda de 2300 cm^{-1} se tienen grupos funcionales nitrogenados al igual que en la onda de 1500 cm^{-1} que también aparecen compuestos con azufre, se tienen compuestos aromáticos fuertes en el pico de 1700 cm^{-1} y en los picos 1600-1800 cm^{-1} se tienen compuestos con doble enlace ramificados y con presencia de oxígeno. Estos picos son similares a los obtenidos por (Anrango, 2018, p. 39) donde se obtienen picos entre 3500 -1825 cm^{-1} hasta el pico de 730 cm^{-1} , los picos presentes entre 1600 a 600 se deben al desgaste y transformación de los aditivos del aceite.

Con respecto a los grupos funcionales presentes en la muestra, en el estudio realizado por (Del Toro et al., 2018, p. 43) menciona que se encuentran grupos funcionales entre las bandas existen picos

pronunciados que corresponden a 2952 cm^{-1} pertenece a $-\text{CH}_3$, 2921 cm^{-1} a bandas de estiramiento de $=\text{CH}_2$ de hidrocarburos saturados, posterior a esos picos están los de $2500\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ que corresponde a los compuestos con dobles y triples enlaces; en la región de $2000\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ se encuentran los alquenos, grupos fenólicos que pueden ser debido a los residuos aromáticos, entre los $1500\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ está representados por metilos sustituidos con carbonos ramificados. Estos valores de picos son similares a los expuestos en la tabla 1-4.

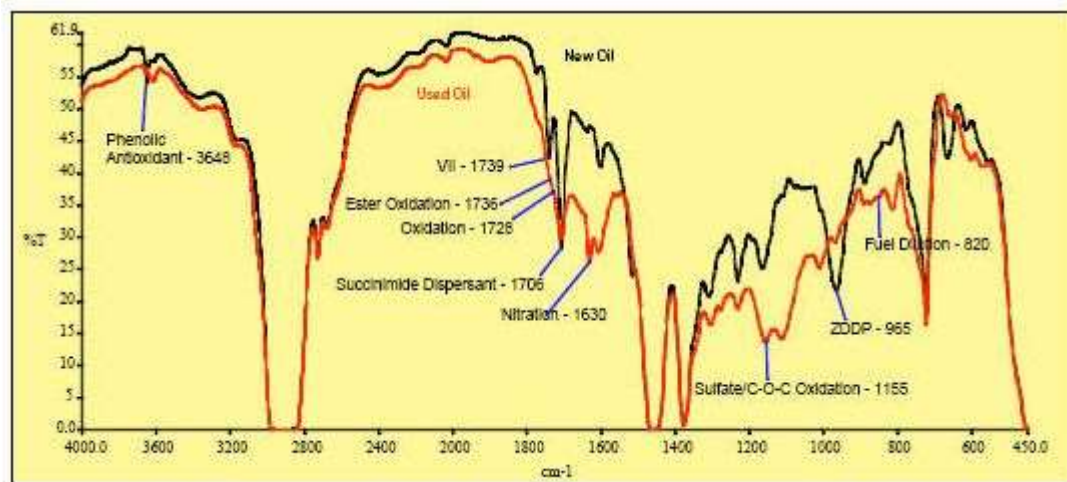


Gráfico 2-3: Espectro IR del aceite lubricante residual

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

En el gráfico 2-3 se aprecia una comparativa del aceite lubricante nuevo con el aceite lubricante usado, donde los picos de Transmittancia y número de onda se variación entre ambos, ligeramente se indica entre los 14000 cm^{-1} a 700 cm^{-1} , se observa la aparición de grupos sulfatados y se da la oxidación del aceite entre los 1600 cm^{-1} a 2000 cm^{-1} , existe la aparición de esteres, compuestos de nitración y oxidación del aceite, con esto se puede decir que el aceite usado presenta una mayor concentración de los elementos que lo componen, siendo estos compuestos altos en contaminación debido a su concentración en el aceite.

3.1.2. Resultados de la pirolisis térmica del aceite lubricante residual

3.1.2.1. Análisis sensorial fracción líquida

La fracción líquida obtenida en la pirolisis del aceite lubricante residual a temperatura ambiente tiene una coloración café marrón oscuro de aspecto aceitoso para el tratamiento de tiempo de pirolisis de 60 minutos a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para el tratamiento de 120 minutos a 400°C toma un aspecto de fluido aceitoso con una coloración café claro rojizo. Visualmente, de acuerdo a las temperaturas de reacción y el tiempo de residencia del aceite en el reactor se nota el cambio de coloración en cada tratamiento, siendo que a menor tiempo de residencia y a menor temperatura

de reacción el producto toma un color café oscuro intenso, al incrementar la temperatura de reacción y tiempo de residencia el color café oscuro intenso se desvanece y el producto toma una coloración café claro rojizo, otro aspecto a tomar en cuenta es la diferencia en la textura de cada uno de los tratamientos realizados y finalmente, el olor es el mismo en todos los tratamientos.



Figura 3-3: Producto de pirólisis

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Tabla 2-3: Análisis sensorial de fracción líquida

Temperatura(°C)	Tiempo(min)	Color	Olor	Textura
350	60	Café negro Brilloso	Olor penetrante a aceite caliente	Moderadamente espeso Aceitoso
	120	Café marrón oscuro Brilloso	Leve aroma a combustible mínimo olor a aceite caliente	Ligeramente espeso Aceitoso
400	60	Café marrón oscuro Brilloso	Notable aroma a combustible	Fluido normal Aceitoso
	120	Café rojizo claro Brilloso	Notable aroma a combustible Olor dulce	Muy fluido Aceitoso

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

3.1.2.2. Perfil de temperaturas

Con respecto a las temperaturas, en una pirolisis térmica conforme se incrementa la temperatura desde un valor inicial de referencia en este caso la temperatura ambiente, el aceite lubricante residual va adquiriendo energía interna, hasta llegar a la temperatura de ebullición, momento en el cual se debe realizar un control manual en el reactor para mantener la misma velocidad de calentamiento y las temperaturas de los ensayos, con el objetivo de estabilizar el reactor para

evitar cambios bruscos de temperatura. El grafico 3-4 muestra el perfil de temperaturas en el reactor de cada ensayo.

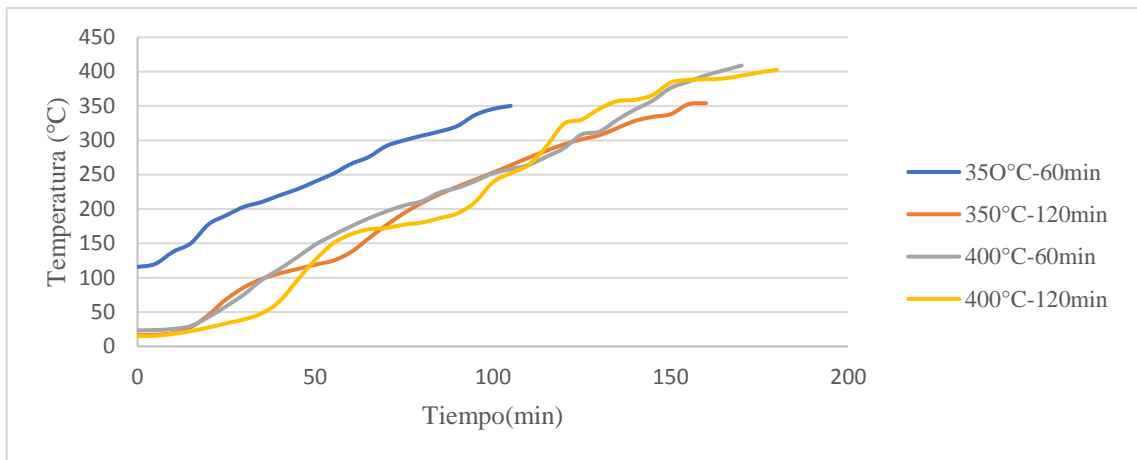


Gráfico 3-3: Perfil de temperatura de la pirólisis

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Investigaciones previas sobre este proceso sugieren que la aparición de los productos de pirólisis empieza a partir de los 300°C y termina a una temperatura de 420°C, donde se aprecia que la aparición de producto de pirólisis es nula (Zouad et al., 2019, p. 4). Tomando en cuenta el grafico la degradación del aceite residual lubricante de motor se da entre las temperaturas superiores a los 300 °C hasta los 400 °C, en este rango de temperatura el aceite residual empieza a cambiar de fase desde un estado líquido a gaseoso. Esta variación en la temperatura de pirólisis con respecto a la de la bibliografía citada, se debe a que el aceite usado es de diferente tipo de marca en comparación a los datos de la referencia.

Tomando en cuenta los ensayos realizados con respecto a la temperatura de pirólisis y tiempo de residencia en el reactor, a altas temperaturas y alto tiempo de residencia favorece a la producción de gases, mientras que a altas temperaturas y bajo tiempo de residencia aumenta la producción de productos de petróleo condensables y por ultimo a bajas temperaturas y bajo tiempo de residencia incrementa el rendimiento en la producción de carbón (El-Mekkawi et al., 2020, p. 4).

Un análisis importante es el hecho de que existen subidas y bajadas leves de temperatura en el proceso de pirólisis, esto se debe a que existe una variación de temperatura del gas en el interior del reactor, esto provoca una inestabilidad que al manipular la tasa de calentamiento se logra retomar la estabilidad del proceso de pirólisis.

3.1.2.3. Velocidad de calentamiento

La degradación del aceite lubricante residual de cierta manera puede ser controlada mediante la manipulación de la tasa de calentamiento suministrada al proceso de pirólisis, esta acción a su vez

implica diversos parámetros a tomar en cuenta; una de ellas es en mantener la uniformidad en la transferencia de calor durante el tiempo de residencia del aceite en el reactor.

La velocidad de calentamiento en todos los ensayos realizados fue de 2,2 °C/ min;(Zouad et al., 2019, p. 3), al superar los 300 °C la velocidad de calentamiento se mantiene constante para estudiar los niveles de temperatura (300, 320, 340, 360, 380, 400 °C), tomando en cuenta la tasa de calentamiento de 2 °C/ min; con esto se da a conocer que el proceso consta de velocidades de calentamiento bajas. Tomando en cuenta la velocidad de calentamiento el proceso se puede decir que está regida por una pirolisis lenta.

3.1.2.4. Rendimiento de los productos finales

El rendimiento de cada una de las fracciones; líquida y gaseosa, se expresa en porcentajes, obteniendo valores en función del peso calculado de las mismas; tomando en cuenta que la fase gaseosa, que, si bien no se obtuvo de manera directa mediante su recolección, si se pudo cuantificar la proporción al aplicar una simple diferencia de pesos entre producto pirolizado, producto de residuo líquido y fase gaseosa.

En la tabla 3-3 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos a las 2 temperaturas y tiempo de residencia establecidos.

Tabla 3-3: Rendimiento de los productos finales de la pirolisis de aceite lubricante residual

Variables		Pirolizado		Residuo		Gases	
Temperatura (°C)	Tiempo(min)	Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)
350	60	236	31,978	454	61,518	-	6,504
		227	31,011	463	63,251	-	5,738
		243	33,061	471	64,082	-	2,857
	120	279	38,272	402	55,144	-	6,584
		273	37,193	423	57,629		5,177
		282	38,897	411	56,690	-	4,414
400	60	686	78,941	119	13,694	-	7,365
		671	77,572	133	15,376	-	7,052
		691	79,425	138	15,862	-	4,713
	120	713	82,238	86	9,919	-	7,843
		702	81,250	89	10,301		8,449
		699	80,809	80	9,249	-	9,942

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Tabla 4-3: Promedio de rendimientos finales

Rendimiento (%)				
Temperatura (°C)	Tiempo	Producto Piroлизованo	Residuo	Gases
350	60	32,017	62,950	5,033
	120	38,121	56,488	5,392
400	60	78,646	14,977	6,376
	120	81,432	9,823	8,745

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Se realizó un promedio de los rendimientos finales para cada tratamiento que consta de diferentes temperaturas de reacción y diferente tiempo de residencia, de esta manera se puede realizar una comparación respecto a las dos variables mencionadas anteriormente y verificar la influencia que estas variables ejercen sobre los productos finales, estos valores se representan en la tabla 4-3.

