

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Obtención de diesel #2 sintético a partir de aceites lubricantes usados

Brenda Aguirre Ortega

Tesis de grado presentada como requisito para la
obtención del título de Ingeniero Químico

Quito
Enero de 2010

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería el Politécnico**

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Obtención de diesel #2 sintético a partir de aceites lubricantes usados

Brenda Aguirre Ortega

Daniela Almeida, Dr-Ing.

.....

Directora de Tesis y
Miembro del Comité de Tesis

Alexis Hidrobo, Ph.D.

.....

Miembro del Comité de Tesis

Carlos Fabara, M.S.

.....

Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo, M.S.

.....

Decano del Colegio de Ciencias
e Ingeniería el Politécnico

Quito, enero de 2010

© Derechos de Autor
Brenda Aguirre Ortega
2010

Resumen

Hasta hace poco tiempo el aceite lubricante usado constituía un desecho contaminante que no tenía ningún tipo de tratamiento y es por esto que se convirtió en un importante agente contaminante del agua. Desde los años 90, países y organizaciones alrededor del mundo han incentivado la investigación de métodos de reciclaje de aceites lubricantes usados para demostrar que el aceite usado es una importante materia prima para producir aceite lubricante limpio y combustibles líquidos.

Este trabajo presenta al aceite usado como materia prima hacia la producción de combustibles líquidos. Se exponen cuatro fases que son: caracterización del aceite usado de motores a gasolina, puesta en marcha de experimentos para la producción de combustible, caracterización del producto principal y el diseño de una planta piloto de producción de combustible a partir de aceite lubricante usado. En cuanto a la primera fase, se muestran datos experimentales de medición de propiedades del aceite lubricante usado, con el fin de conocer la materia prima a ser utilizada. En cuanto a los experimentos, se diseñaron una serie de experimentos para recopilar datos que permitan la delineación de la planta piloto. Los experimentos estuvieron conducidos hacia la producción de un combustible que cumpla con las propiedades del diesel #2. Es por esto que en la tercera fase del proyecto se determinan las propiedades del producto para poder compararlo con el diesel #2 comercial. Finalmente en el diseño se exponen las dimensiones de cada equipo de acuerdo a una producción diaria estimada de 19 L de diesel #2 sintético.

Abstract

The disposal of used lubricating oils can be an activity environmentally harmful, because it contaminates the water. Fortunately, since the 90's, many countries and organizations around the world have encouraged the investigation to recover and reuse these oils, showing that used lubricating oil can be an important source of clean lubricating oil and liquid fuel.

The purpose of this study is to expose the used lubricating oil as a source of liquid fuel. The study consists of four parts: characterization of used lubricating oil, experimental results of the conversion of lubricating oil into fuel, final product characterization and design of a pilot plant to produce fuel from used lubricating oil. In the first part, the experimental results of the characterization of used lubricating oil are presented. In the second part, the text presents detailed information about the conversion experiments. These results are used to scale up the pilot plant. The experiments were focused on the production of a liquid fuel that had accomplished with the properties of diesel fuel #2. Due to this fact, the third phase is the characterization of the product to compare it with diesel fuel #2. Finally, the last phase is the design of the pilot plant and the dimensioning of the equipments according to a daily production of 19 L of synthetic diesel fuel #2.

Tabla de Contenidos

1	INTRODUCCIÓN	17
1.1	ANTECEDENTES	17
1.2	DEFINICIÓN DEL PROYECTO	17
1.3	OBJETIVOS Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN	18
2	MARCO TEÓRICO	19
2.1	CONTAMINACIÓN PRESENTE EN EL ACEITE LUBRICANTE USADO.....	19
2.1.1	<i>Impurezas</i>	<i>19</i>
2.1.2	<i>Productos de deterioración.....</i>	<i>20</i>
2.1.3	<i>Efectos contaminantes en el aceite lubricante.....</i>	<i>20</i>
2.2	PROBLEMÁTICA DEL MANEJO DEL ACEITE USADO.....	21
2.3	RECICLAJE DE ACEITE USADO	22
2.3.1	<i>Regeneración.....</i>	<i>22</i>
2.3.2	<i>Transformación del aceite lubricante usado en combustible</i>	<i>25</i>
3	MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	28
3.1	MATERIALES Y EQUIPOS	28
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE USADO	29
3.2.1	<i>Métodos de ensayo</i>	<i>29</i>
3.2.2	<i>Pruebas fisicoquímicas.....</i>	<i>30</i>
3.2.3	<i>Contenido de metales y azufre.....</i>	<i>39</i>
3.2.4	<i>Ensayo de destilación.....</i>	<i>41</i>
3.3	PROCESOS DE CONVERSIÓN DEL ACEITE USADO.....	41
3.3.1	<i>Proceso de craqueo térmico</i>	<i>42</i>
3.3.2	<i>Proceso de destilación atmosférica.....</i>	<i>43</i>
3.3.3	<i>Rectificación.....</i>	<i>44</i>
3.3.4	<i>Proceso de filtración</i>	<i>45</i>
3.4	CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO FINAL.....	45
3.4.1	<i>Métodos de ensayo para verificar cumplimiento de requisitos del diesel #2 ...</i>	<i>46</i>
3.4.2	<i>Método para la obtención de espectros infrarrojos para el diesel #2 comercial y el producto final.....</i>	<i>50</i>

3.5	MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DE CRAQUEO TÉRMICO	51
3.5.1	<i>Método Integral</i>	51
3.5.2	<i>Método Diferencial</i>	53
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES DEL PROCESO EXPERIMENTAL	54
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE USADO	54
4.1.1	<i>Contenido de Azufre</i>	55
4.1.2	<i>Viscosidad cinemática e Índice de viscosidad</i>	56
4.1.3	<i>Gravedad API</i>	57
4.1.4	<i>Punto de Inflamación</i>	58
4.1.5	<i>Destilación</i>	58
4.1.6	<i>Corrosión a la lámina de cobre</i>	59
4.1.7	<i>Contenido de Agua</i>	59
4.1.8	<i>Número Total de Base (TBN)</i>	60
4.1.9	<i>Contenido de Metales</i>	60
4.2	PROCESO DE CONVERSIÓN DEL ACEITE USADO EN COMBUSTIBLE LÍQUIDO.....	61
4.2.1	<i>Craqueo térmico</i>	61
4.2.2	<i>Destilación Fraccionada</i>	64
4.2.3	<i>Rectificación</i>	66
4.2.4	<i>Filtración</i>	67
4.3	COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS DE CADA PROCESO.....	69
4.3.1	<i>Contenido de Azufre</i>	70
4.3.2	<i>Viscosidad Cinemática a 37.8°C</i>	71
4.3.3	<i>Gravedad API a 15.6 °C</i>	72
4.3.4	<i>Punto de Inflamación</i>	73
4.3.5	<i>Destilación</i>	74
4.3.6	<i>Corrosión a la lámina de cobre</i>	75
4.3.7	<i>Contenido de Agua y Color</i>	75
4.4	COMPARACIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO CON DIESEL #2 COMERCIAL	76
4.4.1	<i>Comparación de las propiedades fisicoquímicas</i>	76
4.4.2	<i>Comparación de los espectros IR</i>	77
5	DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DE OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO A PARTIR DE ACEITE LUBRICANTE USADO	80
5.1	DEFINICIÓN DEL PROCESO A UTILIZARSE	80
5.2	OBTENCIÓN DE LA CONVERSIÓN, RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD DE LA REACCIÓN QUÍMICA DEL PROCESO.....	81

5.3	ESTUDIO CINÉTICO PARA OBTENER LA ECUACIÓN DE VELOCIDAD DEL CRAQUEO TÉRMICO	84
5.4	BALANCE DE MATERIALES	86
5.5	BALANCE TÉRMICO.....	86
5.5.1	<i>Requerimiento de adición de energía calórica en el reactor de craqueo térmico</i>	88
5.5.2	<i>Requerimiento de remoción de energía calórica en la columna de destilación...</i>	89
5.6	DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS	90
5.6.1	<i>Tanque de decantado y recepción de materia prima.....</i>	90
5.6.2	<i>Reactor de craqueo térmico</i>	91
5.6.3	<i>Columna de destilación</i>	93
5.6.4	<i>Filtro de sílica gel</i>	97
5.6.5	<i>Tanques de almacenamiento para los productos medio y final.....</i>	99
5.6.6	<i>Tanque de almacenamiento para hidrocarburos livianos</i>	100
5.6.7	<i>Intercambiadores de calor</i>	100
5.7	DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE BOMBAS.....	103
5.7.1	<i>Bomba (P₁)</i>	104
5.7.2	<i>Bomba (P₂)</i>	105
5.7.3	<i>Bomba (P₃)</i>	107
5.7.4	<i>Bomba (P₄)</i>	108
6	CONCLUSIONES	110
7	RECOMENDACIONES	112
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
9	ANEXOS	117

Lista de Figuras

Figura 2. 1: Diagrama de flujo del proceso de craqueo térmico.....	26
Figura 3. 1: Medidor de Conductividad Hach Modelo CO150	32
Figura 3. 2: Baño Kohler KV 3000	33
Figura 3. 3: Equipo para determinación del punto de inflamación.....	35
Figura 3. 4: Centrífuga de líquido L-K industries 699C.....	37
Figura 3. 5: Escala para la prueba de corrosión a lámina de cobre	38
Figura 3. 6: Equipo de determinación de contenido de azufre en hidrocarburos (HORIBA SLFA 2800)	40
Figura 3. 7: Diagrama de bloques del proceso de conversión de aceite usado	42
Figura 3. 8: Equipo de destilación (Precision Scientific Petroleum Herzog)	43
Figura 3. 9: Esquema del proceso de filtración	45
Figura 3. 10: Equipo para realizar la prueba de Carbón Conradson.....	48
Figura 4. 1: Muestra de aceite usado	54
Figura 4. 2: Contenido de Azufre	56
Figura 4. 3: Viscosidad a 40°C y 70°C	57
Figura 4. 4: Gravedad API	57
Figura 4. 5: Punto de Inflamación	58
Figura 4. 6: Destilación	59
Figura 4. 7: Contenido de Agua	60
Figura 4. 8: Contenido Metálico	61
Figura 4. 9: Temperatura de craqueo vs tiempo	62
Figura 4. 10: Conversión del proceso de craqueo vs tiempo	63
Figura 4. 11: Producto del craqueo térmico	64
Figura 4. 12: Volumen destilado vs temperatura.....	65
Figura 4. 13: Volumen destilado vs tiempo	66
Figura 4. 14: Hidrocarburos medios.....	66
Figura 4. 15: Volumen filtrado vs tiempo	67
Figura 4. 16: Producto final filtrado.....	68
Figura 4. 17: Porcentajes de productos obtenidos a partir del aceite lubricante usado	69
Figura 4. 18: Contenido de Azufre	71
Figura 4. 19: Viscosidad Cinemática a 37.8°C	72

Figura 4. 20: Gravedad API a 15.6 °C	73	
Figura 4. 21: Punto de Inflamación	74	
Figura 4. 22: Destilación	75	
Figura 4. 23: Diesel #2 comercial	Figura 4. 24: Producto final	77
Figura 4. 25: Espectros IR para diesel #2 comercial y producto final	80	
Figura 5. 1: Diagrama de Flujo del proceso de conversión de aceite usado en combustible líquido	81	
Figura 5. 2: Concentración vs tiempo	85	
Figura 5. 3: Grafica lineal basada en la ecuación 3.20	85	
Figura 5. 4: Tanque de almacenamiento y decantado	91	
Figura 5. 5: Reactor de craqueo térmico	93	
Figura 5. 6: Esquema de la columna de destilación	97	
Figura 5. 7: Esquema del equipo de filtración.....	99	
Figura 5. 8: Esquema de los tanques de almacenamiento	100	
Figura 5. 9: Tramo para la primera bomba.....	104	
Figura 5. 10: Tramo para la segunda bomba	106	
Figura 5. 11: Tramo para la tercera bomba	107	
Figura 5. 12: Tramo para la cuarta bomba	108	
Figura 9. 1: Gráfica para corregir el caudal, para la selección de bombas	118	
Figura 9. 2: Gráfica para corregir la altura, para la selección de bombas	119	
Figura 9. 3: Gráfico para determinar la potencia.....	123	

Lista de Tablas

Tabla 2. 1: Fracciones de aceite pre-tratado	24
Tabla 3. 1: Pruebas realizadas a las diferentes muestras de aceite usado	29
Tabla 3. 2: Requisitos del diesel #2	46
Tabla 3. 3: Datos para obtener la ecuación de velocidad por el método integral	52
Tabla 3. 4: Datos para obtener la gráfica final en el método integral	52
Tabla 3. 5: Datos para la ecuación de velocidad por el método diferencial	53
Tabla 4. 1: Resultados de la caracterización de aceite usado	55
Tabla 4. 2: Resultados de los metales presentes en el aceite usado	60
Tabla 4. 3: Resultados del proceso de destilación fraccionada.....	64
Tabla 4. 4: Resultados del proceso de rectificación	67
Tabla 4. 5: Evolución de las propiedades luego de cada proceso	69
Tabla 4. 6: Puntos de inflamación para hidrocarburos combustibles	73
Tabla 4. 7: Resultados de propiedades para diesel comercial y producto final	76
Tabla 4. 8: Comparación de frecuencias de absorción en el rango infrarrojo	77
Tabla 5. 1: Concentración del reactivo y el producto, de acuerdo al tiempo	82
Tabla 5. 2: Ecuaciones de conversión, rendimiento y selectividad	83
Tabla 5. 3: Datos para la obtención de conversión, rendimiento y selectividad.....	83
Tabla 5. 4: Datos para obtener la ecuación de velocidad por el método diferencial.....	84
Tabla 5. 5: Descripción de los flujos dentro del balance de materiales	86
Tabla 5. 6: Ecuaciones necesarias para realizar el balance térmico.....	87
Tabla 5. 7: Densidad para reactivos y productos	87
Tabla 5. 8: Entalpía y capacidad calorífica a 25 °C y 355 °C.....	88
Tabla 5. 9: Valores de los términos de la ecuación 5. 7	89
Tabla 5. 10: Suposiciones para los productos de la destilación.....	89
Tabla 5. 11: Calores a ser removidos para enfriar los productos de la destilación	90
Tabla 5. 12: Datos para el diseño del tanque de almacenamiento y decantado	91
Tabla 5. 13: Resultados del tanque de almacenamiento y decantado	91
Tabla 5. 14: Ecuaciones utilizadas en el diseño del reactor de craqueo térmico	92
Tabla 5. 15: Datos para el diseño del reactor de craqueo térmico	92
Tabla 5. 16: Resultados del diseño del reactor de craqueo térmico.....	92
Tabla 5. 17: Número de platos empleados en los equipos industriales	93
Tabla 5. 18: Composición de los flujos de la destilación	94
Tabla 5. 19: Datos para obtener el diámetro de la columna	96

Tabla 5. 20: Datos experimentales de la filtración	97
Tabla 5. 21: Tiempo de filtración, volumen y dimensiones del filtro de sílica gel	98
Tabla 5. 22: Volúmenes de los recipientes recolectores	98
Tabla 5. 23: Datos para el diseño de los tanques de almacenamiento	99
Tabla 5. 24: Resultados del tanque de almacenamiento	99
Tabla 5. 25: Datos para el diseño del tanque de almacenamiento de livianos	100
Tabla 5. 26: Resultados del tanque de almacenamiento y decantado	100
Tabla 5. 27: Ecuaciones para el diseño de los intercambiadores de calor	101
Tabla 5. 28: Datos de calor y temperaturas para cada intercambiador	101
Tabla 5. 29: Resultados del intercambiador 1	102
Tabla 5. 30: Resultados del intercambiador 2	102
Tabla 5. 31: Resultados del intercambiador 3	103
Tabla 5. 32: Datos para seleccionar la primera bomba.....	104
Tabla 5. 33: Características de la primera bomba.....	105
Tabla 5. 34: Datos para seleccionar la segunda bomba	106
Tabla 5. 35: Características de la primera bomba.....	107
Tabla 5. 36: Datos para seleccionar la primera bomba.....	107
Tabla 5. 37: Características de la primera bomba.....	108
Tabla 5. 38: Datos para seleccionar la primera bomba.....	108
Tabla 5. 39: Características de la primera bomba.....	109
Tabla 9. 1: Longitudes equivalentes a pérdidas localizadas	120
Tabla 9. 2: Longitudes equivalentes a pérdidas por fricción en la tubería.....	121

Nomenclatura

A: Reactivo

A_I: Constante para obtener el índice de viscosidad (-)

A_e: Área del intercambiador de calor (m²)

A_m: Peso del residuo carbonoso (g)

API: Grados API a 15.6 °C (°API)

b: Volumen correspondiente a la titulación del blanco (solvente de titulación) (mL)

B_I: Constante para obtener el índice de viscosidad (-)

C: Constante del viscosímetro (mm²/s²)

C_A: Concentración del reactivo *A* (gmol/L)

C_{A0}: Concentración inicial de un reactivo (gmol/L)

C_e: Contenido de cenizas (% en peso)

C_p: Capacidad calorífica (J/g°C)

C_{pH₂O}: Capacidad calorífica del agua (J/g°C)

D: Densidad de la muestra de diesel #2 a 15°C (kg/m³)

D_c: Diámetro de la columna (m)

E: Volumen de ácido perclórico (mL)

F: Volumen del solvente de titulación (mL)

f₁: Factor de corrección de caudal (-)

f₂: Factor de corrección de la altura (-)

g: Peso específico (g/mL)

H: Viscosidad cinemática a 40°C de un aceite con índice de viscosidad de 100 (cSt)

h: Altura de la columna (m)

h_c: Altura corregida (m)

H_p: Entalpía de los productos (J/gmol)

H_R: Entalpía de los reactivos (J/gmol)

ΔH_R : Entalpía de la reacción de craqueo térmico (J/gmol)

IC_c: Índice de cetano calculado (-)

k: Constante de la velocidad (Lⁿ⁻¹/gmolⁿ⁻¹s)

K: Producto

L: Viscosidad cinemática a 40°C de un aceite con 0 índice de viscosidad (cSt)

L_c: Longitud de la columna (m)

M_I: Peso de la ceniza obtenida (g)

M_a: Cantidad de muestra de aceite usado (g)

M_f: Cantidad de agua de enfriamiento (g)

M_o: Peso de la muestra original (g)

n: Orden de reacción (-)

N: Normalidad de la solución de ácido perclórico (N)

N_A: Número final de moles de *A* (mol)

N_{A0}: Número inicial de moles de *A* (mol)

N_K: Número final de moles (mol)

N_{K0}: Número inicial de moles de *K* (mol)

NP: Número de platos (-)

p: Presión barométrica observada (mm de Hg)

- ρ : Densidad (g/cm^3)
 PI : Punto de inflamación observado ($^{\circ}\text{C}$)
 PIc : Punto de inflamación corregido ($^{\circ}\text{C}$)
 q : Calor transferido (W)
 Q : Calor que debe ser añadido para llevar a cabo la reacción (J/ s)
 R : Relación entre el volumen del filtro y el volumen del líquido a ser filtrado (-)
 r_A : Velocidad de reacción (gmol/L s)
 Rc : Porcentaje del peso del residuo carbonoso con respecto al peso de la muestra
 S_{KA} : Selectividad de K sobre A
 t : Tiempo de flujo (s)
 T : Temperatura (K)
 T_B : Temperatura del 50% del destilado de la muestra de diesel #2 a 760 mm de Hg ($^{\circ}\text{C}$)
 TBN : Número total de base (mg KOH/g)
 $TBNe$: Número total de base que se espera obtener (mg KOH/g)
 $T_{c,i}$: Temperatura del líquido frío al inicio
 $T_{c,o}$: Temperatura del líquido frío al final
 tF : Tiempo de reacción del 80% del reactivo (s)
 t_f : Tiempo de filtración (min)
 $T_{h,i}$: Temperatura del líquido caliente al inicio
 $T_{h,o}$: Temperatura del líquido caliente al final
 ΔT_1 : Diferencia de temperaturas de los líquidos caliente y frío a condiciones iniciales
 ΔT_2 : Diferencia de temperaturas de los líquidos caliente y frío a condiciones finales
 ΔT_3 : Cambio de temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$)
 ΔT_{ml} : Diferencia de temperaturas media logarítmica
 U : Viscosidad cinemática a 40°C del aceite lubricante usado (cSt)
 U_g : Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
 ν : Viscosidad cinemática(cSt)
 V_a : Volumen de la solución de ácido perclórico (mL)
 $\left(\frac{V_A}{V_k}\right)$: Factor estequiométrico (-)
 V_c : Volumen de la columna (m^3)
 VI : Índice de viscosidad (-)
 V_L : Volumen de la carga (L)
 v_f : Velocidad de filtración (L/min)
 V_f : Volumen del filtro (L)
 W_p : Peso de ftalato de potasio (g)
 X_A : Conversión de A (-)
 Y : Viscosidad cinemática a 100°C del aceite lubricante usado (cSt)
 Y_{KA} : Rendimiento de K sobre A
 z : Variable de apoyo
 Z : Caudal original (m^3/s)
 Zc : Caudal corregido (m^3/s)

1 Introducción

1.1 Antecedentes

En esta tesis se investigará la factibilidad de la transformación del aceite lubricante usado de automóvil en diesel #2 sintético. De acuerdo con una publicación de la Universidad Central del Ecuador [1], en el 2005 existían 1951 establecimientos generadores de aceite usado de automóvil en la ciudad de Quito. Esto representa, solamente en la ciudad de Quito, aproximadamente 3.7 millones de galones por año. Como una medida de control, el Municipio de Quito ha entregado la concesión de la recolección y disposición final de este aceite a la compañía Biofactor, la cual recolecta el 23% del aceite generado. Este aceite usado es utilizado como combustible en la industria “Papelera Nacional”, la cual dispone de hornos de combustión.