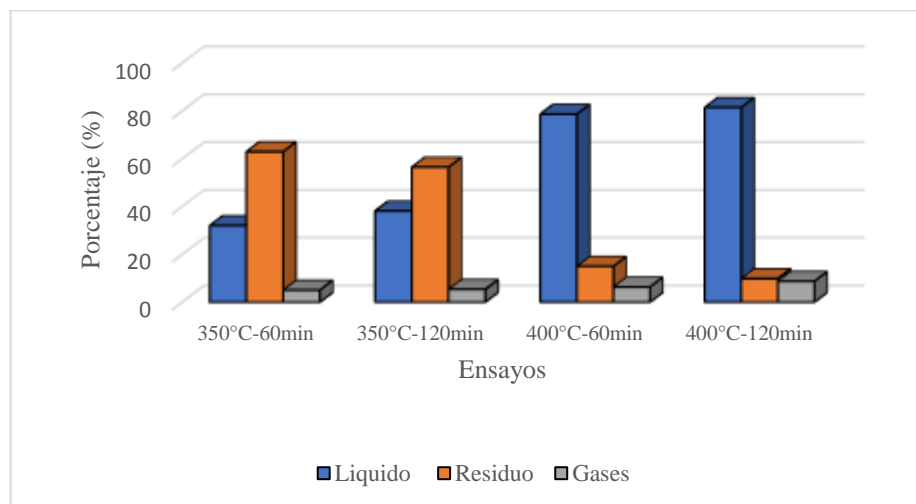


Gráfico 4-3: Rendimiento de la fracción líquida

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

En el gráfico 4-3 se puede observar un aumento que existe una tendencia relacionada entre la formación de los productos finales con el aumento de temperatura y el tiempo de residencia en la pirolisis.

En caso de la fracción líquida obtenido en este proceso existe un mayor rendimiento a medida que existe un incremento en la temperatura de reacción y tiempo de residencia, debido a que pasa de un 32,07% a un tiempo de 60 minutos y temperatura de 350°C a un 81,432% a un tiempo de 120 minutos y una temperatura de 400°C. Este cambio se debe a que en el proceso de pirolisis los compuestos de peso molecular elevado se rompen por acción del calor, para formar hidrocarburos más livianos con bajo peso molecular. Tomando en cuenta la referencia de (Adeniyi, Adewoye y

Ighalo, 2018, p. 6); se puede apreciar que el rendimiento de la fracción líquido varía entre 77% a 81%.

En el caso de la fracción gaseosa y fracción de coque o residuo de la pirolisis; no se realizó ningún análisis de caracterización fisicoquímica, sin embargo los rendimientos de las muestras de 400°C con 60 minutos y 400°C con 120 minutos que son las más representativas en este proyecto, muestran una gran similitud con los rendimientos de la referencia; donde para gases no condensables se tiene un rendimiento de 10% y fracción de residuo de 2% (Razo y Riesco, 2019, p. 7). Para la fracción gaseosa la diferencia es mínima, sin embargo para fracción de residuo existe una diferencia considerable que se puede explicar por el tiempo de residencia del aceite en el reactor.

3.1.2.5. Análisis estadístico

Anova de dos factores para 4 muestras

Este proceso de análisis de varianza se realizó mediante la utilización software InfoStat, tomando en consideración la relación existente entre las variables; temperatura de pirolisis, tiempo de residencia y rendimiento de la fracción líquida, los resultados se detallan a continuación.

Tabla 5-3: Datos preliminares del ANOVA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento (%)	12	0,99	0,99	4

Nota: R²: coeficiente de determinación lineal; R²Aj: coeficiente de determinación ajustado;
CV: coeficiente de variación

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

El análisis estadístico realizado a un total de 12 datos se tiene R², R²Aj y CV > 0,75, por lo tanto, tomando en cuenta este valor se acepta el modelo establecido, es decir que la variación presentada en los rendimientos de la fracción líquida tiene una dependencia total respecto a las variables de temperatura de pirólisis y tiempo de residencia.

El coeficiente de variación (CV), es un valor que indica la mediana de dispersión de los datos que en este caso indica que existe una dispersión considerable entre los datos analizados.

La razón f es estadístico que emplea el análisis de varianza, el valor de este parámetro estadístico el cociente entre datos mencionados anteriormente y el valor de p, que es la probabilidad o también el valor más pequeño en el que los resultados son significativos.

Tabla 6-3: Análisis de la varianza

F.V	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	5741,66	2	2870,83	528,66	<0,0001
Temperatura	5712,61	1	5712,61	1051,97	<0,0001
Tiempo	29,05	1	29,05	5,35	0,046
Error	48,87	9	5,43		
Total	5790,53	11			

Nota: F.V.: factores/variables; SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: media cuadrática; F: razón F; p: probabilidad
Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Para este análisis el valor F 528,66, es superior a 3,98, valor crítico de F que se obtiene a partir de las tablas, con esto se cumple que F calculado es mayor a F crítico, con este resultado se puede afirmar que existe diferencias significativas entre la temperatura de pirolisis y el tiempo de residencia de forma independiente.

Con respecto a la probabilidad se tiene que valor de α es menor a 0,05, con un nivel de significancia de 5%, con esto se puede afirmar que existe la presencia de diferencia entre las variables (Frías, 2016, p. 6).

Test de Tukey

Las condiciones de la prueba de Tukey se especifican en la tabla 7-3, donde se obtiene los resultados a analizar.

Tabla 7-3: Condiciones prueba Tukey

Alfa	DMS	Error	GI
0,05	3,0435	5,4304	9

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

La diferencia media significativa comparada entre los grupos mencionado se muestra en la tabla 7-3. La diferencia de mínima significativa (DMS), es el método que se emplea para discriminar entre las medias de los grupos, que representa el valor crítico usado para realizar las comparaciones entre los grupos. De acuerdo con los datos obtenidos, los valores en la tabla de color rojo sean positivos o negativos, concluye que no existe entre diferencia estadísticamente significativa. Sin embargo, los valores de color negro demuestran que si existe diferencia estadísticamente significativa entre los grupos con un intervalo de confianza de 95%.

Tabla 8-3: Posibles comparaciones entre los grupos basados en la diferencia de sus medias

Variabes	350 °C -60 min	350 °C -120 min	400 °C -60 min	400 °C -120 min
350 °C-60min	-	-3,437	-43,964	-46,75
350 °C -120 min	3,437	-	-40,527	-43,313
400 °C -60 min	43,964	40,527	-	-2,786
400 °C -120 min	46,75	43,313	2,786	-

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

En la tabla 8-3 se muestra el análisis del test de Tukey para la variable independiente temperatura, en donde el rendimiento de las fracciones líquidas obtenido a las temperaturas de 350°C y 400°C, presentan diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 9-3: Análisis del Test TUKEY variable temperatura

Temperatura	Medias	N	E.E	
350	36,4	6	0,95	A
400	80,04	6	0,95	B

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$); E.E: error estándar
Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Para la variable independiente de tiempo de residencia al igual que la variable de temperatura si existe diferencia estadísticamente significativa para los dos tiempos de ensayos realizados tanto para el tiempo de 60 y 120 minutos, donde se obtienen medias diferentes en los rendimientos.

Tabla 10-3: Análisis del Test TUKEY variable tiempo

Tiempo	Medias	N	E.E	
60	56,66	6	0,95	A
120	59,78	6	0,95	B

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$); E.E: error estándar
Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

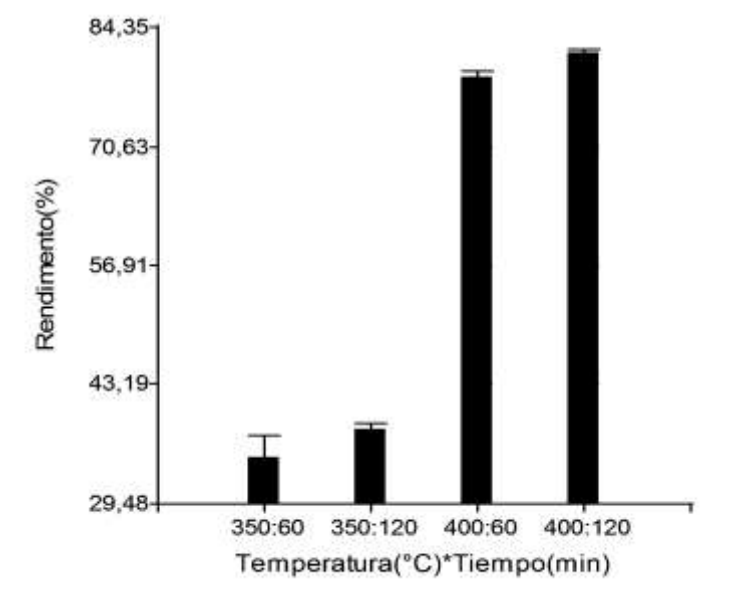


Gráfico 5-3: Gráfica representativa del Test de Tukey

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Una vez realizado el análisis de los datos entre los grupos se determinó que la temperatura y tiempo óptimo que satisface esta investigación es el ensayo de 400°C en temperatura y 120

minutos de tiempo de residencia; donde se tiene el mayor porcentaje de rendimiento en la fracción líquida.

Anova de dos factores para dos muestras

En este análisis se realizó tomando en cuenta los dos ensayos que tienen mayor significado en el rendimiento, estos ensayos son con una temperatura de 400°C y con tiempo de 60, 120 minutos donde la variable temperatura se mantiene fija y la variable temperatura sufre cambios.

Tabla 11-3: Datos preliminares del ANOVA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento (%)	6	0,80	0,75	1,07

Nota: R²: coeficiente de determinación lineal; R²Aj: coeficiente de determinación ajustado; CV: coeficiente de variación

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021

Con un total de 6 muestras analizadas se tiene que R², R²Aj y CV > 0,75, por lo tanto, se acepta el modelo establecido, es decir que la variación presentada en los rendimientos de la fracción líquida tiene una dependencia significativa con respecto a la variable tiempo.

Tabla 12-3: Análisis de la varianza

F.V	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	11,65	1	11,65	15,96	0,0162
Temperatura	0	0	0	sd	sd
Tiempo	11,65	1	11,65	15,96	0,0162
Error	2,92	4	0,73		
Total	14,56	5			

Nota: F.V.: factores/variables; SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: media cuadrática; F: razón F; p: probabilidad

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Para este análisis el valor F 15,96, es superior a 4,76, valor crítico de F que se obtiene a partir de las tablas, con esto se cumple que F calculado es mayor a F crítico, con este resultado se puede afirmar que existe diferencias significativas entre los dos tiempos de residencia de forma independiente. Con respecto a la probabilidad se tiene que valor de α es menor a 0,05, con un nivel de significancia de 5%, con esto se puede afirmar que existe la presencia de diferencia entre las variables expuestas para el análisis.

Tabla 13-3: Análisis del Test TUKEY

Tiempo	Medias	N	E.E	
60	78,65	3	0,49	A
120	81,43	3	0,49	B

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$); E.E: error estándar

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

En la tabla 13-3 se muestra el análisis del test de Tukey para la variable independiente tiempo, en donde el rendimiento de las fracciones líquidas obtenidas a la temperatura de 400°C, presentan diferencias estadísticamente significativas entre los ensayos, por consiguiente se puede decir que el tiempo afecta de manera significativa en el rendimiento.

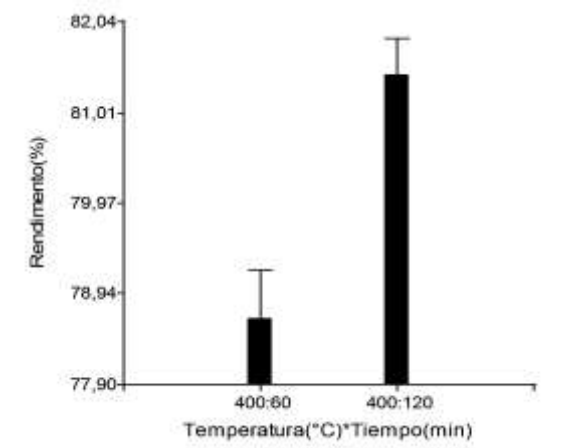


Gráfico 6-3: Gráfica representativa del Test de Tukey

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Se determinó que la temperatura y tiempo óptimo que satisface esta investigación es el ensayo de 400°C en temperatura y 120 minutos de tiempo de residencia; donde se tiene el mayor porcentaje de rendimiento en la fracción líquida. Esto se fundamenta en los siguientes criterios:

- Se podría afirmar, de acuerdo a los gráficos 4-3 y 5-3, que el rendimiento máximo de la fracción líquida se da a 400°C con un tiempo de 120 minutos, seguido por el rendimiento a 350°C con un tiempo de 60 minutos, sin embargo, como se señaló en apartados anteriores, al incrementar el tiempo de pirolisis se obtienen mayor porcentaje de productos aromáticos, esto se debe a que al mantener periodos largos de tiempo en el reactor las cadenas que se fraccionaron por el calor se vuelven a unir formando compuestos más pesados.
- Ahora bien, las temperaturas y tiempos restantes: 350°C con 60 y 120 minutos poseen rendimientos que, conforme al análisis estadístico, se considera tienen diferencias estadísticamente significativas, es decir, que al trabajar a cualquiera de estas temperaturas el rendimiento adquirirá valores que disten de manera relevante. En consecuencia, la elección se orientó tomando en cuenta el rendimiento de la fracción líquida.