El reciclaje de aceite usado de automóviles es una opción ambiental y económicamente atractiva que se ha considerado en el Ecuador y en algunos países alrededor del mundo. El 29 de marzo de 2008, el Diario El Comercio [2] publicó que en la provincia de Loja se instalará una planta de reciclaje de aceite usado de motor, esta planta fue diseñada por Petroproducción y se encuentra en funcionamiento desde el año 2009. Asimismo, según La Unidad de Planeación Minero Energética [3], en Colombia también se desarrolló una planta que transforma el aceite usado en fuel oil. De la misma manera que Ecuador y Colombia se han preocupado de transformar los desechos aceitosos, en Estados Unidos se desarrolló una patente a cargo de Wansbrough [4] con la que se transforma el aceite usado en diesel #2.

Tanto en el Ecuador como en el mundo entero se buscan alternativas para evitar la contaminación producida por el aceite usado de motor de automóviles y desarrollar nuevas fuentes energéticas para la obtención de combustibles.

1.2 Definición del proyecto

La propuesta de esta tesis es diseñar una planta piloto de combustible sintético a partir de aceite lubricante usado. El procedimiento para la conversión de aceite lubricante usado en

diesel #2 es una adaptación de la patente de Wansbrough [4], salvo los procesos de rectificación y filtración. Para esto se definen cuatro puntos principales en la investigación: la caracterización del aceite usado, recopilación de datos de cada proceso químico experimental, caracterización del producto obtenido y finalmente el diseño de la planta en base a los dos primeros puntos. En la caracterización del aceite usado se realizan varias pruebas normadas que permiten determinar características físicas y químicas de la materia prima con la que se parte. En la parte de recopilación de datos se realizan varios experimentos con los cuales se generan datos para cada uno de los procesos de conversión del aceite lubricante usado en combustible líquido. Después de obtener el producto deseado, se realizan las pruebas normadas requeridas para el diesel #2, con el fin de comparar ambos combustibles. Finalmente, con los datos generados en la segunda parte, se diseñan los equipos de la planta piloto con capacidad de producción de 19 L de diesel #2 sintético por día.

1.3 Objetivos y propuesta de solución

El objetivo final de este proyecto es desarrollar un método para transformar en combustible el aceite lubricante usado que se genera en la ciudad de Quito. Este proyecto se lleva a cabo como trabajo inicial del proyecto de construcción de una planta piloto generadora de combustible a partir de desechos de aceite.

Los objetivos específicos dentro del proceso que se llevará a cabo son los siguientes:

- Caracterizar el aceite usado de motor.
- Desarrollar una tecnología para obtener diesel#2 sintético a partir de aceite lubricante usado de motor por el método de craqueo térmico.
- Caracterizar el producto obtenido y compararlo con diesel #2 comercial.
- Diseñar una planta piloto de obtención de combustible a partir de aceite lubricante usado.

Con el desarrollo de estos objetivos, se pretende diseñar una planta piloto que permita convertir el aceite lubricante usado en combustible sintético apto para el funcionamiento de automóviles con motor a diesel #2.

2 Marco Teórico

2.1 Contaminación presente en el aceite lubricante usado

Los aceites lubricantes son fracciones de petróleo refinado usados para disminuir la fricción entre superficies en movimiento. A los aceites lubricantes se les añade aditivos para mejorar propiedades como la acción detergente y anticorrosiva, Guthrie [5].

El aceite lubricante pierde su efectividad durante la operación debido a la presencia de contaminantes. Estos contaminantes llegan a un punto crítico de saturación en el aceite lubricante a los 3 meses de uso o 3000 Km de recorrido en un automóvil. Dichos contaminantes o sustancias ajenas a la composición normal del aceite lubricante, se han dividido en impurezas y productos de deterioración. A continuación se detalla cada uno y se presentan los efectos de los contaminantes en el aceite lubricante.

2.1.1 Impurezas

Las impurezas se introducen en el aceite desde el aire o desde el motor en el cual el lubricante actúa. De acuerdo con Guthrie [5], los principales contaminantes son:

- Partículas metálicas: estas pueden provenir del proceso de desgaste del motor.
- Partículas carbonosas: provienen de procesos de combustión incompleta.
- Óxidos metálicos: creados por la corrosión de metales con la ayuda de materiales ácidos.
- Agua: proviene del depósito para enfriamiento y del proceso de combustión.
- Combustible o aditivos: podrían filtrarse dentro del aceite.

2.1.2 Productos de deterioración

Estos productos, distintos de las impurezas, se presentan en el aceite lubricante como resultado de cambios físicos y químicos ocasionados por la exposición a altas temperaturas y también por el tiempo de uso del mismo. De acuerdo con Guthrie [5], algunos de estos productos son:

- Lodo: proviene de la mezcla de aceite y partículas de carbón, agua, polvo o suciedad.
- Laca: puede ser dura o de textura gomosa, también se la llama barniz. Esta se deposita en el motor y es el resultado de someter los lodos formados a altas temperaturas.
- Productos solubles en aceite: son el resultado de la oxidación del aceite. Estos productos no pueden ser expulsados y no se depositan en partes del motor.
- Productos insolubles en aceite: estos también son resultado de la oxidación del aceite, pero sí pueden ser expulsados. Se depositan en partes del motor.

2.1.3 Efectos contaminantes en el aceite lubricante

El factor más importante para determinar la vida útil de un lubricante es la presencia de contaminantes que afecten la vida y eficiencia de los dispositivos que son lubricados así como la vida del lubricante. Los efectos de algunos de los contaminantes se presentan a continuación, de acuerdo con Guthrie [5]:

- Agua: incluso en pequeñas cantidades promueve la formación de emulsiones, a partir de polvos de hierro y acero. Además el agua contribuye a la deterioración de lubricantes y aditivos demulsificantes.
- Partículas abrasivas: son constituidas por suciedad, polvo, arena y fragmentos metálicos. El uso excesivo, rayado de superficies y la fatiga del metal, son las causas de este tipo de contaminación.
- Lodo: este es la combinación de agua y suciedad. Produce depósitos en las partes bajas del sistema del aceite. Si el lodo se calienta formará una sustancia gomosa,

llamada laca. Este tipo de lodo causa que las válvulas se bloqueen e interfieran con la circulación del aceite.

- Contaminantes líquidos: estos son combustibles que no han sido quemados, los cuales diluyen al aceite bajando su viscosidad y capacidad calorífica.

2.2 Problemática del manejo del aceite usado

Según Blount [6], hay varios puntos que deben ser señalados con respecto a la contaminación ocasionada por el aceite usado:

- El aceite usado no se debe verter: un litro puede contaminar un millón de litros de agua. Esta contaminación vuelve al agua tóxica tanto para humanos como para animales y plantas.
- El aceite usado no se debe quemar incontroladamente: cinco litros contaminan el aire que una persona puede respirar durante tres años. Esto es porque genera dióxido de azufre el cual afecta a las vías respiratorias y además se desprenden del aceite usado compuestos aromáticos los cuales son cancerígenos.
- Un litro de aceite de motor usado vertido sobre el agua, puede formar una mancha de 4000 m² sobre el agua.

Nuevamente, tomando la idea de Blount [6], la importancia del reciclaje del aceite usado se puede apreciar en los siguientes datos:

- La demanda mundial de aceite lubricante usado se estima aproximadamente en 40 millones de ton/año.
- De esta cantidad, se toma como base el hecho que el 60% queda transformado en aceite usado, esto representa 24 millones de ton/año. Por su compleja composición, el aceite usado es uno de los más grandes contaminantes.

Aparentemente el manejo del aceite lubricante usado es un problema, sin embargo, es una oportunidad porque constituye una materia prima secundaria para la elaboración de combustibles y aceite limpio. Considerando al aceite lubricante usado de esta forma, la problemática encuentra su final, ya que de ser un residuo peligroso pasa a ser una fuente de energía.

2.3 Reciclaje de aceite usado

Los aceites usados son considerados como residuos peligrosos de acuerdo con casi todas las legislaciones del mundo. Sin embargo, representan una materia prima muy rica, capaz de ser regenerada como aceite lubricante o transformada en combustible por medio de diferentes métodos presentados a continuación.

2.3.1 Regeneración

La regeneración se refiere a la recuperación del aceite lubricante con sus propiedades originales. Es decir que la regeneración permite eliminar todos los contaminantes que contiene el aceite usado. Hay varios métodos de regeneración, en este texto se explicarán el tratamiento con solventes y la destilación al vacío.

2.3.1.1 Tratamiento con solventes

El tratamiento de aceite lubricante usado con solventes consiste en una extracción líquido/líquido entre dos líquidos miscibles. En esta operación las impurezas y los productos de deterioración se vuelven flóculos y sedimentan, mientras que el aceite lubricante y el solvente se mezclan.

Según los estudios de Firas y Dumitru [7], varios científicos han aportado con experimentos y obtención de datos en cuanto al tratamiento de aceite lubricante usado con solventes. Primeramente Whisman et al [8] trabajaron con una mezcla ternaria de 2-propanol, 1-butanol y butanona. Ellos demostraron que la relación que permitió la eliminación óptima de lodos y a la vez evitó una re-dilución de materiales extraídos del

aceite usado fue (1:2:1); es decir que se utilizaron dos volúmenes de 1-butanol, un volumen de 2-propanol y un volumen de butanona. Además para el tratamiento se mezclaron tres volúmenes de solvente con un volumen de aceite usado.