3.1.2.6. Determinación de espectroscopia infrarroja FT-IR

Las espectroscopias IR de las fracciones líquidas obtenidas del proceso de pirolisis muestran la variación estructural del aceite lubricante residual al ser sometido a diferentes temperaturas.

Como se puede observar en el tratamiento de 350°C durante 60 minutos no existe mayor variación estructural con la del aceite residual, sin embargo, entre la banda de 2000-2500 cm^{-1} existe la ausencia de dos picos que aparecen en el aceite residual.

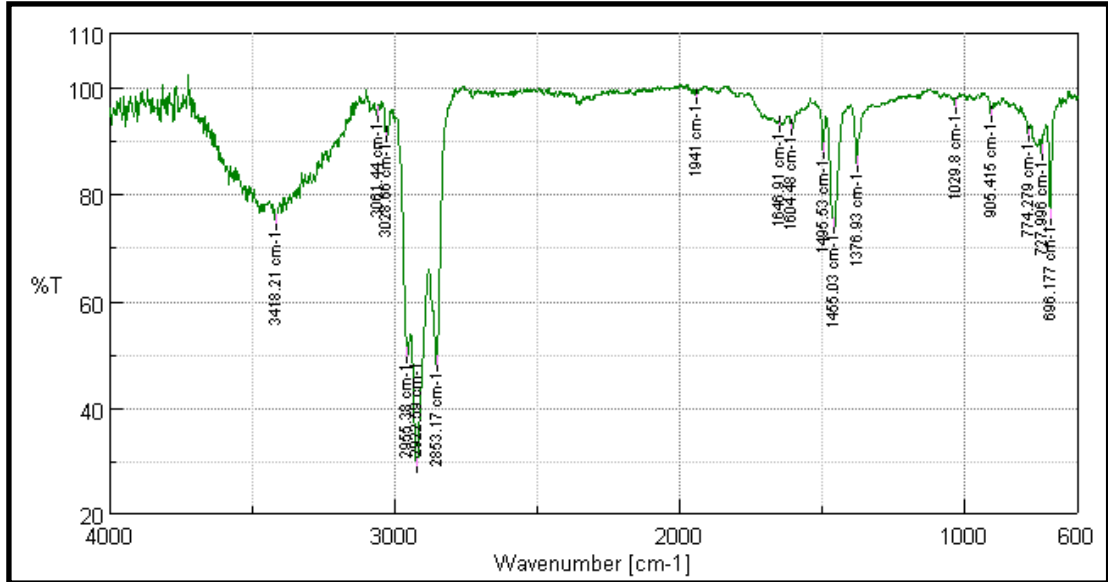


Gráfico 7-3: Espectro IR de la fracción líquida a 350°C-60 minutos

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

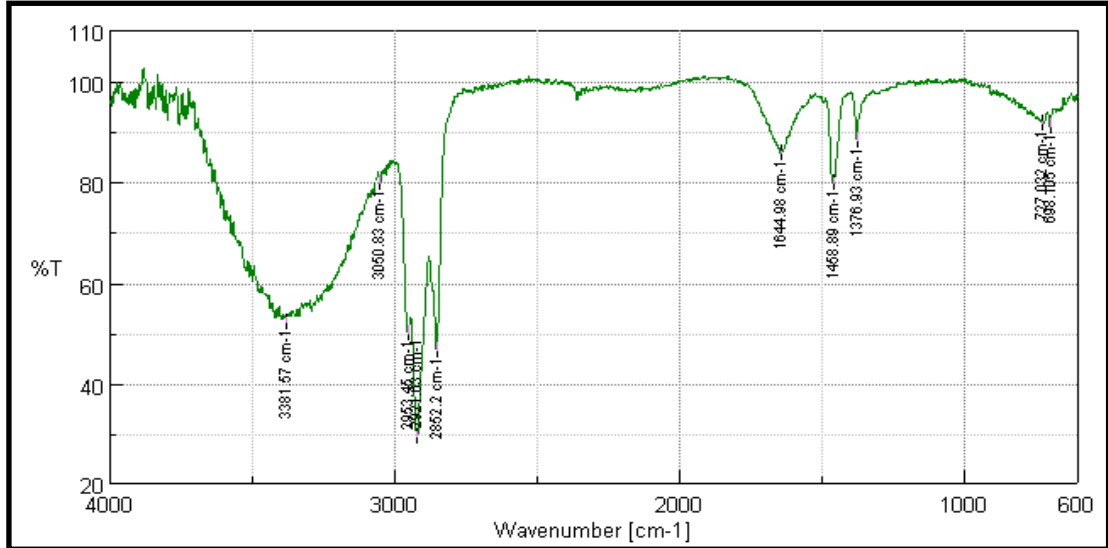


Gráfico 8-3: Espectro IR de la fracción líquida a 350°C-120 minutos

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

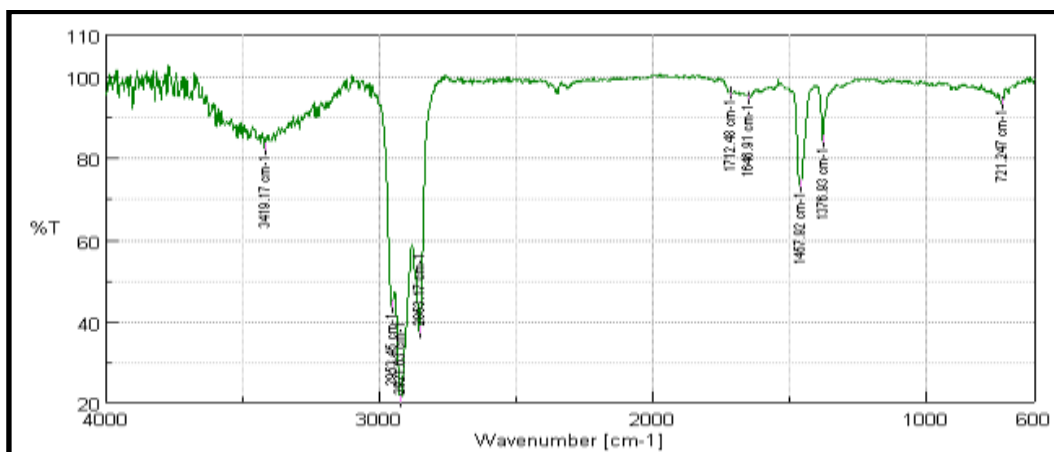


Gráfico 9-3: Espectro IR de la fracción líquida a 400°C-60 minutos

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

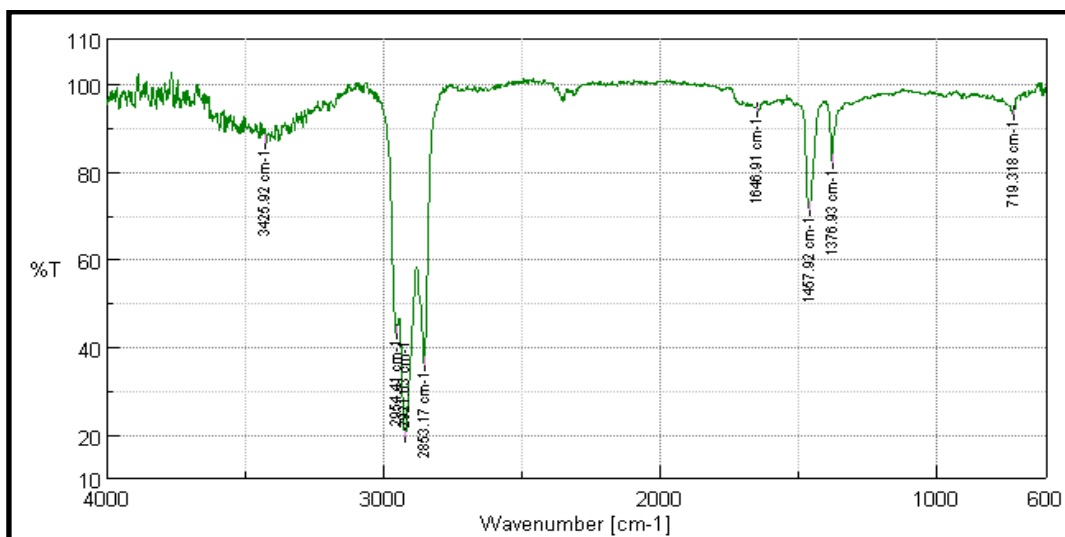


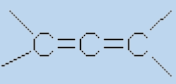
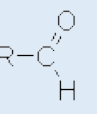


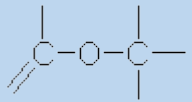
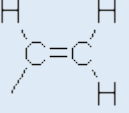
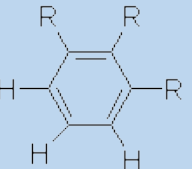
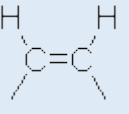
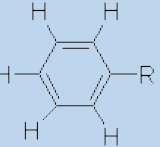
Gráfico 10-3: Espectro IR de la fracción líquida a 400°C-120 minutos

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Desde la tabla 14-3 hasta la tabla 17-3 se presentan de forma detallada cada uno de los picos encontrados, grupo al que pertenecen y la vibración de cada uno de los ensayos.

Tabla 14-3: Análisis del espectro IR de la fracción líquida 350°C-60 minutos

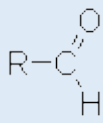
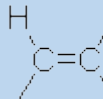
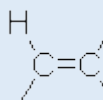
Temperatura(°C)	Tiempo (min)	Nº De Pico	Nº De Onda (Cm-1)	Transmitancia (%)	Grupo Funcional	Vibración
350	60	1	3418,21	74,3852	-CONH-	Modo De Tensión
		2	3061,44	94,7358	CH=CH	C-H: Modo Tensión
		3	3028,66	90,9519	C=CH-	Medio
		4	2955,38	49,7272	-CH3; -CH2-	Fuerte
		5	2922,59	29,1559	-CH3; -CH2-	Fuerte

6	2853,17	48,013	-CHO	Débil
7	1941	98,168		Medio
8	1646,91	92,7272		Fuerte
9	1604,48	92,1615	Sistema Aromático	Medio
10	1495,53	88,007		Fuerte
11	1455,03	73,8495	-CH3; -CH2-	Medio
12	1376,93	85,3418		Fuerte: Modo Deformación C-H Simétrico
13	1029,8	96,1689		Fuerte: Modo Tensión C-O Asimétrico
14	905,415	94,8431		Medio
15	774,279	90,9462		Fuerte: Modo Deformación C-H Fuera Del Plano
16	727,996	87,5216		Fuerte: Modo Deformación C-H Fuera Del Plano
18	696,177	75,4202		Fuerte: Modo Deformación C-H Fuera Del Plano

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

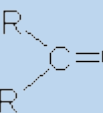
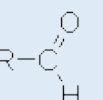
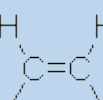
Tabla 15-3: Análisis del espectro IR de la fracción líquida 350°C-120 minutos

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Nº De Pico	Nº De Onda (Cm-1)	Transmitancia (%)	Grupo Funcional	Vibración
350	120	1	3381,57	20,2035	O-H	Variable: Modo De Tensión O-H
		2	3050,83	79,844	RCONH2 (Primaria)	Modo De Tensión N-H
		3	2953,45	49,8173	-CH3; -CH2-	Fuerte: Modo De Tensión C-H

		4	2921,63	29,3129	-CH3; -CH2-	Fuerte: Modo De Tensión C-H
		5	2852,2	46,3948	-CHO	Débil
		6	1644,98	85,8171		Fuerte
		7	1458,89	79,7557	-CH3; -CH2-	Medio
		8	1376,93	88,1713	-CH3	Fuerte: Modo De Deformación C-H Simétrico
		9	727,032	91,5834		Fuerte: Modo De Deformación C-H Fuera Del Plano
		10	698,105	90,8755		Medio

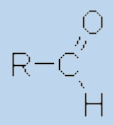
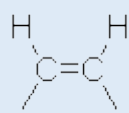
Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Tabla 16-3: Análisis del espectro IR de la fracción líquida 400°C-60 minutos

Temperatura(°C)	Tiempo (min)	Nº De Pico	Nº De Onda (Cm-1)	Transmitancia (%)	Grupo Funcional	Vibración
400	60	1	3419,17	81,8898	-COOH-	Medio: Modo De Tensión
		2	2953,45	43,2048	R-CH3	Vibración De Estiramiento C-H – Asimétrico
		3	2921,63	20,4443	-CH3; -CH2-	Fuerte: Modo De Tensión C-H
		4	2853,17	37,1383	-CHO	Débil
		5	1721,48	95,5396		Fuerte
		6	1646,91	95,5342		Fuerte
		7	1457,92	72,9871	Compuestos aromaticos	Fuerte
		8	1376,93	83,9127	-CH3	Fuerte: Modo De Deformación C-H Simétrico
		9	721,247	93,1657		Medio

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021

Tabla 17-3: Análisis del espectro IR de la fracción líquida 400°C-120 minutos

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Nº De Pico	Nº De Onda (Cm-1)	Transmitancia (%)	Grupo Funcional	Vibración	
400	120	1	3425,92	86,4671	O-H Intermolecular	Asociación	Variable: Modo De Tensión
		2	2954,41	43,1979	R-CH3		Vibración De Estiramiento C-H – Asimétrico
		3	2921,63	19,6315	-CH3; -CH2-		Fuerte: Modo De Tensión C-H
		4	2853,17	36,1077	-CHO		Débil
		5	1646,91	93,6105			Fuerte
		6	1457,92	71,2391	Compuestos aromaticos		Fuerte
		7	1376,93	82,0816	-CH3		Fuerte: Modo De Deformación C-H Simétrico
		8	719,318	92,9147			Medio

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

En resumen, los picos comprendidos entre los 3000-3500 cm^{-1} se encuentran vibraciones de tensión O-H alifáticos, C=C olefinas y compuestos nitrogenados, entre los picos 2995-2850 cm^{-1} representan vibración de tensión entre C-H alifáticos, los picos entre 1721-1646 cm^{-1} representan vibraciones de tensión entre C=O con grupo funcional carbonilo. Entre los 1457-1376 cm^{-1} se encuentran los picos de vibración de tensión entre C-H alifáticos y aromáticos. Finalmente, de 727-696 cm^{-1} están representados por vibración de tensión entre C=C olefina. Es importante mencionar que en el primer ensayo existe la presencia de grupos nafténicos y aromáticos que se debe a que al no contar con una alta temperatura y tiempo de pirolisis no se logran craquear todos los compuestos del aceite residual.

De manera general las muestras presentadas con el análisis realizado indican que están compuestas por hidrocarburos olefinicos, alifáticos, parafínicos y nafténicos. Si se considera la composición inicial del aceite residual se puede evidenciar la degradación o transformación que sufre en la composición el producto de pirolisis, donde se aprecia una gran cantidad de hidrocarburos de menor peso molecular, cadenas lineales con máximo dobles enlaces y la mínima presencia de compuestos nitrogenados, en comparación con el aceite residual donde sobresalen los compuestos de mayor peso molecular con largas cadenas de carbono y dobles enlaces.

El mejor rendimiento obtenido es el ensayo de que temperatura de 400°C y un tiempo de 120 minutos se obtiene picos 3425-719 cm^{-1} , entre las bandas 140-1300 cm^{-1} se puede distinguir compuestos de grupo metilo y aromáticos, en la banda de 719 se tiene compuesto ramificado con

doble enlace, en la banda 3400-2800 cm^{-1} se tiene compuestos de grupo OH y metilo, estos datos son similares al reportado por (Sánchez et al., 2013, p. 4), en su estudio afirma bandas entre 3600-880 cm^{-1} que perteneces a cierta mezcla de combustibles de etanol y gasolina.

3.1.3. Pruebas para combustible

3.1.3.1. Poder calórico

El combustible obtenido presenta un poder calorífico de 45,75 MJ/Kg, para la muestra de 400°C y 60 minutos, mientras que para la muestra de 400°C con 120 minutos, reporta un valor de 45,517 MJ/kg, ambas muestras con un valor de incertidumbre de ± 2 , estos valores son similares tomando en cuenta como referencia a la gasolina que toma un valor de 46 MJ/kg, siendo esta el combustible líquido de mayor poder calórico (Moro, 2018, p. 43). De la misma manera al comparar con el Diésel 50 que cuenta con un poder calórico de 45,57 MJ/kg, tiene semejanza mayor que a la de la gasolina.

3.1.3.2. Destilación

Los datos de destilación en las tablas 18-3 y 19-3 muestran los puntos de ebullición inicial y final de las dos muestras son 81°C, 86°C iniciales y 293°C, 302°C; para las muestras de 400°C con 60 minutos y 400°C con 120 minutos respectivamente.

Tabla 18-3: Datos de destilación para la muestra de 400°C con 60 minutos

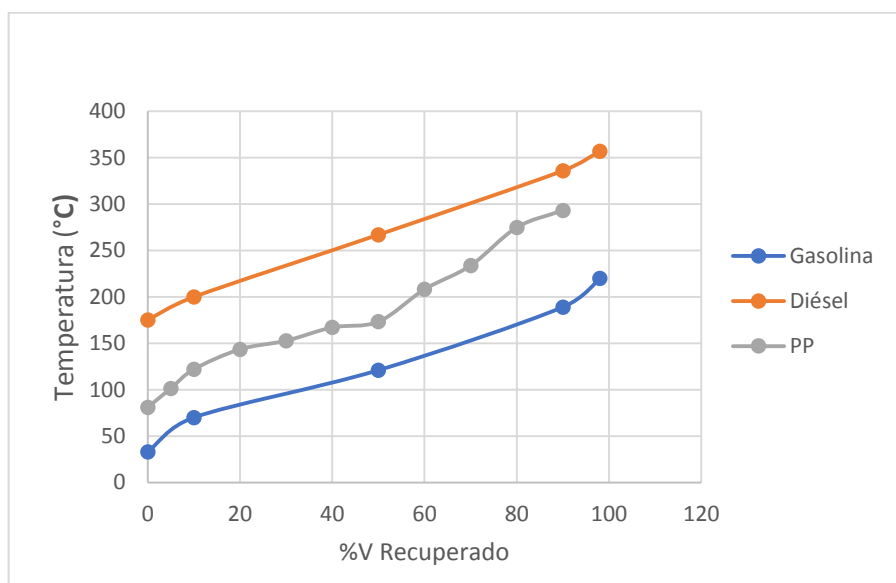
% V Recuperado	T Observada(°C)	T Corregida (°C)
0	72	81
5	92	101
10	112	122
20	133	144
30	142	153
40	152	167
50	162	173
60	196	208
70	221	234
80	261	275
90	279	293

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Tabla 19-3: Datos de destilación para la muestra de 400°C con 120 minutos

%V Recuperado	T Observada(°C)	T Corregida (°C)
0	77	86
5	95	105
10	117	127
20	129	139
30	141	152
40	154	165
50	163	174
60	208	220
70	233	246
80	254	268
90	287	302

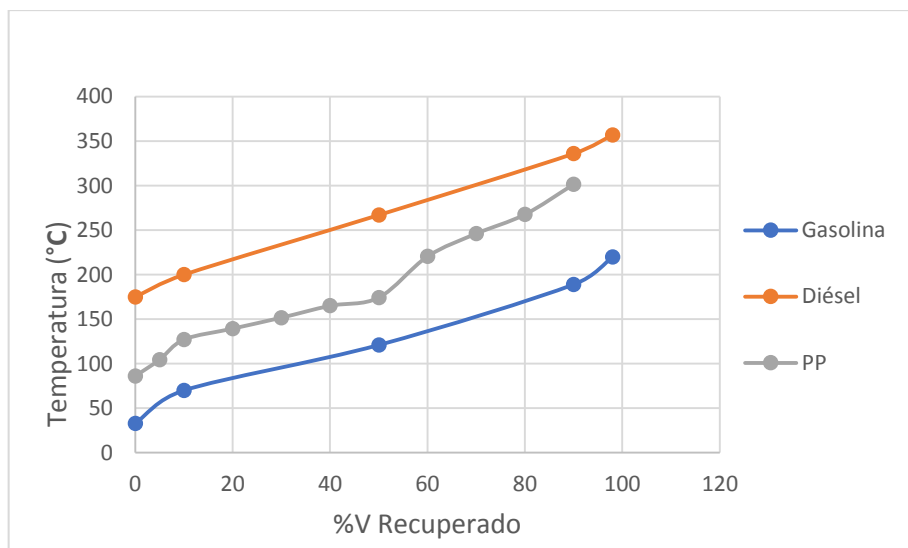
Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.



Nota: PP: Producto de pirolisis

Gráfico 11-3: Curva de destilación del aceite pirolítico a 400°C-60 minutos

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.



Nota: PP: Producto de pirolisis

Gráfico 12-3: Curva de destilación del aceite pirolítico a 400°C-120 minutos

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

En los gráficos 11-3 y 12-3, se muestran las dos curvas de destilación del producto de pirolisis obtenido del aceite lubricante residual, tanto de la muestra de temperatura de 400°C con 60 y 120 minutos, así también se evidencia las curvas de destilación de los principales combustibles comerciales como son la gasolina y el diésel. Como se puede observar la curva perteneciente al producto de pirolisis (PP) se encuentra ubicada en el espacio intermedio la gasolina y el diésel. En un principio con respecto al punto inicial de ebullición las dos muestras asemejan al de la gasolina, pero llega a un punto aproximado de 30% V las muestras optan por una tendencia hacia el diésel, hasta el punto que al finalizar el destilado el punto final está muy cercano al del diésel. Esto significa que en el destilado del PP no solo está formado por compuestos del diésel sino también comparte con las de la gasolina con presencia de fracciones ligeras.

3.1.3.3. Índice de cetanos

Este parámetro denominado índice de cetanos presenta un valor de 29,64 y 30,36 para la muestra de 400°C con tiempo de 60 minutos y 400°C con tiempo de 120 minutos respectivamente, tomar en cuenta que este cálculo se realiza a partir de los datos de la destilación aplicando la ecuación presentada anteriormente.

$$CCI = 45,2 + (0,0892)T_{10N} + [0,131 + (0,901)B][T_{50N}] + [0,0523 - (0,420)(B)][T_{90N}] + [0,00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)B + 60B^2$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1$$

$$DN = D - 0,85$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310$$

$$DN = 0,84342 - 0,85 = -0,00658$$

$$B = [e^{(-3,5)(-0,00658)}] - 1 = 0,0232972$$

$$T_{10N} = 122 - 215 = -93$$

$$T_{50N} = 173 - 260 = -87$$

$$T_{90N} = 293 - 310 = -17$$

$$\begin{aligned} CCI = & 45,2 + (0,0892)(-93) + [0,131 + (0,901)(0,0232972)][-87] \\ & + [0,053 - (0,420)(0,0232972)][-17] + [0,00049][(-93)^2 - (-17)^2] \\ & + [(107)(0,0232972) + 60(0,0232972)^2] \end{aligned}$$

$$CCI_{400^{\circ}C-60 \text{ min}} = 29,64$$

$$CCI_{400^{\circ}C-120 \text{ min}} = 30,36$$

Donde:

D: densidad a 15 °C en g/ml

T₁₀: Temperatura de recuperación del 10% (°C)

T₅₀: Temperatura de recuperación del 50% (°C)

T₉₀: Temperatura de recuperación del 90% (°C)

Estos valores calculados de las muestras de 400°C con 60 minutos y 400°C con 120 minutos ciertamente son bajos, en relación al establecido para gasóleo de automoción que oscila entre 46 y 49 (Caselle et al., 2015, p. 586). Esta variación que presenta estas muestras puede atribuirse a que el combustible obtenido no solo posee fracciones correspondientes a diésel o gasolina, sino que también existe otros compuestos que posiblemente están relacionados a otro tipo de combustible. Una de las características importantes para considerarse como uso de combustible es el índice de cetanos que para esta investigación el valor es de 29,64 y 30,36, estos valores bajos como se menciona en el apartado anterior, para su uso como combustible diésel, esta variación de índice se debe a la mezcla de compuestos presentes en la muestra como se aprecia en el análisis FT-IR existe gran variedad de grupos funcionales de los cuales algunos son grupos funcionales pertenecientes al diésel y son los que aportan con un índice de cetanos alto.