Después, Snow y Delay [9] desarrollaron estudios con la mezcla ternaria de 2-propanol, 1-butanol y acetona. Esta mezcla, a diferencia de la anterior permite la eliminación de resinas, es decir polímeros formados a partir de olefinas reactivas presentes en el aceite usado. Para el tratamiento se utilizó una relación de solvente aceite de 8 a 1.

Por otro lado, Reis y Jeronimo [10] estudiaron el desempeño de las cetonas y alcoholes, los cuales son miscibles en el aceite lubricante a temperatura ambiente y además permiten la formación de flóculos, es decir partículas agregadas formando un cuerpo sólido. Su estudio se enfocó en la búsqueda de un solvente capaz de extraer las impurezas y productos de deterioración por medio de la floculación. Para esto el solvente óptimo debía cumplir con dos condiciones: ser miscible con el aceite lubricante y excluir en la solución formada aditivos y partículas dispersas. Con estas dos condiciones se permite la agregación de las impurezas y productos de deterioración para que el tamaño de partícula de los flóculos sea lo suficientemente grande para poder ser separado del líquido mediante sedimentación.

Finalmente, Reis y Jeronimo [10] determinaron que la cetona y los alcoholes que tienen cuatro átomos de carbono o más, son solventes que cumplen con las dos condiciones de extraer y flocular.

2.3.1.2 Destilación al vacío

La destilación al vacío consiste en separar al aceite lubricante de las impurezas y productos de deterioración utilizando presiones muy bajas para evitar el craqueo térmico y conservar la composición del aceite lubricante.

De acuerdo con Firas y Dumitru [7], la destilación al vacío puede ser aplicada en aceites sin pre-tratamiento y en aceites que han sido tratados con extracción por solvente. Whisman et al [8] reportaron experimentos en la destilación de aceite usado en un reactor discontinuo con una relación de reflujo de 5 a 1 en una columna de 30 mm por 120 mm, con 15 platos teóricos. La destilación fue realizada a una presión de 10 mm Hg y la

temperatura era de 385 °C, corregida a presión atmosférica. Prácticamente no se obtuvo producto alguno. Siguiendo con la idea de Firas y Dimitru [7], el aceite formó una solución gelatinosa en el recipiente. Se produjo un craqueo considerable que fue indicado por la generación de gases con olor.

Luego de experimentar con un reactor discontinuo, Whisman et al [8] probaron con una columna de destilación continua, la cual mostró buenos resultados. Además, Whisman et al [8] mostraron que para destilar 1175 g de aceite usado se requería de 12 horas, el tiempo disminuiría si se eliminaba previamente el agua y los componentes livianos. La destilación continua resultó ser efectiva en cuanto a la remoción de material inorgánico mostrado por los residuos de carbón, cenizas de sulfatos y pentano insoluble. De acuerdo con Whisman et al [8] las condiciones de operación óptimas son a temperatura constante de 316°C y a presión de 5 mm de Hg.

Por otro lado, Snow y Delaney [9] trabajaron con aceite de alto peso molecular, entre las temperaturas 150°C y 270°C y a una presión de 6 mm Hg. Al igual que Whisman et al [8], Snow y Delaney [9] tuvieron el problema de formación de resinas que ensuciaron el equipo, un problema común para investigadores que tratan con destilación de aceite lubricante usado.

La Tabla 2.1 muestra el porcentaje de recuperación de aceite lubricante con respecto a la temperatura:

Tabla 2. 1: Fracciones de aceite pre-tratado

Punto de Ebullición (°C)	Recuperado (% vol)	Viscosidad cSt (40°C)
*PIE-371	2.1	-
371-404	26.4	20
407-427	23.6	38
427-463	25	-
463+	14.3	-
Pérdidas	8.6	-
Total	100	-

*PIE: punto inicial de ebullición

2.3.2 Transformación del aceite lubricante usado en combustible

Este método se refiere a la conversión del aceite lubricante usado en hidrocarburos de cadenas más cortas que pueden ser utilizados como combustibles. Para romper las cadenas largas del aceite lubricante existen dos métodos: craqueo térmico y el craqueo catalítico.

2.3.2.1 Craqueo térmico

El craqueo térmico es la degradación de cadenas de hidrocarburos pesados en livianos, usando altas temperaturas y sin usar catalizador, Rittner [11]. Se usa en el refinamiento de petróleo y también para convertir gasolina en nafta.

Wansbrough [4] presenta en su patente “Proceso para convertir aceite usado de motor en diesel” una detallada metodología del proceso investigado. El craqueo térmico usa temperaturas que van desde 329 °C a 371 °C a presión atmosférica. Se ha encontrado que el aceite usado puede ser craqueado a condiciones poco severas para poder producir diesel #2 y fuel oil #3.

Los compuestos livianos están constituidos por nafta y gases de hidrocarburos. El diesel #2 está formado por hidrocarburos de cadenas que van de doce a veinte carbonos y el fuel oil #3 está formado por compuestos pesados, es decir con cadenas de carbonos mayores a veinte.

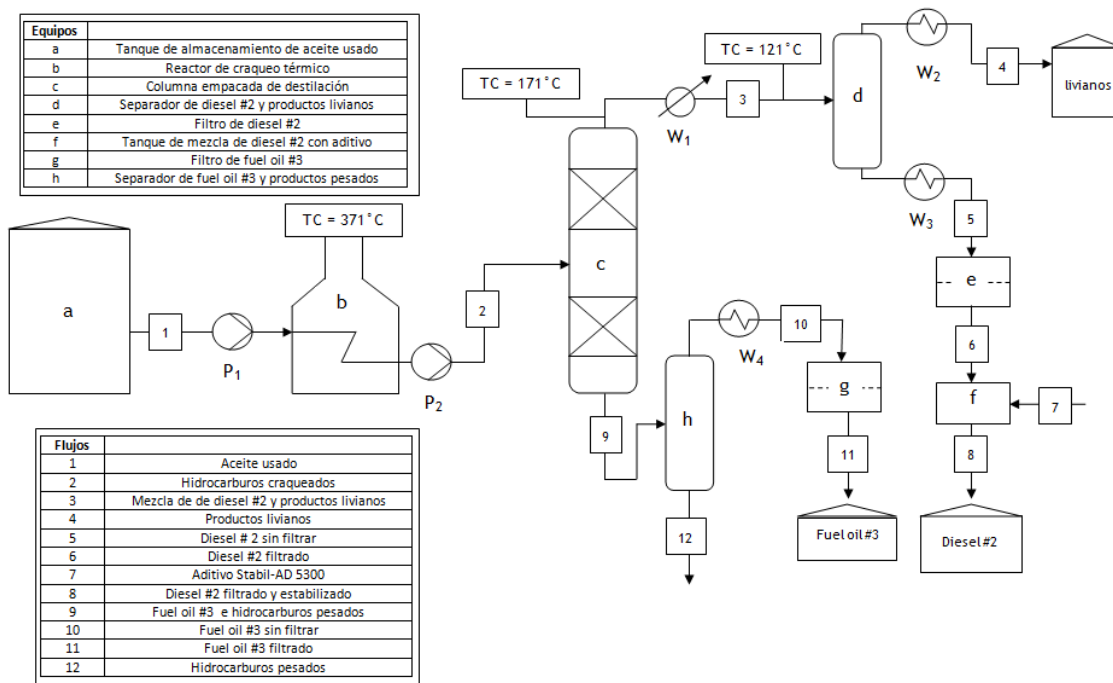


Figura 2. 1: Diagrama de flujo del proceso de craqueo térmico.

El proceso de la patente de Wansbrough [4] se presenta en la Figura 2.1. El aceite usado es pre-calentado y alimentado a un reactor de craqueo (b) que opera a temperaturas comprendidas entre 329°C y 371°C. El producto del craqueo térmico, proveniente del reactor, se dirige hacia una columna de destilación fraccionada y doblemente empacada (c). Los compuestos livianos y el diesel #2 abandonan la columna por el tope, como vapor. Los gases que abandonan la columna pasan a través de un intercambiador de calor de tubo y carcasa, donde la temperatura es reducida de 177°C a 121°C. En el recipiente del separador (d) son apartados el diesel #2 de la nafta y los gases. Por otro lado el fuel oil #3 es separado de los compuestos pesados e impurezas en otro separador (h).

Los compuestos livianos son usados como combustible para el reactor térmico; el fuel oil #3 y el diesel #2 pasan por un proceso de filtración, (e) y (g), que consiste en una serie de finas matrices que atrapan partículas de tamaños pequeños. Finalizando con la idea de Wansbrough [4], el fuel oil #3 es almacenado y el diesel #2 se dirige a otro proceso en el que se le añade un estabilizador de olefinas llamado Stabil-AD 5300, el cual previene la formación de olefinas reactivas que pueden oscurecer al diesel #2.

2.3.2.2 *Hidro-craqueo catalítico de aceite usado para producir combustibles líquidos por medio de zirconia sulfatada*

El hidro-craqueo catalítico consiste en el craqueo de las cadenas hidrocarburo del aceite usado con la ayuda de un catalizador sólido en presencia de hidrógeno. Permsubscul et al [12] explican con detalle el proceso de producción de combustible líquido a partir de aceite lubricante usado de motor mediante la utilización de un catalizador de zirconia sulfatada en presencia de hidrógeno. En este caso los experimentos fueron llevados a cabo en un micro-reactor intermitente de 70 cm³ de volumen, a un rango de temperatura entre 375-425 °C, presión inicial de hidrógeno de 1-4 MPa y un tiempo de reacción de 10-90 minutos sobre el catalizador de zirconia sulfatada en fase heterogénea, preparado de acuerdo al método descrito por Charusiri et al [13]. El producto líquido consistió de C7-C15 en n-parafinas y aromáticos como el tolueno, etilbenceno y xileno. El estudio cinético revela que el craqueo catalítico del aceite usado sigue una reacción exotérmica de segundo orden, con una energía de activación de 103.7 kJ/mol.

De acuerdo con Permsubscul et al [12], los pasos para la conversión de aceite lubricante usado en combustible líquido son las siguientes: filtración, evaporación, extracción, reacción y filtración al vacío. Primeramente el aceite lubricante usado es filtrado para remover las partículas sólidas. Luego es evaporado para eliminar el agua. En un siguiente paso, el aceite es separado de contaminantes como aditivos, impurezas y partículas carbonosas por extracción por solvente. El aceite recuperado es utilizado como la materia prima del proceso y es vertido en un microreactor cilíndrico de acero inoxidable, donde reacciona con el hidrógeno suministrado con la ayuda de zirconia sulfatada. Después de finalizada la reacción, el reactor es enfriado a temperatura ambiente y el producto líquido es recogido por medio de filtración al vacío para separar el líquido de productos sólidos. Finalmente, con la ayuda de un cromatógrafo de gases se analiza el producto obteniendo: nafta, keroseno, gasóleo y fracciones de residuos largos.

3 Métodos Experimentales

3.1 Materiales y equipos

El aceite usado fue recogido de 5 diferentes lubricadoras ubicadas en la ciudad de Quito y el valle de los Chillos. Los equipos y reactivos utilizados para realizar los diferentes métodos de ensayo para caracterización del aceite lubricante usado y el producto obtenido, fueron provistos por el Laboratorio de Control de Calidad de Petrocomercial, Terminal el

Beaterio. Esta institución también proveyó de diesel #2 como material base para ser comparado con el producto en el capítulo de resultados.

El equipo utilizado para la conversión de aceite lubricante usado en diesel #2 es un destilador *Precision Scientific Petroleum Herzog*. Es un destilador normado para productos derivados del petróleo utilizado con el fin de realizar la prueba ASTM D-86 [14]. En el procedimiento de obtención de diesel #2 a partir de aceite lubricante usado, el equipo sirve como fuente de energía para el craqueo térmico y como destilador. En los procesos de craqueo térmico, destilación y rectificación se lo emplea para calentar la alimentación deseada; mientras que en los procesos de destilación y rectificación también se lo utiliza como refrigerante.

Los equipos utilizados para la caracterización de aceite usado y diesel #2 serán explicados en los puntos 3.2.1 y 3.4.1, respectivamente.

3.2 Caracterización del aceite usado

La caracterización del aceite lubricante usado se la realiza con el fin de determinar sus propiedades físicas y químicas, además de su composición. Para obtener datos representativos se han realizado los diferentes ensayos para 5 tipos de muestra de aceite usado de lubricadoras ubicadas en Quito y el valle de los Chillos.

3.2.1 Métodos de ensayo

Las pruebas realizadas a las diferentes muestras de aceite lubricante usado, las normas empleadas y los equipos se encuentran tabulados a continuación en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Pruebas realizadas a las diferentes muestras de aceite usado

Prueba	Norma ASTM	Equipo
Número total de Base	D2896 [15]	Hach Conductivity Meter Model CO150
Índice de viscosidad	D2270 [16]	- Baño Kohler KV 3000. - Viscosímetro CANNON 300276Z
Punto de inflamación	D56 [17]	Herzog HFP380. Pensky Martens

Contenido de agua y sedimentos	D1796 [18]	Centrifugadora de líquido L-K industries 699C
Corrosión a la lámina de cobre	D130 [19]	Baño Koheler K25330
Contenido Metálico	-	Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 3110
Contenido de azufre	D4294 [20]	Horiba SLFA 2800
Ensayo de destilación	D86 [14]	Precision Scientific Petroleum Instruments Herzog
Gravedad API (a 15.6 °C)	D1298 [21]	Termo-higrómetro Precision API

3.2.2 Pruebas fisicoquímicas

Las pruebas fisicoquímicas permiten catalogar al aceite lubricante usado, para tener información del punto de partida, es decir de la materia prima. Al final se compara como han cambiado cada una de las propiedades a ser medidas durante el proceso. A continuación se presentan las diferentes pruebas físico-químicas realizadas.

3.2.2.1 Número total de base (TBN)

Esta prueba determina los constituyentes básicos que se encuentran en el aceite usado. Dado que los reactivos necesarios para esta prueba eran escasos, se realizó solamente un ensayo de la mezcla de las cinco muestras de aceite usado. De acuerdo con la norma ASTM D-2896 [15], productos derivados del petróleo nuevos y usados pueden contener constituyentes básicos que están presentes como aditivos. Las cantidades relativas de estos materiales pueden ser determinados por titulación con ácidos. La norma indica que el número de base es una medida de las sustancias básicas presentes en el aceite, siempre bajo condiciones específicas. Este es a veces usado como una medida de la degradación del lubricante.

A continuación se explica el procedimiento a ser utilizado, dictado por la norma ASTM D-2896 [15].

Primeramente se deben preparar los reactivos involucrados que son:

- Una solución de ácido perclórico en ácido acético al 72%.
- Un solvente de titulación con 1/3 de ácido acético y 2/3 de clorobenceno.
- Una solución de 0.1 a 0.2 g de ftalato de potasio en 40 mL de ácido acético.

Luego se debe añadir 80 mL de clorobenceno a la solución de ftalato de potasio para realizar una titulación potenciométrica con la solución de ácido perclórico. Cuando se concluya con la titulación se debe lavar el equipo utilizado con solvente de titulación y agua para posteriormente titular el solvente de titulación.

Para realizar la titulación del solvente de titulación se debe llenar la bureta con la solución de ácido perclórico, luego se anota el volumen inicial y el voltaje. Se titula hasta que el potencial cambia menos de 0.005 V en 0.1 mL. La velocidad de titulación debe ser 1 mL/min.

Se calcula la normalidad de la solución de ácido perclórico mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{1000W_p}{[204.23 \times (V_a - b)]} \quad \text{Ec.3.1}$$

Después de calcular la normalidad se debe agitar bien la muestra de aceite usado para que se mezcle bien. La cantidad de muestra está determinada por la siguiente ecuación:

$$M_a = \frac{28}{TBNe} \quad \text{Ec.3.2}$$

Donde M_a es la cantidad de muestra que debe ser usada (g) y $TBNe$ es el número total de base que se espera obtener (mg KOH/g).

Luego se añaden 120 mL de solvente de titulación a la muestra y se titula hasta que el potencial cambie menos de 0.005 V en 0.1 mL. El potencial es medido en el equipo *Hach*

Conductivity Meter Model CO150, el cual funciona como potenciómetro y voltímetro. En la Figura 3. 1 se presenta una fotografía del equipo utilizado.



Figura 3. 1: Medidor de Conductividad Hach Modelo CO150

Finalmente, se debe realizar un gráfico del volumen titulado vs el voltaje para obtener el punto de inflexión y así determinar los volúmenes de ácido perclórico y solvente de titulación en los que se da un cambio de potencial relativamente alto. Se determina el número total de base con la siguiente ecuación:

$$TBN = \frac{[(E - F) \times N \times 56.1]}{M_a} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde *TBN* es el número total de base (mg KOH/g), *E* es el volumen de ácido perclórico (mL), *F* es el volumen de solvente de titulación (mL), *N* es la normalidad del ácido perclórico (N) y *M_a* es el peso de la muestra (g).

3.2.2.2 Índice de viscosidad

El índice de viscosidad determina la variación en la viscosidad cinemática debido a cambios en la temperatura del producto entre 40 y 100°C. De acuerdo con la norma D2270 [16], un alto índice de viscosidad indica un decremento en la viscosidad cinemática cuando

se incrementa la temperatura del lubricante. El índice de viscosidad es usado en la práctica como un número que indica una dependencia entre la temperatura y la viscosidad cinemática.

A continuación se explica el procedimiento a ser utilizado, dictado por la norma ASTM D-2270 [16].

Se obtiene la viscosidad del aceite usado a las temperaturas de 40°C y 70°C con la ayuda de un viscosímetro *CANNON 300 276Z*, dentro del cual se coloca la muestra de aceite. El viscosímetro con la muestra es introducido en un Baño *Kohler KV 3000*, representado en la Figura 3. 2, que permite mantener la temperatura constante ya sea a 40°C o 70°C y además dispone de cronómetros que permiten medir el tiempo (s) que tarda el aceite usado en ir de un punto a otro dentro del viscosímetro. Para obtener los datos de viscosidad se multiplica el tiempo por la constante del viscosímetro, que en este caso es 0.25 mm²/s.

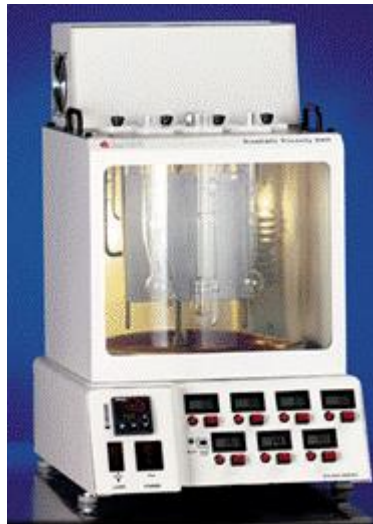


Figura 3. 2: Baño Kohler KV 3000

De la norma ASTM D-341 [22] se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones que permite encontrar el dato de la viscosidad a 100°C.

$$\log \log z = A_1 - B_1 \log T \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$z = \nu + 0.7 + e^{(-1.47 - 1.84\nu - 0.51\nu^2)} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$\nu = (z - 0.7) - e^{[0.7487 - 3295(z - 0.7) + 0.6119(z - 0.7)^2 - 0.3193(z - 0.7)^3]} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde z es una variable de apoyo (-), ν es la viscosidad cinemática (cSt), T es la temperatura (K), A_1 y B_1 son constantes (-).

Cuando se obtiene la temperatura a 100°C se utiliza la siguiente ecuación para determinar el índice de viscosidad:

$$VI = \left[\frac{(L - U)}{(L - H)} \times 100 \right] \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde:

VI es el índice de viscosidad (-).

L es la viscosidad cinemática a 40°C de un aceite con 0 índice de viscosidad, el cual debe tener la misma viscosidad cinemática a 100°C que la del aceite cuyo índice de viscosidad se requiere calcular (cSt).

U es la viscosidad cinemática a 40°C del aceite cuyo índice de viscosidad será calculado (cSt).

H es la viscosidad cinemática a 40°C de un aceite con índice de viscosidad de 100, el cual debe tener la misma viscosidad cinemática a 100°C que la del aceite cuyo índice de viscosidad se requiere calcular (cSt).

Si la viscosidad cinemática del aceite es menor o igual a 70 cSt, los valores de L y H se encuentran en el apéndice F. Por otro lado, si la viscosidad cinemática del aceite a 100°C es mayor a 70 cSt, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$L = 0.8353Y^2 + 14.67Y - 216 \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$H = 0.1684Y^2 + 11.85Y - 97 \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde Y es la viscosidad cinemática a 100°C del aceite cuyo índice de viscosidad se requiere calcular (cSt).