Sin embargo existes otros grupos funcionales como los que se ubican en el número de onda de 3453, 1600 y 700 cm⁻¹ que perjudican a este parámetro. Las bandas similares al del diésel reportado por (Qasim, Ansari y Hussain, 2017, p. 4) son las ondas 2922,2852,1743, 1460 y 1377 cm⁻¹, por ende su índice de cetanos es alto. En esta investigación se tiene bandas similares a los de la

referencia, que aportan con el valor indicado de número de cetanos que a su vez al ser limitados se tiene poca cantidad de compuestos para el parámetro de cetanos.

3.1.3.4. Punto de inflamación

El punto de inflamación encontrado en las muestras de 400°C con 60 minutos y 400°C 120 minutos demuestran que el combustible se enciende a una temperatura de 60 °C y 50 °C respectivamente, es decir que no es posible que arda a temperatura ambiente; realizando una comparación con el Diésel muestra una gran similitud en las temperaturas de inflamación, la norma nacional especifica un valor de temperatura de inflamación mínimo de 52°C, donde el valor promedio es de 63,79°C, donde ofrece un buen aspecto en la seguridad de almacenamiento de combustible, sobre todo a nivel industrial (Aguilar et al., 2016, p. 18).

De acuerdo con los datos de unto de inflamación obtenidos, estas muestras no se consideran de tipo inflamable, ya que el departamento de transporte de EE.UU. (DOT) y el departamento de transporte de EE.UU. (OSHA), han establecido que los líquidos con un punto de inflamación por debajo de 37,8°C se consideran inflamables (Albahri, 2015, p. 2).

3.1.3.5. Densidad y gravedad API

Como se observa en la tabla 8-4 el combustible obtenido; la muestra de 400°C con 60 minutos y 400°C con 120 minutos se detallan tanto para gravedad api, densidad relativa y densidad a una temperatura determinada; es así como teniendo en cuenta la tabla de clasificación establecida por la API, se puede categorizar en un tipo de combustible ligero.

Tabla 20-3: Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API

Analisis	Muestra	PP	Unidades
Gravedad API a 60 °F(15,6°C)	400°C-60 min	34,030	°API
	400°C-120 min	33,780	°API
Densidad relativa	400°C-60 min	0,855	-
	400°C-120 min	0,856	-
Densidad a 60 °F(15,6°C)	400°C-60 min	854,833	Kg/m ³
	400°C-120 min	856,100	Kg/m ³

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Tabla 21-3: Clasificación del crudo de acuerdo a la gravedad API

Tipo	°API	Densidad Relativa
Ligero	> 31,1	< 0,87
Medio	22,3-31,1	0,92-0,87
Pesado	10-22,3	1-0,92
Extra pesado	< 10	> 1

Fuente: Correa, Souza 2019, p. 2

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Al ser considerado un aceite de tipo ligero tiene un bajo contenido en azufre y en nitrógeno; asfáltenos y metales despreciables, con una baja viscosidad, olor fuerte, alta tasa de evaporación y finalmente suelen ser inflamables. Los aceites ligeros en cuanto a su composición se dicen que son aceites de base de parafinas, principalmente compuestos por parafinas o también llamados alcanos de cadenas lineales y ramificadas con un 15 al 25% de ciclo alcanos (Correa y De Souza, 2019, p. 2).

La investigación de (Demirbas et al., 2015, p. 7) indica valores en la densidad de 820 kg/m³ a una temperatura de 15 °C, este valor es menor al obtenido en este estudio que arroja valores entre 854,383 y 856,100 kg/m³, sin embargo (Zouad et al., 2019, p. 3) en su investigación observa un valor de 875 kg/m³, con estos valores se dice que el producto de pirólisis obtenido está en un rango intermedio en relación a la referencias mencionadas.

Para la densidad relativa en esta investigación se obtiene valores de 0,855 y 0,856, que tienen similitud con estudios realizados por (El-Mekkawi et al., 2020, p. 6) que reporta densidades de 0.86 y 0.85, que resultan ser similares a los obtenidos en este estudio.

3.1.3.6. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática a 40°C del combustible obtenido tanto de la muestra 400°C con 60 minutos y 400°C con 120 minutos son 8,147 y 7,332 mm²/s respectivamente. La viscosidad del diésel está especificada a 40°C y los combustibles una viscosidad superior a 4,5 mm²/s a 40°C no resultan ser adecuados para usarse en motores a diésel (Maceiras, Alfonsín y Morales, 2017, p. 3).

Sin embargo, la viscosidad cinemática de los productos recuperados del craqueo térmico son mayores que las del combustible diésel, donde se registra una disminución significativa con el aumento de la temperatura de pirólisis o se puede corregir este problema con una destilación (Zouad et al., 2019, p. 6).

3.1.3.7. Contenido de azufre

El contenido de azufre que presenta la muestra de combustible obtenido en la pirolisis tiene un contenido de azufre de 0,1634 %P/P; según (Han et al., 2018, p. 1), establece que aceites con contenido superior a 0,42%P/P serian catalogados como ácidos y aceites con valores por debajo del mencionado son considerados dulces; tomando en cuenta esta referencia el producto de pirolisis obtenido sería un tipo de hidrocarburo dulce.

El contenido de azufre menor a 1% P/P en el combustible, revela que dentro de su composición se encuentran parafinas y olefinas, reduciendo la presencia de aromáticos (El-Sabagh et al., 2018, p. 4), lo que a su vez coincide con las característica de gravedad API donde se indica la presencia de compuestos parafínicos.

Para la gasolina de 87 octanos la norma establece que el contenido de azufre como máximo debe ser 0,065% P (NTE INEN 935, 2016, p. 4), el aceite combustible obtenido sobrepasa el límite permitido por la norma.

Con respecto al diésel Premium se especifica mediante la norma que el contenido máximo de azufre debe ser de 0,05% P (NTE INEN 1489, 2016, p. 3), al igual que el caso anterior el producto obtenido en esta investigación está fuera del parámetro permitido.

Para la disminución de azufre en el producto de pirólisis obtenido (Gutiérrez y Pérez, 2019, p. 131) recomienda realizar un pretratamiento biológico a la materia prima en este caso al aceite residual usado, este tratamiento se lo realiza con cepas bacterianas de genero *Clostridium*, que son capaces de remover hasta un 45% de azufre y metales pesados en muestras de derivados del petróleo.

3.1.3.8. Análisis de Cromatografía de gases GC-MS

El porcentaje de compuestos que se evidencian en las muestras de productos pirolizado, se aprecian en la tabla 22-4. Aquí se puede observar que el resultado obtenido arroja compuestos, parafínicos, oleínas, aromáticos y un cierto porcentaje de compuestos clorados, aminas y ácidos; los cuales se lo llamo como otros en esta tabla.

Tabla 22-3: Resultados de Cromatografía de gases GC-MS

Variables		%			
Temperatura(°C)	Tiempo(min)	Parafinas	Olefinas	Aromáticos	Otros
400	60	55,617	9,981	27,631	6,771
400	120	34,314	3,588	56,112	5,986

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

Para la prueba de 120 minutos el porcentaje de parafinas concuerda con la referencia (Razo y Riesco, 2019, p. 10) de donde se obtiene un porcentaje de parafinas de 30,15% muy similar al de esta

investigación, en cuanto a los aromáticos en esta investigación se obtiene el mayor porcentaje, seguido de compuestos parafínicos, otros compuestos y finalmente un pequeña cantidad de productos olefinicos.

Para el otro ensayo de 60 minutos a la misma temperatura el porcentaje de parafínicos y de olefinas se incrementan notablemente. Al relacionar el porcentaje de aromáticos de los dos ensayos existe un incremento mientras se aumenta la el tiempo de residencia. Según (Mesa y Ortiz, 2016, p. 31) la reacción de pirolisis se da una ruptura se moléculas generando radicales de cadenas cortas. A mayor tiempo de residencia, dichos radicales se vuelven a unir formando compuestos con alto peso molecular. Con eso se justifica la diferencia de aromáticos en los tiempo de 60 y 120 minutos, donde en el primer caso los compuestos formados se extraen en corto tiempo mientras en el segundo caso dicho compuestos formados se demoran en extraer dando lugar al incremento de aromáticos de peso molecular alto.

“Como resultado del análisis cromatográfico se obtiene entre parafinas y olefinas representan un 43,6%” (El-Mekkawi et al., 2020, p. 7); tomando en cuenta esta referencia, en esta investigación realizada en el ensayo de 120 minutos los compuestos parafínicos y olefinicos suman cifras similares a la bibliografía citada, sin embargo la presencia de aromáticos es superior. Para el ensayo de 60 minutos sucede lo contrario las parafinas y olefinas tienen mayor porcentaje dejando reducido la cantidad de aromáticos.

En la tabla 23-4 se observa una clasificación de número de carbonos presentes en los hidrocarburos encontrados en las muestras de combustible; según el número de carbonos se los clasifica en tres grupos.

Tabla 23-3: Resultados de distribución de carbonos

Variables		%		
Temperatura(°C)	Tiempo(min)	<C6	C6-C12	>C12-C20
400	60	4,731	44,961	50,308
400	120	4,335	74,373	21,292

Realizado por: Yuquilema, Franklin, 2021.

En la distribución del número de carbonos existe una orientación hacia el grupo de >C12-C20 en el caso del ensayo de 60 minutos a una temperatura de 400°C, donde se tiene el mayor porcentaje de hidrocarburos en ese rango con compuestos de número de carbonos entre 12 a 20 carbonos, sin embargo al incrementar el tiempo de residencia a la misma temperatura la tendencia se orienta al grupo de hidrocarburos de C6-C12, donde también se aprecia un descenso en el grupo de >C12-C20, por el contrario los hidrocarburos con menor número de carbonos del grupo >C6 se mantiene en rangos similares para ambos caso de tiempo, en este caso no se encontraron hidrocarburos pesados con número de carbonos mayores a C21.

“Existen varios tipos de combustibles que según la distribución de número de carbonos se sitúan, gasolina C4-C12, queroseno C10-C18, diésel C12-C23 y aceite de motor C23-C40”(Almeida y Marque, 2015, p. 3). Tomando en cuenta estos datos es posible afirmar que el combustible obtenido para los dos ensayos con hidrocarburos comprendidos entre C6-C20, son una mezcla de combustibles entre gasolina, queroseno y diésel, que no necesariamente se situó al producto obtenido en la pirólisis en un determinado tipo de combustible ya que presenta características diversas.

3.2. Pruebas de hipótesis

3.2.1. Hipótesis general

El combustible alternativo obtenido a partir del aceite residual puede ser utilizado como fuente de energía calorífica con un mezclado adecuado con los combustibles tradicionales para su uso convencional o de manera independiente sin mezcla alguna.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

Una vez llevada a cabo todas las etapas de la experimentación, análisis y la interpretación de los resultados arrojados en la presente investigación, es factible decir que el producto obtenido se puede utilizar de manera independiente como fuente de energía calorífica. Sin embargo, para su utilidad como una mezcla con los combustibles tradicionales no es posible ya que para el combustible obtenido no se encuentra dentro de los estándares característicos de la gasolina en el parámetro de viscosidad cinemática, el combustible obtenido cuenta con un valor superior que al mezclarse existirá la presencia de dos fases las mismas que no servirán para su aplicación. Para su uso como combustible es necesario realizar procesos adicionales como una purificación del producto obtenido.

3.2.2. Hipótesis específica

3.2.2.1. Hipótesis I

- Con el pretratamiento físico del aceite residual, se va a reducir los contaminantes ajenos al aceite que se encuentran presentes en la muestra para determinar su uso óptimo en el proceso de la pirolisis térmica.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

En efecto, el pretratamiento físico del aceite residual se llevó a cabo mediante una decantación y filtración del material, en consecuencia, los contaminantes sólidos y material particulado tales como tierra, residuos de metales, se pueden eliminar, para su posterior etapa de pirolisis donde

facilita dicha etapa. Y por ende se obtiene productos más limpios que, y no se necesita realizar otro pretratamiento como el filtrado a las muestras resultantes de la pirolisis.