3.2.2.3 Punto de inflamación

Esta prueba determina la temperatura a la cual el aceite desprende vapores que mezclados con el aire se inflaman. De acuerdo con la norma ASTM D-56 [17], el punto de inflamación mide la tendencia de un espécimen a formar mezclas inflamables con el aire bajo condiciones controladas de laboratorio. Esta prueba es usada en regulaciones de cuidado y envío para definir materiales combustibles como inflamables. Además indica la posible presencia de materiales altamente volátiles e inflamables en un material relativamente no inflamable.

A continuación se explica el procedimiento a ser utilizado, dictado por la norma ASTM D-56 [17].

Para realizar esta prueba se utiliza el equipo en la Figura 3. 3. El equipo marca *Herzog HFP380 Pensky Martens* consta de una copa dentro de un baño de agua cuyo calor puede ser regulado. Se toma una muestra de 50 mL de aceite usado y se la calienta constantemente en una copa con tapa cerrada. Luego se introduce en la copa, a intervalos regulares, una llama de tamaño normalizado, hasta obtener la inflamación del vapor de la muestra.



Figura 3. 3: Equipo para determinación del punto de inflamación

(Pensky Martens HFP380)

Dado que la presión atmosférica en la ciudad de Quito es 560 mm Hg, es necesario corregir los resultados obtenidos con la siguiente ecuación:

$$PIc = PI + 0.03(760 - p) \quad \text{Ec.3.10}$$

Donde PIc es el punto de inflamación corregido ($^{\circ}\text{C}$), PI es el punto de inflamación observado ($^{\circ}\text{C}$) y p es la presión barométrica observada (mm de Hg).

3.2.2.4 *Contenido de agua y sedimentos*

Esta prueba permite determinar la cantidad de agua y sedimentos presentes en el aceite usado. A continuación se explica el procedimiento a ser utilizado, dictado por la norma ASTM D-1796 [18].

Se debe agitar una mezcla con 50 cm³ de muestra y 50 cm³ de combustible para aviones, usado como disolvente, en un tubo de centrifuga de 100 cm³. Se centrifuga la mezcla en la centrifugadora L-K 699C, mostrada en la Figura 3. 4, hasta que el contenido se encuentre perfectamente mezclado. Después se deben añadir tres gotas de demulsificante para posteriormente calentar la mezcla a una temperatura de 49 $^{\circ}\text{C}$ durante 10 minutos. Luego se centrifuga a una velocidad tal que la fuerza centrífuga relativa esté comprendida entre 500 y 800 rpm. Finalmente, se lee y se anota el volumen total de sedimento insoluble y agua separados en el fondo del tubo de centrifugación.



Figura 3. 4: Centrífuga de líquido L-K industries 699C

3.2.2.5 Corrosión a la lámina de cobre

Esta prueba determina la tendencia de un producto derivado del petróleo a corroer aleaciones de cobre. De acuerdo con la norma ASTM D-130 [19], algunos compuestos sulfurados presentes en los productos de petróleo pueden tener una acción corrosiva en varios metales y esta acción corrosiva no está necesariamente relacionada con el contenido total de azufre, sino con el tipo de compuestos sulfurados presentes.

El procedimiento a ser utilizado es el dictado por la norma ASTM D-130 [19].

Se coloca una lámina normalizada de cobre en el aceite usado dentro de un baño a temperatura cercana a 100 °C por un período de 2 a 3 horas. Luego se la saca y se establece una calificación de acuerdo al cambio de color de la lámina. Un mayor número indica mayor oscurecimiento de la tira de cobre.



Figura 3. 5: Escala para la prueba de corrosión a lámina de cobre

En la figura 3.5 se puede apreciar la escala que se utiliza, siendo *1a* el menor nivel de corrosión y *4c* el mayor nivel de corrosión.

3.2.2.6 Gravedad API o peso específico a 15.6 °C

El peso específico es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia, en este caso el aceite usado. Los datos de peso específico se dan en escala API cuando se trata de productos derivados del petróleo. De acuerdo con la norma ASTM D-1298 [21], la gravedad API es un factor que gobierna y determina el precio del crudo de petróleo. Sin embargo, esta propiedad es un indicador incierto de la calidad a menos que se la establezca con otras propiedades también. A continuación se explica el método dictado por la norma ASTM D-1298 [21].

Se llena una probeta de 1000 mL con el aceite usado y a continuación se introduce un *termohigrómetro Precision API* adentro de la probeta hasta que éste quede en equilibrio. En ese momento se lee la temperatura y los grados API que marcan el termohigrómetro.

La conversión de grados API a peso específico se da mediante la siguiente ecuación:

$$API = \frac{141.5}{g} - 131.5 \quad \text{Ec.3.11}$$

Donde *API* son los grados API a 15.6 °C (°API) y *g* es el peso específico (g/mL).

3.2.3 *Contenido de metales y azufre*

Uno de las diferencias más importantes entre el aceite nuevo y el usado es el contenido de metales pesados. El contenido de metales en el aceite usado es muy importante, porque muchos de estos metales son potencialmente peligrosos. De acuerdo con Meiz [23], estos metales se originan a partir del desgaste del motor. Generalmente, el aceite usado contiene: plomo, zinc, cadmio, bario y magnesio y en menor cantidad: hierro, sodio, cobre, aluminio, cromo, manganeso, potasio, níquel, estaño, silicio, bario y molibdeno. La concentración de metales en el aceite lubricante se incrementa con el tiempo de operación y la cantidad depende del tipo de combustible y las condiciones mecánicas del motor.

De acuerdo con Firas y Dumitru [7], una variedad de compuestos orgánicos han sido usados en el aceite lubricante como inhibidores de oxidación o compuestos sulfurados, es decir que el contenido de azufre es intrínseco del aceite lubricante y no depende de su uso a través del tiempo.

3.2.3.1 *Contenido metálico*

Para determinar el contenido y porcentaje de metales presentes en el aceite lubricante se utiliza un espectrofotómetro de absorción atómica. Una muestra de aceite lubricante usado se pesa en un crisol de porcelana, se calcina en una mufla a 650 °C y las cenizas se disuelven en una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico. Luego se afora a un volumen determinado, en agua destilada.

Se prepara una curva de calibración del metal a evaluarse, midiendo la absorbancia vs la concentración del metal. Finalmente, se miden las absorbancias para las muestras de

aceite usado. Para este análisis se utilizó el *Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 3110*.

3.2.3.2 *Contenido de azufre mediante espectrometría fluorescente de energía dispersiva de rayos X*

Para esta prueba rige la norma INEN 1490 o método de la bomba, sin embargo este método ha sido reemplazado por la norma ASTM D-4294 [20]. De acuerdo con la norma ASTM D-4294 [20], la calidad de muchos productos derivados del petróleo está relacionada con la cantidad de azufre presente y el conocimiento de la concentración de azufre es necesario para propósitos de proceso. Hay también regulaciones a nivel mundial, estatal y local que restringen la cantidad de azufre presente en algunos combustibles. Este método provee una medida rápida y precisa del azufre total en productos derivados del petróleo con un mínimo de muestra requerido. Un análisis típico tarda de 2 a 4 minutos.

Para determinar el contenido de azufre se utiliza un aparato *HORIBA SLFA 2800*, mostrado en la Figura 3. 6, específico para analizar el contenido de azufre presente en compuestos derivados del petróleo. Este funciona mediante la emisión de rayos X.



Figura 3. 6: Equipo de determinación de contenido de azufre en hidrocarburos (HORIBA SLFA 2800)

A continuación se explica el método utilizado de acuerdo a la norma ASTM D-4294 [20].

Se coloca la muestra en un porta muestra normalizado, se los cubre con un plástico transparente y se los coloca en el equipo. El equipo realiza tres mediciones e imprime el promedio de las mediciones en unidades de % p/p o ppm.

3.2.4 Ensayo de destilación

Este método cubre la destilación atmosférica de productos derivados de petróleo usando una destilación de laboratorio tipo intermitente. De acuerdo con la norma ASTM D-86 [14], se realiza esta prueba con el fin de determinar cuantitativamente las características de los rangos de ebullición de dichos productos. Las características de destilación de hidrocarburos tienen un importante efecto en su seguro manejo, especialmente en caso de combustibles y solventes. Los rangos de ebullición dan información de su composición, las propiedades y el comportamiento del combustible durante su almacenamiento y uso. La volatilidad es el mayor determinante de la tendencia de una mezcla de hidrocarburos para producir vapores explosivos.

A continuación se explica el método empleado de acuerdo con la norma ASTM D-86 [14].

Se toman 100 mL de muestra y se la destila bajo condiciones específicas en un destilador *Precision Scientific Petroleum Herzog*. Se realizan lecturas sistemáticas de temperaturas y volúmenes de condensado, dependiendo de las necesidades del usuario. El volumen del residuo y las pérdidas también son anotados. Cuando se acaba la destilación, las temperaturas de vapor pueden ser corregidas para obtener los datos a la presión de 760 mm de Hg. Los resultados son comúnmente expresados como porcentajes de volumen vs temperatura en una tabla o gráfico como una curva de destilación.

3.3 Procesos de conversión del aceite usado

El proceso de conversión del aceite usado en diesel #2, llevado a cabo en el laboratorio se puede apreciar en el diagrama de bloque de la Figura 3. 7

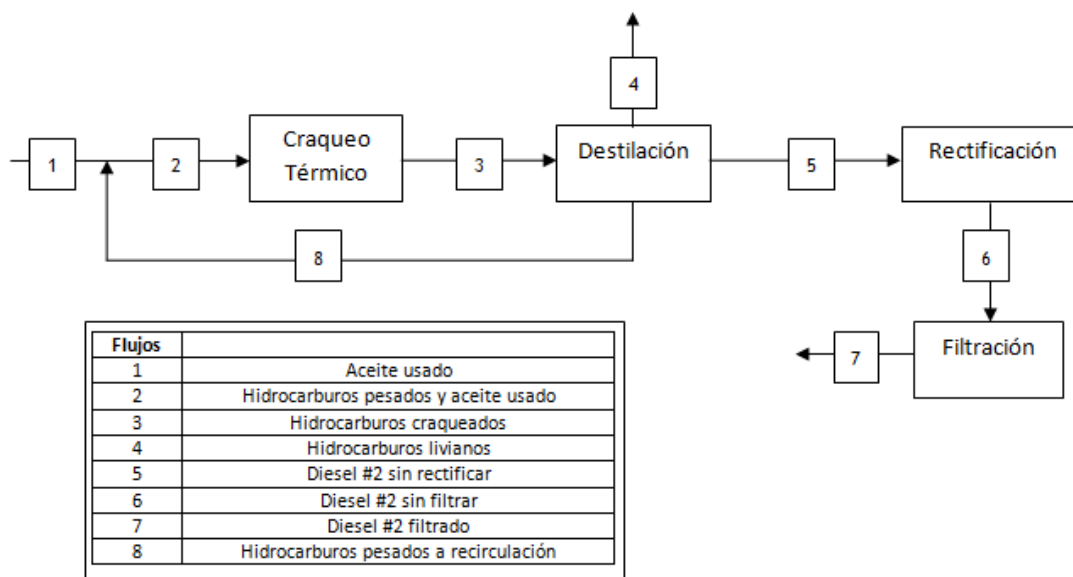


Figura 3. 7: Diagrama de bloques del proceso de conversión de aceite usado

En el laboratorio se realizan cuatro procesos básicos que son: craqueo térmico, destilación, rectificación y filtración. Se trata de un proceso intermitente, ya que se emplea el mismo equipo para los tres primeros procedimientos. A continuación se detalla de mejor manera cada uno de estos procesos.