3.2.2.2. *Hipótesis II*

- Mediante la pirolisis de los aceites residuales a nivel del laboratorio en un reactor Batch, se obtendrá varios productos que son el resultado de la descomposición del aceite a diferentes temperaturas y así determinar la temperatura óptima para llegar al producto deseado.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

De manera general, en base al rendimiento del combustible obtenido, se determinó que a nivel de laboratorio mediante el empleo de un reactor tipo Batch se puede obtener varios productos a 350°C y 400°C, con tiempo de residencia del aceite en el reactor de 60 minutos y 120 minutos respectivamente, donde su temperatura óptima para maximizar el rendimiento es de 400°C durante un tiempo de 120 minutos, con ese análisis se puede decir que mientras se eleva la temperatura y tiempo de pirolisis existe una tendencia a producir mayor rendimiento de fracción líquida, que se considera como un combustible alternativo. Sin embargo, las demás temperaturas si cumplen con la tendencia de incrementando la temperatura y tiempo incrementa el rendimiento en la fracción líquida, con la limitación de que el rendimiento de los ensayos de las temperaturas de 350°C a los dos tiempos es por debajo del 40%, la temperatura de 400°C a con 60 minutos en tiempo el rendimiento es de 78% y finalmente el óptimo como ya se menciona es el de 120 minutos a 400°C con el rendimiento más alto de 81%.

3.2.2.3. *Hipótesis III*

- Mediante la determinación de las propiedades fisicoquímicas de los productos de la pirolisis se validará si el combustible obtenido es adecuado para utilizar en combinación con otros combustibles tradicionales o a su vez se puede utilizar de forma individual aprovechando su poder energético en motores de combustión interna.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

En base a la determinación de las propiedades fisicoquímicas obtenidas de los productos de la pirolisis tanto de la muestra de 400°C con un tiempo de 60 minutos y la muestra de 400°C con 120 minutos, la posibilidad de aprovechar su poder energético en combinación con combustibles tradicionales como el diésel no es factible realizarlo, ya que para llevar a cabo esto se debe tener las mismas propiedades que el combustible al cual se le desea mezclar.

Con respecto al uso de manera individual en motores de combustión interna hay algunas propiedades que se asemejan a las del diésel como por ejemplo el punto de inflamación y el poder calorífico. Sin embargo, propiedades como la viscosidad cinemática, índice de cetanos y contenido

de azufre imposibilitan esta aplicación. Esta variación en las propiedades se debe a que con la cromatografía se demuestra que el combustible obtenido comparte propiedades de gasolina, queroseno y diésel, por lo que no se puede afirmar que este producto se situó en un tipo de combustible en específico.

3.3. Discusión

En esta presente investigación se evidencio el proceso de aplicación de la pirólisis térmica al aceite residual con el fin de obtener productos como el aceite combustible logrado en la investigación. La pirolisis es una técnica que trabaja con ciertos parámetros que afectan al producto a obtener, en este caso la variable de temperatura de pirolisis y tiempo de residencia son lo que se tomaron en cuenta, debido a que esto afecta directamente al rendimiento de la fracción líquida.

Para esta investigación se llevó a cabo dos temperaturas y dos tiempos diferentes; de 350°C, 400°C, 60 minutos y 120 minutos de tiempo de residencia con un total de cuatro ensayos diferentes, la variable temperatura es la que afecta directamente a la ruptura de los enlaces C-C presentes en la estructura del aceite residual. Los resultados arrojan que la variación en los productos finales es indudable ya que afecta a al rendimiento y a su composición. Tomado en cuenta exclusivamente la fracción líquida que fue el objetivo de esta investigación, se puede afirmar que la temperatura óptima para maximizar el rendimiento es la de 400°C con un tiempo de 120 minutos, donde se obtiene un rendimiento de 81,432% , este valor es similar al obtenido por (Razo y Riesco, 2019, p. 8) , en su investigación se determinó que el rendimiento de la fracción líquida es de 88,24%, el porcentaje alto de rendimiento se debe a la temperatura de reacción y en parte a al tiempo de residencia, ya que a bajas tasa de calentamiento y bajo tiempo de residencia orienta a una mayor producción de productos condensables. Otra similitud en rendimiento de fracción líquida es la que presenta (Adeniyi, Adewoye y Ighalo, 2018, p. 52-57), donde la fracción líquida varía su rendimiento entre un 77% hasta 81%. Esto con una velocidad de calentamiento de 2°C/min, reflejando así un tipo de pirólisis lenta.

Los resultados obtenidos referente a la composición estructural que presenta el producto obtenido resaltan la presencia de compuestos parafínicos, olefinicos y aromáticos. Esta estructuración coincide con la investigación realizada por (El-Mekkawi et al., 2020, p. 6) , donde reporta la presencia de compuestos de parafinas y olefinas, con ausencia de aromáticos mientras que (Razo y Riesco, 2019, p. 10), indican la presencia de parafinas naftenos y aromáticos, todos compuestos son del producto de la descomposición de del aceite usado. En cuanto a la distribución del número de carbonos en los compuestos presentes en el producto de pirolisis en esta investigación se tiene hidrocarburos con rangos de carbonos entre C6-C20.(Maceiras, Alfonsín y Morales, 2017, p. 5) en su estudio menciona que el combustible obtenido a partir de aceite usado arroja una distribución de

carbonos entre C9-C20. Este parámetro comparte rangos de carbonos de combustible como gasolina C4-C12, queroseno C10-C18 y diésel C12-C23. Investigación como la reportada por (Zouad et al., 2019, p. 9-10) apoya esta premisa de distribución de carbonos, donde los componentes presentes en el combustible obtenido consta de hidrocarburos con numero de carbono de entre C9-C25, principalmente con compuestos aromáticos alcanos y alquenos.

Como un pilar importante es la propiedad de que presenta el combustible, específicamente el poder calórico, como resultado de esta investigación se tiene un valor aceptable de 45,75MJ/kg, este valor supera por una mínima diferencia a los datos obtenidos en la investigación de (Aramkitphotha et al., 2019, p. 344) y (El-Mekkawi et al., 2020, p. 6) debido a que en ambos caso mencionan un valor de 43 MJ/kg, esto significa que el combustible obtenido tendrá la capacidad de proporcionar una mayor cantidad de energía. De manera general al analizar las propiedades del combustible, con la densidad se tiene un valor alto por ende su viscosidad es elevada, al comprar con la referencia de (Demirbas et al., 2015, p. 133), esto se debe a que el producto obtenido posee aun fracciones pesadas en su composición. En cuanto al punto de inflamación se tiene un valor promedio de inflamación a los 60° C, que al comparar con (Aramkitphotha et al., 2019, p. 342) que indica valores de temperatura de inflamación entre 54^a C a 69° C, con estos valores se hace referencia a combustibles de tipo no inflamable a temperatura ambiente que resulta seguro para su almacenamiento y transporte.

CONCLUSIONES

- Se obtuvo el combustible alternativo mediante el proceso de pirólisis de aceites residuales lubricantes de motor. El proceso se realizó mediante 4 ensayos donde las variables independientes de temperatura de pirólisis y tiempo de residencia tuvieron una variación que permitió analizar el efecto de las mismas sobre la composición y rendimiento de la fracción líquida.
- En base al pretratamiento físico específicamente la sedimentación y filtración de la muestra de aceite residual se logró eliminar las impurezas presentes en forma de partículas sólidas. El porcentaje presente de sedimentos es de 0,021%, este valor está dentro de los parámetros permitidos en el reciclaje de aceites lubricantes usados lo que indica un rango de partículas y sedimentos de 0,01% a 1,57%. Este procedimiento favorece a una obtención de producto de pirólisis libre de contaminantes sólidos.
- A través de la caracterización fisicoquímica de los aceites residuales mediante el uso de normas como la NTE INEN 2903 para el caso de la densidad de la materia prima se obtiene un valor de 0,897 gr/ml y con la norma ATM D-445 se determinó la viscosidad cinemática que arroja un valor en su resultado de 25,25 mm²/s a una temperatura de 40°C, la utilización de normas permite verificar que el aceite usado está dentro de los parámetros de aceites lubricantes reciclados, sin la presencia de ninguna alteración.
- Al efectuar la pirólisis del aceite lubricante usado en el reactor Batch, las condiciones de temperatura fueron de 350°C y 400°C, además se agregó una variable de tiempo de 60 y 120 minutos para complementar los ensayos, lo que permite obtener varios productos de la descomposición del aceite usado, por ende se obtienen rendimientos diferentes en cada ensayo, inicialmente se obtiene un rendimiento de 31,017% y con las modificaciones de las variables se obtiene un rendimiento máximo de 81,432%, esto se logra con el incremento en la temperatura y tiempo de pirólisis. Las mejores condiciones de trabajo para la obtención del mejor rendimiento en este caso para la variable, temperatura de reacción es de 400°C y para la variable tiempo de pirólisis es de 120 minutos, donde se obtiene el mejor porcentaje de 81,342%.
- En base a las propiedades fisicoquímicas, tomando en cuenta la densidad y gravedad API el producto obtenido se lo cataloga en un tipo de hidrocarburo ligero con presencia de parafinas. La viscosidad cinemática con un valor entre 8,147 y 7,332 mm²/s, son valores altos como para que el líquido sea usado como combustible de combustión interna ya que sobre pasa el parámetro de viscosidad para motores establecidos por la norma INNEN 1489 requisitos diésel y la norma INNEN 935 requisitos de gasolina mencionan valores por debajo de 5 mm²/s. En cuanto al poder calórico se tiene un resultado favorable de 45,75 MJ/kg que es similar al del diésel lo que indica que tiene un alto poder energético. El punto de inflamación se tiene valores de temperatura de entre 50°C a 60°C que según la norma INNEN 1489 el valor mínimo de temperatura de inflamación debe ser 51°C. El índice de cetanos arroja un valor de 29,64 y 30,36 que son valores

inferiores en relación a la norma INNEN que menciona valor de 45 como mínimo. El contenido de azufre arroja un valor de 0,1634%P, el mismo que está por encima del valor de la normas mencionadas anteriormente donde el porcentaje máximo permitido es de 0,065%P. En la destilación se obtiene valores de punto inicial y final de 80°C a 300°C, tomando en cuenta la norma INNEN 935 estos valores se encuentran distante de la gasolina con un punto final 220°C, al igual que de diésel con un punto final de 350°C. La composición estructural arroja que las muestras contienen parafinas, olefinas y aromáticos con una distribución de carbonos de entre C6-C20 que estaría en comparación con la gasolina, keroseno y diésel que tienen distribución de carbonos entre C4-C23. Verificando esto se puede decir que el combustible obtenido no necesariamente se situó en un tipo de combustible determinado, sin embargo comparte ciertas propiedades que lo definen como una mezcla de varios combustibles de acuerdo a sus características.

RECOMENDACIONES

- Realizar el análisis cromatográfico GS-MS de la muestra de aceite lubricante residual para apreciar de mejor manera el cambio en la estructura de los compuestos presentes en las muestras.
- Realizar ensayos con respecto a la variación de la velocidad de calentamiento para verificar la variabilidad que presenta en la obtención del rendimiento en la fracción líquida.
- Realizar ensayos de determinación de metales pesados en el combustible obtenido ya que esto permite determinar contaminantes de carácter metálico en el combustible final.
- Agregar aditivos para reducir el contenido de azufre del combustible obtenido para su uso como combustible industrial en hornos y calderas ya que el combustible obtenido cuenta con un buen poder calórico que aporta buena cantidad de energía.
- Se recomienda separar las fracciones de diésel y gasolina presentes en el producto de pirolisis mediante una destilación para analizar sus propiedades y comprobar si se puede utilizar como combustible.
- Realizar una valoración para orientar el uso de este producto como un aceite de uso general para lubricación debido a que este producto se considera un aceite regenerado

BIBLIOGRAFÍA

ADENIYI, A., et al. "Simulación asistida por computadora de la pirólisis de aceite lubricante usado usando Aspen Hysys". *Revista de Investigación, Ingeniería y Gestión Ambiental* [en línea], 2018, (Nigeria) 74, pp. 52-57. [Consulta: 04 Enero 2021]. DOI 10.5755 / j01.arem.74.2.20537. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.arem.74.2.20537>.

AGUILAR, A., et al. "Manual de productos". RECOPE-Seguridad Energética [en línea], 2016, pp. 1-122, [Consulta: 04 Enero 2020]. Disponible en: <https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2019/06/Manual-de-Productos-2019.pdf>.

ALBAHRI, T.A. "MNLr and ANN structural group contribution methods for predicting the flash point temperature of pure compounds in the transportation fuels range". *Process Safety and Environmental Protection-ELSEVIER* [en línea], 2015, 93, pp. 182-191. [Consulta: 04 Enero 2021]. DOI 10.1016/j.psep.2014.03.005. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095758201400041X>

ALMEIDA, D. & MARQUE, F. "Thermal and Catalytic Pyrolysis of Polyethylene Plastic Waste in Semi". *Review Article-Polimeros* [en línea], 2015, (Brasil) 26, pp. 1-8. [Consulta: 04 Enero 2021]. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2100>.

ANDRÉS, D. & ANTÓN, J. *Física y Química (LOMCE)* [en línea], 2. Editex, 2015. [Consulta: 04 Enero 2020]. ISBN 9788490785393. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=cEblCwAAQBAJ&dq=poder+calorifico+de+los+combu>

ANRANGO, Cristhian. *Análisis por Espectroscopia IR-FR de los Recobrados de Aceite Quemado de Motor y Alternativa de Utilización (Trabajo de Titulación)*. Pontificia Universidad Católica Del Ecuador, Quito-Ecuador. 2018. pp. 38-45.

ARAMKITPHOTHA, S., et al. "Low sulfur fuel oil from blends of microalgae pyrolysis oil and used lubricating oil: Properties and economic evaluation". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* [en línea], 2019, (Tailandia) 39, pp. 339-346. [Consulta: 04 Enero 2021]. DOI 10.1016/j.seta.2018.12.019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138818302406>

ARROYO, J. "Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para

una caldera de vapor". Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología [en línea], 2016, (Ecuador) 16, pp.1-22. [Consulta: 08 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5055/505554800003/html/>.

ASTM D-86. *Destilación de productos petrolíferos a presión atmosférica.*

ASTM D-445. *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity) 1.*

ATSDR. *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades.*

BARAY, M., et al. "Tratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante la pirolisis lenta y a baja temperatura para la producción de biocombustibles". Revista de Energías Renovables [en línea], 2019, (Perú) 3, pp.1-9. [Consulta: 25 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5055/505554800003/html/>.

BOUZA, C. "Elementos Del Análisis Estadístico De Datos". ResearchGate [en línea], 2017, (Cuba) , pp.1-48. [Consulta: 10 Agosto 2021]. DOI 10.13140/RG.2.2.35315.94240. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/315755914> .

BUILES, S. *Biodegradacion de acietes usados* [en línea]. Argentina: El CID Editor, 2007. [Consulta: 23 Julio 2021]. ISBN 10257065. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/34439>.

CASELLE, M., et al. *Química Aplicada a la Ingeniería.* Madris-España: 2015. ISBN 9786074813906. pp.1-811.

COMERCIO. Convenios en cinco ciudades del Ecuador para reciclar aceites usados *Actualidad* [en línea]. 2018. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/convenios-ci>.

CONAMA. *Guía técnica para el manejo de aceites industriales usados.*

CONUEE. Aceites Lubricantes Principios Basicos. [en línea]. 2018. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/395704/2._Lubricantes.pdf.

CORREA, R. & DE SOUZA, C. "Crude oil spectral signatures and empirical models to derive API gravity". Fuel [en línea], 2019, (Brasil) 237, pp. 1119-1131. [Consulta: 12 Julio 2021]. DOI

10.1016/j.fuel.2018.09.098. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236118316478>.

DEL CORO, M., et al. "Destilación: prueba básica en el control de calidad de los combustibles de automoción". *INTECH* [en línea], 2017, pp. 1-22. [Consulta: 09 Agosto 2021]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5772/67140>.

DEL TORO, R., et al. "ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (FT-IR) DE ACEITES RECUPERADOS DE MOTOR". *Journal of Materials Processing Technology* [en línea], 2018, (Ecuador) 1, pp. 1-8. [Consulta: 22 Julio 2021]. ISSN 09240136. DOI <https://doi.org/10.26621/XV19.2018.12.A04.PUCESI.2550.6684>. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001> <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055> <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006> <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024> <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252> <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>.

DEMIRBAS, A., et al. "Diesel fuel from waste lubricating oil by pyrolytic distillation". *Petroleum Science and Technology* [en línea], 2015, 33, pp. 129-138. [Consulta: 20 Julio 2021]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2014.955921>.

EL-MEKKAWI, S., et al. "Reducing the environmental impact of used lubricating oil through the production of fuels by pyrolysis". *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* [en línea], 2020, 14, pp. 1-8. [Consulta: 31 mayo 2021]. DOI [10.1016/j.enmm.2020.100308](https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100308). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2215153220300015>.

EL-SABAGH, S.M., et al. "API gravities, vanadium, nickel, sulfur, and their relation to gross composition: Implications for the origin and maturation of crude oils in Western Desert, Egypt". *Petroleum Science and Technology* [en línea], 2018, (Egipto) 36, pp. 1421-1428. [Consulta: 31 mayo 2021] ISSN 15322459. DOI [10.1080/10916466.2017.1336774](https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1336774). Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1336774>.

EPA. "Office of Solid Waste and Emergency Response OSWER FY 2016-2017 National Program Manager's Guidance". *Epa*, 2015, pp. 1-18.

FRÍAS, D., 2016. Diseño entre-grupos univariado unifactorial con $A > 2$: Contraste de hipótesis específicas. , pp. 1-24.

FUENTES, M., et al. "Pirólisis y combustión de aceite lubricante usado de automóviles diesel : Descomposición y contaminantes". *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2007, (España) 79, pp. 215-226.

GONZÁLEZ, Cristian. Propuesta de un plan de manejo de aceites lubricantes usados de automóviles para el Estado Carabobo [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad de Carabobo. 2014. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/15365376-Propuesta-de-un-plan-de-manejo-de-aceites-lubricantes-usados-de-automoviles-para-el-estado-carabobo.html>.

GUTIÉRREZ, David & PÉREZ, Valentina. *EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO PARA LA DISMINUCIÓN DE AZUFRE Y METALES PESADOS EN ACEITES LUBRICANTES USADOS DE MOTOR DIÉSEL, COMO POSIBLE ALTERNATIVA PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ.* (Trabajo de titulación). UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, Colombia. 2019. pp. 1-172.

GUTIÉRREZ, M., & DROGUET, M. "La cromatografía de gases y la espectrometría de masas: Identificación de compuestos causantes de mal olor". *Boletín Intexter del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial*, no. 122, (2002). pp. 35-41. ISSN 11316756.

HAMID, A., et al. "Gas Chromatography–Mass Spectrometry of Biofluids and Extracts". *Methods in Molecular Biology* [en línea], 2010, (España), pp. 1-12. [Consulta: 11 Agosto 2021] DOI 10.1007/978-1-4939-2377-9. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/273955959_Gas_Chromatography-Mass_Spectrometry_of_Biofluids_and_Extracts.

HAN, Yehua., et al. "Molecular characterization of sulfur-containing compounds in petroleum". *Fuel*, vol. 221, (2018), (EEUU), pp. 144-158. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2018.02.110.

HERNÁNDEZ, Pedro. "Análisis de la densidad del aceite: cuándo y por qué hacer". *Ayan*. (2018).

IPIALES, R. DESARROLLO DE UNA INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA EL PROCESO DE PIRÓLISIS CATALÍTICA DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO Y POLIESTIRENO [en línea] (Trabajo de titulación). [Tesis] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. 2018. [Consulta: 26 Agosto 2021] Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/8649/1/96T00451.pdf>.

JARAMILLO, D., et al. La degradación de los lubricantes sintéticos y minerales afecta a la operatividad de todo tipo de maquinaria industrial. [en línea] (Trabajo de titulación). [Tesis]. UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA, Ecuador. 2011. [Consulta: 28 Julio 2021] Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1500/14/UPS-CT002022.pdf>.

JONES, J. Diseño De Un Sistema De Reciclaje De Aceite Lubricante Usado [en línea] (Trabajo de titulación). [Tesis]. UNIVERSIDAD DE CHILE, Chile. 2007. [Consulta: 24 Julio 2021] Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116604/cf-bello_gt.pdf?sequence=1.

LAZ, H. Modelado de la tasa de duración del aceite lubricante del motor. *ResearchGate*, (2017), (Sudán), pp. 1-14.

LIN, Y. & YANG, M. Conversión catalítica de residuos poliméricos mezclados en productos químicos y combustibles sobre el catalizador comercial de FCC gastado en un reactor de lecho fluidizado. *ELSIVIER*, vol. 69, (2007), (China), pp. 145-153.

LÓPEZ, P. & FACHELLI, S. Metodología de la investigación cuantitativa. *Universidad Autonoma de Barcelona* [en línea], (2015). Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2016/163564/metinvsocua_a2016_cap1-2.pdf.

LUNA, Y. & BATIDAS, I. GRASAS Y ACEITES LUBRICANTES CON GRADO ALIMENTICIO PARA LAS INDUSTRIAS [en línea] (Trabajo de titulación). [Tesis]. UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL, Ecuador. 2011. [Consulta: 24 Julio 2021]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/4670>.

MACEIRAS, R., et al. "Recycling of waste engine oil for diesel production". *Waste Management*. [en línea], 2017, (España) 60, pp. 351-356. [Consulta: 22 Julio 2021] ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2016.08.009. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16304342?via%3Dihub>

MACIAN, V., et al. Evaluación del rendimiento y la degradación del aceite de baja viscosidad en una prueba de flota real de motores de servicio pesado. *Revistas SAGE*, (2015), DOI <https://doi.org/10.1177/1350650115619612>. pp. 1-15.

MAVDT. "Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados". Ministerio de

Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia [en línea], 2006, (Colombia), pp. 1-90. [Consulta: 27 Julio 2021]. ISSN 958-97878-8-6 Disponible en: www.minambiente.gov.com.

MESA, M. & ORTIZ, C. *Evaluación del proceso de pirolisis para la producción de diesel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos* [en línea] (Trabajo de titulación). [Tesis]. UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA BOGOTÁ, Colombia. 2016. pp. 1-135. [Consulta: 6 Septiembre 2021] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2009.07.006><http://dx.doi.org/10.1016/j.neps.2015.06.001><https://www.abebooks.com/Trease-Evans-Pharmacognosy-13th-Edition-William/14174467122/bd>.

MINAMBIENTE. *Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial* [en línea], 2014. [Consulta: 6 Septiembre 2021]. ISBN 978-958-8491-87-5. Disponible en: <https://acp.com.co/web2017/images/pdf/combustiblesylubricantes/FAU/Manual-AU-final-14.pdf>.

MORO, M. *Tecnología industrial I. 1º Bachillerato LOMCE*. [en línea]. Paraninfo, 2018. [Consulta: 25 Abril 2021]. Disponible en: <https://www.paraninfo.es/catalogo/9788428333665/tecnologia-industrial-i--1%C2%BA-bachillerato-lomce>.

NTE INEN 1489. *PRODUCTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO. DIÉSEL. REQUISITOS*

NTE INEN 2903. *PETRÓLEO Y PRODUCTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA O GRAVEDAD API. MÉTODO DEL HIDRÓMETRO.*

NTE INEN 935. *Productos derivados del petróleo. Gasolina. Requisitos.*

ORTIZ, M. & PILOTO, R. "Aceites lubricantes usados, una alternativa energética". RESEARCHGATE [en línea], 2019, (Cuba), pp. 7- 29. [Consulta: 23 Julio 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/337398056_ACEITES_LUBRICANTES_USADOS_UNA_ALTERNATIVA_ENERGETICA.

QASIM, M., et al. "Combustion, performance, and emission evaluation of a diesel engine with

biodiesel like fuel blends derived from a mixture of Pakistani waste canola and waste transformer oils". *Energies*, (2017), vol. 10. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en10071023. pp. 1-16.

RAMÍREZ, L. & RODRIGUEZ, J. "Estado del arte de sistemas de recuperación de aceites lubricantes usados para la producción de diesel". (2019). ISSN 3224582502. pp. 1-27.

RAZO, A. & RIESCO, J. "Obtención de Combustible Alternativo Mediante Pirólisis de Aceite Lubricante Residual". Encuentro estatal de jóvenes [en línea], 2019, (Mexico) 6, pp. 1-14. [Consulta: 18 Mayo 2021]. Disponible en: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3104>.