3.3.1 Proceso de craqueo térmico

Para craquear térmicamente el aceite usado se utiliza el mismo aparato que para el ensayo de destilación, el destilador *Precision Scientific Petroleum Herzog*. En un primer paso se toman 500 mL de aceite usado y se los precalienta en una plancha térmica hasta una temperatura de 100 °C con el fin de eliminar agua. De los 500 mL se toman 200 mL para realizar el craqueo térmico. Los experimentos fueron llevados a cabo en un balón de destilación de 250 mL, que funcionó como un micro-reactor. Para el craqueo térmico se toman 200 mL de aceite usado deshidratado y se los coloca en el balón de vidrio. Este balón es colocado en el equipo de destilación a una potencia de 440 W.

3.3.1.1 Aparato de craqueo térmico

El aparato de craqueo es el equipo de destilación *Precision Scientific Petroleum Herzog*, cuya fotografía es la Figura 3. 8. Éste es un destilador especial para hidrocarburos que consta de un área de calentamiento que tiene una resistencia metálica que provee el calor. Encima de esta área se coloca el balón de vidrio con la carga.



Figura 3. 8: Equipo de destilación (Precision Scientific Petroleum Herzog)

Los vapores suben y su temperatura es medida con un termómetro. Luego los vapores pasan a través de un serpentín de enfriamiento que se encuentra dentro de un baño de agua fría que condensa los hidrocarburos para ser recogidos en una probeta graduada.

3.3.2 *Proceso de destilación atmosférica*

El proceso de destilación atmosférica se lo realiza por lotes y es la continuación del proceso de craqueo. Para destilar la carga previamente craqueada se utiliza el mismo aparato *Precision Scientific Petroleum Herzog* que sirve para el craqueo térmico. Los experimentos fueron llevados a cabo en un balón de vidrio de 150 mL con una carga de 100 mL y una

potencia constante de 440W en el equipo. Manualmente se dividieron tres fracciones que son: hidrocarburos livianos, hidrocarburos medios e hidrocarburos pesados.

Se cataloga como livianos a los hidrocarburos cuyo punto de ebullición es menor a 160°C, los productos medios son los hidrocarburos que al igual que el diesel #2, se destilan entre 160°C y 360°C, y los pesados son los hidrocarburos cuyo punto de ebullición es mayor a 360°C. Cada una de las fracciones es almacenada en contenedores diferentes para posteriormente ser tratados individualmente. Los hidrocarburos livianos son almacenados y los hidrocarburos medios son almacenados y rectificadas para asemejarse al diesel #2. Adicionalmente, los hidrocarburos medios van a un sistema de filtración después de ser enfriados. Los hidrocarburos pesados son realimentados al reactor de craqueo para ser procesados nuevamente.

En este punto se toman los datos para obtener el rendimiento, la conversión y posteriormente la ecuación de velocidad. En una probeta de 100 mL se recoge el producto destilado y se toman datos de volúmenes y tiempo de cada fracción. El porcentaje de volumen recogido sobre volumen total es convertido a masa por volumen con la ayuda de la densidad del aceite usado, experimentalmente obtenida y cuyo valor es 885 kg/m³. La masa por volumen es transformada a moles por volumen con la ayuda del peso molecular del tricontano (C₃₀H₆₂) que es una molécula genérica que abarca el peso medio del aceite lubricante usado. Con esto se pueden obtener datos de tiempo y conversión para cálculos posteriores.

3.3.3 Rectificación

La rectificación es una destilación que permite eliminar los compuestos livianos como gases de hidrocarburos, naftas y gasolinas. Estos hidrocarburos están constituidos de cadenas desde 2 carbonos hasta 8 carbonos en promedio y tienen puntos de ebullición desde los 40°C hasta 160°C, corregidos a 1 atm. Es un procedimiento importante porque permite eliminar los hidrocarburos livianos presentes en la fracción de hidrocarburos medios, para obtener una mezcla de hidrocarburos semejante al diesel #2, que a diferencia de los livianos destila en un rango de 161°C hasta 360°C y tiene cadenas de hidrocarburos de 12 a 20 carbonos.

3.3.4 Proceso de filtración

El proceso de filtración es el último paso para obtener un combustible similar al diesel #2 a partir de aceites lubricantes usados. La Figura 3. 9 muestra el esquema de este proceso. Este paso permite eliminar olefinas reactivas, compuestos sulfurados y agua; se lo realiza en un tubo de vidrio de 30 cm de largo y 1 cm de diámetro relleno de sílica gel grado cromatográfico de 100-200 mesh, a manera de medio filtrante. La carga para este equipo de filtración es el resultado de la rectificación de los productos medios. Se cargan 20 mL cada 30 minutos. Después de 2 horas se regenera el medio filtrante lavándolo con alcohol y después secándolo a 120°C durante dos horas.

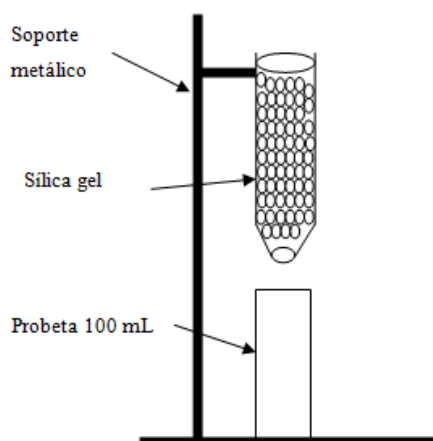


Figura 3. 9: Esquema del proceso de filtración

3.4 Caracterización del producto final

Se asume como producto final a los hidrocarburos medios que han pasado por los procesos de rectificación y filtración. Para caracterizar el producto final se han utilizado los mismos métodos de ensayo que para el diesel #2. Estos métodos son normados por la norma INEN 1489 [24], que a su vez se basa en la norma ASTM D-975 [25]. El producto final debe cumplir con los requisitos impuestos al diesel #2 en el Ecuador, a continuación en la siguiente tabla obtenida de la norma INEN 1489 [24], se presentan los requisitos del diesel #2. El producto final fue sometido a cada una de las pruebas listadas en la Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2: Requisitos del diesel #2

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de inflamación	°C	51	-	INEN 1047 [26]
Agua y sedimentos	% p/p	-	0.05	INEN 1494 [27]
Residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de destilación	% p/p	-	0.15	INEN 1491 [28]
Cenizas	% p/p	-	0.01	INEN 1492 [29]
Temperatura de destilación del 90%	% p/p	-	360	INEN 926 [30]
Viscosidad cinemática a 37.8 °C	cSt	2.5	6	INEN 810 [31]
Contenido de azufre	% p/p	-	0.7	INEN 1490 [*]
Corrosión a la lámina de cobre	-	-	1c	INEN 927 [32]
Índice de cetano calculado	-	45	-	INEN 1495 [33]

* Este método es reemplazado por el método ASTM D-4294 [20]

3.4.1 Métodos de ensayo para verificar el cumplimiento de requisitos del diesel #2

Algunos métodos de ensayo del producto final como el punto de inflamación, contenido de agua y sedimentos, contenido de azufre y corrosión a la lámina de cobre ya fueron explicados en el punto 3.2, así que solamente se explicarán aquellos que no han sido mencionados previamente.

3.4.1.1 Residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de destilación o Carbón Conradson

Este método determina la cantidad de residuo carbonoso dejado después de la evaporación y pirolisis del diesel #2, y pretende proveer algunas indicaciones de la posible formación de coque. De acuerdo con la norma ASTM D-184 [34], este método se aplica a productos no volátiles del petróleo, los cuales se descomponen parcialmente en una destilación atmosférica. El valor de residuo carbonoso sirve como una aproximación de la tendencia

del combustible para formar depósitos en quemadores. De igual manera, provee la información de la cantidad de depósitos carbonosos que se pueden alojar en el motor.

A continuación se explica el método dictado por la norma ASTM D-184 [34] (norma INEN 1491 [28]).

Para realizar esta prueba se utiliza el equipo mostrado en la Figura 3. 10. Primeramente se pesan 10 g del residuo de la destilación del diesel #2 en un crisol de porcelana. Luego se coloca el crisol de porcelana en el centro de un crisol metálico llamado Skidmore. Se nivela la arena contenida en el crisol de lámina de hierro y se coloca el crisol Skidmore exactamente en el centro. Se cubre el crisol Skidmore y el crisol de hierro con sus respectivas tapas. Con el mechero Meker se calienta con un periodo de pre-ignición de 10 minutos. Al momento en que aparece humo por la chimenea, se procede a mover el mechero de modo que la llama toque los lados del crisol hasta conseguir vapores que se inflamen. Cuando termina la combustión se reajusta el mechero y se lo calienta como al principio hasta que el fondo adquiera un color rojizo durante 6 minutos. Finalmente, se deja enfriar el crisol a temperatura ambiente y se procede a pesarlo.

Para calcular el porcentaje de residuo carbonoso sobre la muestra original se emplea la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{A_m \times 100}{M_a} \quad \text{Ec.3.12}$$

Donde R_c es el porcentaje del peso del residuo carbonoso con respecto al peso de la muestra (% en peso), A_m es el peso del residuo carbonoso (g) y M_a es el peso original de la muestra (g).

La figura 3. 10 es un esquema del equipo que se utiliza para realizar la prueba de Carbón Conradson.