SÁNCHEZ, F., et al. "Prediction of Properties of Gasoline-Ethanol Blends By Infrared". *Avances en Ciencias e Ingeniería* [en línea], 2013, (Chile). pp. 1-9. [Consulta: 2 Septiembre 2021]. ISSN 0718-8706. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627690003.pdf>.

SÁNCHEZ, J., et al. *Mantenimiento preventivo de equipos y procesos de plantas de tratamiento de agua y plantas depuradoras* [en línea], 2015. [Consulta: 3 Agosto 2021]. ISBN 978-84-16360-13-0. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=wcZWDwAAQBAJ&pg=PA187&dq=punto+de+inflam#v=onepage&q=punto+de+inflam&f=false>.

SPECTRIS COMPANY. "Fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF)". Malvern Panalytical [en línea], 2021. [Consulta: 2 Septiembre 2021]. Disponible en: <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-fluorescence/energy-dispersive-x-ray-fluorescence>.

SPEIGHT, J. *Handbook of petroleum product analysis*. New Jersey- United States of America, 2015. ISBN 978-1-118-36926-5.

STASHENKO, E. & MARTÍNEZ, J. "La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas como herramienta de alta selectividad para caracterizar fósiles químicos en el petróleo". *Scientia Chromatographica*, vol. 4, 2012, pp. 44-57. DOI 10.4322/sc.2012.010.

SULLIVAN, A. & BALL, R. "Thermal decomposition and combustion chemistry of cellulosic biomass". *Atmospheric Environment*, vol. 47, 2012, pp. 133-141. ISSN 13522310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2011.11.022.

TEJADA, C., et al. "Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje". *Prospectiva*, vol. 15, 2017, pp. 135-144. ISSN 16928261.

ZOUAD, Y., et al. 2019. "Effect of heating rate and additives (MgO and Al₂O₃) on a diesel like-fuel issued from waste engine oil pyrolysis". *Petroleum Science and Technology*, vol. 37, 2019, pp. 1184-1193. ISSN 15322459. DOI 10.1080/10916466.2019.1581810.

ANEXOS

ANEXO A: PODER CALÓRICO DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA A 400°C-60 MINUTOS



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS PETRÓLEOS

Informe N° 21-070.1
Fecha 2021-04-16

Referencia: 21-070
Empresa: PARTICULAR
Atención: Sr. Franklin Jhonny Yuquilema Yucailla
Dirección: Fernando Recalde Pasaje 1 – Riobamba
Tipo de ensayos: Análisis Físicoquímicos
Tipo de muestra: PIRÓLISIS (ACEITE USADO)
Identificación de la muestra: M1
Descripción de la muestra: Muestra en envase de plástico con tapa rosca, sellada
Muestra tomada por: El cliente
Fecha de ingreso de la muestra: 2021-03-30
Código de muestra: 21-070.1
Fecha de realización de ensayos: 2021-03-31 a 2021-04-01

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)
PODER CALÓRICO BRUTO*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 REF. ASTM D-240	45,7458	-

Nota: Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE

Nota: Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.

Observaciones: El poder calórico bruto se determinó sin corrección por contenido de agua y azufre en la muestra.

Condiciones Ambientales. - Presión: 541,9 a 544,3 mm Hg; Temperatura: 18,4 a 20,0 °C

ANEXO B: PODER CALÓRICO Y AZUFRE DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA A 400°C-120 MINUTOS



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
PETRÓLEOS

Informe N° 21-070.2
Fecha 2021-04-16

Referencia: 21-070
Empresa: PARTICULAR
Atención: Sr. Franklin Jhonny Yuquilema Yucailla
Dirección: Fernando Recalde Pasaje 1 – Riobamba
Tipo de ensayos: Análisis Físicoquímicos
Tipo de muestra: PIRÓLISIS (ACEITE USADO)
Identificación de la muestra: M2
Descripción de la muestra: Muestra en envase de plástico con tapa rosca, sellada
Muestra tomada por: El cliente
Fecha de ingreso de la muestra: 2021-03-30
Código de muestra: 21-070.2
Fecha de realización de ensayos: 2021-03-31 a 2021-04-01

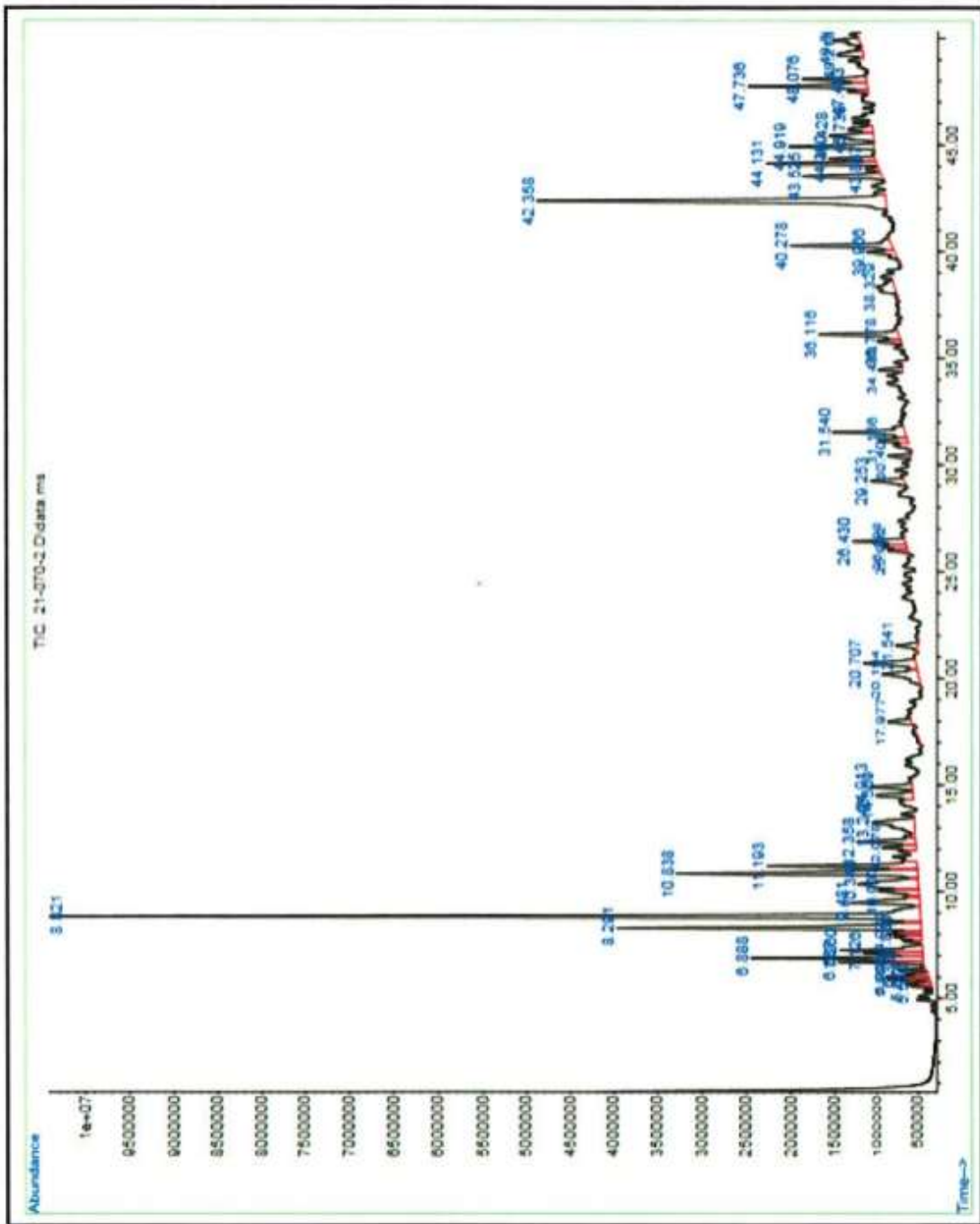
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)
PODER CALÓRICO BRUTO*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 REF. ASTM D-240	45,5165	-
AZUFRE*	°C	PNE/DPEC/MI04 REF. ASTM D-4294	0,1634	-

Nota: Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE
Nota: Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.

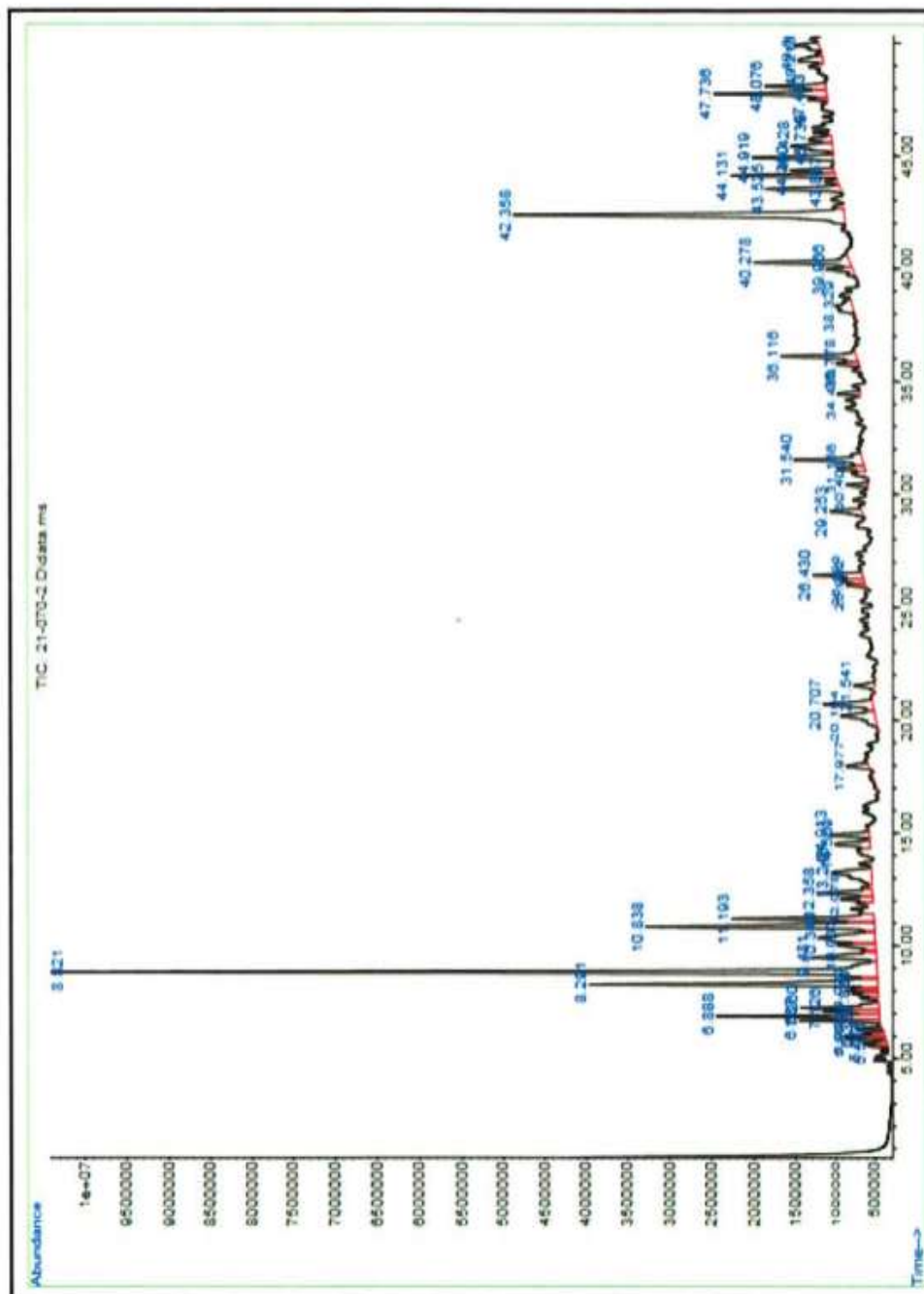
Observaciones: El poder calórico bruto se determinó sin corrección por contenido de agua y azufre en la muestra.

Condiciones Ambientales. - Presión: 541,9 a 544,3 mm Hg; Temperatura: 18,4 a 20,0 °C

ANEXO C: CROMATOGRAMA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA A 350°C-60 MINUTOS.



ANEXO D: CROMATOGRAMA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA A 400°C-120 MINUTOS.





esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

*UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL*

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 26 / 04 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Franklin Jhonny Yuquilema Yucailla</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Química</i>
Título a optar: <i>Ingeniero Químico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

LEONARDO
FABIO
MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO
FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC,
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION-ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.04.26 11:12:06 -05'00'



2094-DBRA-UTP-2021