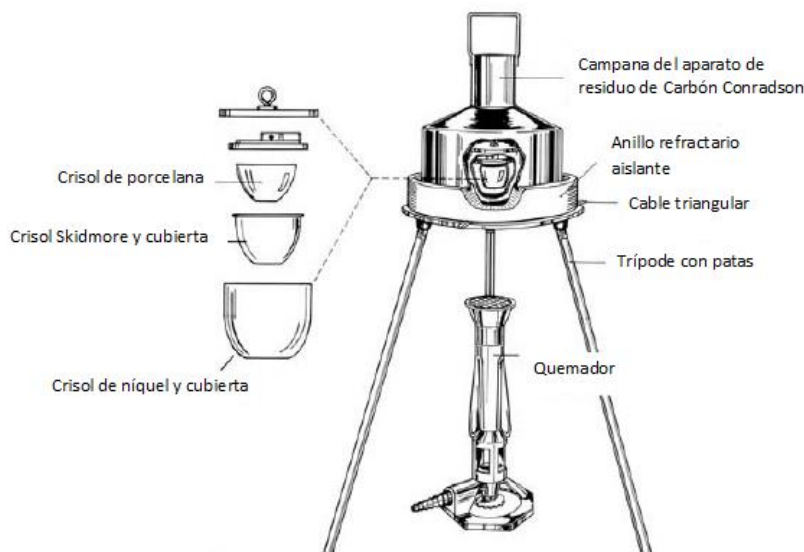


Figura 3. 10: Equipo para realizar la prueba de Carbón Conradson

3.4.1.2 Cenizas

Este método determina el contenido de cenizas en productos derivados del petróleo. De acuerdo con la norma ASTM D-482, el conocimiento de la cantidad de cenizas puede ser el resultado de compuestos metálicos solubles en agua o de sólidos extraños.

A continuación se explica el método dictado por la norma ASTM D-482 (norma INEN 1492 [29]).

Para realizar esta prueba se calienta un crisol a 700°C durante 10 minutos. Se lo deja enfriar hasta la temperatura ambiente y se procede a pesarlo. Se toma una muestra de 50 g. Se calienta el crisol y la muestra hasta que el contenido se inflame. Se mantiene la temperatura de manera que la muestra continúe quemándose hasta obtener solamente cenizas. Se calcina el residuo dentro de la mufla a 775°C , hasta eliminar toda la materia carbonosa. Una vez enfriado el crisol, se procede a pesarlo. Para asegurar una calcinación completa, se calienta una segunda vez el crisol a 775°C durante 25 minutos. Una vez enfriado, se lo vuelve a pesar. Se realiza este procedimiento hasta que los pesajes no difieran más de 0.5 mg.

Para calcular el contenido de cenizas como un porcentaje de la muestra original se emplea la siguiente ecuación:

$$C_e = \frac{M_1}{M_o} \times 100 \quad \text{Ec.3.13}$$

Donde C_e es el contenido de cenizas (% en peso), M_1 es el peso de la ceniza obtenida (g) y M_o es el peso de la muestra original (g).

3.4.1.3 *Temperatura de destilación del 90%*

La temperatura de destilación del 90% constituye una extensión del ensayo de destilación, regulado por la norma ASTM D-86 [14] (norma INEN 926 [30]). Se refiere al dato de la temperatura a presión atmosférica, que corresponde al 90% del porcentaje destilado de diesel #2.

3.4.1.4 *Viscosidad cinemática a 37.8 °C*

De acuerdo con la norma ASTM D-445 [36], la viscosidad es importante para estimar el óptimo almacenaje y condiciones de operación. El resultado obtenido a partir de esta prueba depende del comportamiento de la muestra. El rango de valores de la viscosidad cinemática es de 0.2 a 300000 cSt.

A continuación se explica el método dictado por la norma ASTM D-445 [36] (norma INEN 810 [31]).

Para esta prueba se utiliza un viscosímetro *CANNON 100 P624*. En él se coloca la muestra de diesel #2 con la ayuda de una bomba de vacío. Se coloca el viscosímetro en un baño a 37.8 °C y se espera durante 10 minutos. Luego se procede a subir el líquido dentro del viscosímetro hasta una marca inicial con la ayuda de la bomba de vacío. Se toma el tiempo que se demora el líquido en recorrer desde la marca inicial a la final. Esta prueba se la realiza las veces que sean necesarias hasta que los tiempos no difirieran más de 0.2 segundos.

Para calcular la viscosidad cinemática se utiliza la siguiente ecuación:

$$v = C \times t \quad \text{Ec.3.14}$$

Donde v es la viscosidad cinemática (cSt), C es la constante del viscosímetro, que en este caso es de $0.01443 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ y t es el tiempo de flujo (s).

3.4.1.5 Índice de cetano calculado

De acuerdo con la norma ASTM D-976 [37], el índice de cetano calculado es la cantidad de hexadecano contenido en el diesel#2 en porcentaje volumétrico. Si el número de cetano es alto, el retraso de la ignición es menor y la calidad de combustión es mejor. Representa un medio para estimar directamente el número ASTM de cetano del diesel #2 a partir de su gravedad API y punto medio de ebullición. A continuación se establece la ecuación obtenida en la norma ASTM D-976 [37] (norma INEN 1495 [33]) que permite obtener el número de cetano.

$$ICc = 454.74 - 1641.416D + 774.74D^2 - 0.554T_B + 97.803(\log T_B) \quad \text{Ec.3.15}$$

Donde ICc es el índice de cetano calculado (-), D es la densidad de la muestra de diesel #2 a 15°C (kg/m^3) y T_B es la temperatura del 50% del destilado de la muestra de diesel #2 a 760 mm de Hg ($^\circ\text{C}$).

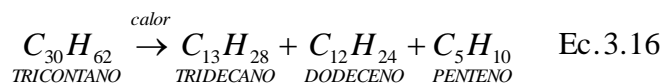
3.4.2 Método para la obtención de espectros infrarrojos para el diesel #2 comercial y el producto final

Como una prueba adicional para la caracterización del producto final se obtienen los espectros infrarrojos del diesel #2 comercial y el producto final. De acuerdo con Skoog et al [38], la espectrometría de absorción y reflexión en el infrarrojo permite investigar

estructuras de compuestos moleculares en especial compuestos orgánicos. Para este procedimiento se utiliza un espectrómetro de infrarrojo *Spectrum BX FT-IR System Perkin Elmer* que tiene una celda de Seleniuro de Zinc. Primeramente se coloca la celda limpia y seca en el quipo y se obtiene un espectro a manera de blanco, que posteriormente servirá para la corrección de los espectros de las muestras siguientes. Después se colocan cada una de las muestras en la celda de Seleniuro de Zinc y se obtienen los espectros para cada muestra. Se imprimen los resultados y finalmente se los analiza.

3.5 Método para la obtención de la ecuación de velocidad de la reacción de craqueo térmico

Dentro de todo el proceso de conversión de aceite usado en diesel #2, existe una sola reacción que es la craqueo térmico. Después de someter al aceite usado a una temperatura de 355°C durante casi 6 horas, se obtiene como producto una mezcla de hidrocarburos de todos tamaños que van desde compuestos con 2 carbonos hasta compuestos con 30 carbonos. Para motivos prácticos se asume que la reacción de craqueo es la siguiente:



Esta ecuación denota que el aceite usado, que es un hidrocarburo pesado, se craquea para formar hidrocarburos presentes en el diesel #2 como el tridecano y el dodeceno, pero también compuestos livianos como el penteno.

Con el fin de diseñar el reactor de craqueo térmico, se necesita obtener la ecuación de velocidad para esta reacción. De acuerdo con Levenspiel [39] existen dos métodos de análisis para determinar la ecuación de velocidad en un reactor intermitente: el método integral y el método diferencial.

3.5.1 Método Integral

De acuerdo con Levenspiel [39], se miden las concentraciones del reactivo a varios tiempos y se colocan los datos en una tabla en las dos primeras columnas, en la tercera columna se

calcula el logaritmo natural de la relación de la concentración inicial y las concentraciones finales y en la cuarta columna se calcula el inverso de la concentración del reactivo, como se expresa en la Tabla 3. 3:

Tabla 3. 3: Datos para obtener la ecuación de velocidad por el método integral

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
tiempo (s)	Concentración C_A (gmol/L)	$\ln (C_{A0}/C_A)$	$1/C_A$

Después de llenar la Tabla 3. 3 se supone una cinética de orden n y se utiliza el método de la fracción $F = 80\%$ y para esto se emplean las ecuaciones 3.17 y 3.18. La primera relaciona el tiempo con la concentración inicial para un orden de reacción n y la segunda se obtiene al aplicar el logaritmo a la ecuación anterior para linealizarla.

$$tF = \frac{(0.8)^{1-n} - 1}{k(n-1)} C_{A0}^{1-n} \quad \text{Ec.3.17}$$

$$\log tF = \log \left(\frac{0.8^{1-n} - 1}{k(n-1)} \right) + (1-n) \log C_{A0} \quad \text{Ec.3.18}$$

Donde tF es el tiempo para reaccionar el 80% (s), n es el orden de reacción (-), C_{A0} es la concentración inicial de reactivo (gmol/L) y k es la constante de la velocidad ($L^{n-1}/gmol^{n-1}s$).

Luego se grafican los datos de concentración vs el tiempo y se traza la curva resultante. Después se completa la Tabla 3. 4 con los datos que correspondan:

Tabla 3. 4: Datos para obtener la gráfica final en el método integral

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
C_{A0}	$C_{A \text{ final }} (=0.8C_{A0})$	t_F	$\log t_F$	$\log C_{A0}$

Luego de esto se grafica la columna 4 con la columna 5 de la Tabla 3. 4 y se obtiene una recta semejante a la ecuación 3.18, a partir de la cual se obtienen los valores de la constante y el orden de reacción.

3.5.2 Método Diferencial

El método diferencial utiliza directamente la ecuación diferencial a ensayar, evaluando todos los términos de la ecuación incluida la derivada dC/dt y se ensaya la exactitud del ajuste de la ecuación con los datos experimentales. Primeramente se miden las concentraciones del reactivo a varios tiempos y se colocan los datos en una tabla en las dos primeras columnas, en la tercera columna se calcula la pendiente para cada valor de concentración, en la cuarta columna se calcula el logaritmo en base diez de las pendientes y en la columna 5 se calcula el logaritmo en base 10 de los valores de concentración. En la Tabla 3. 5 se muestra la disposición de los resultados:

Tabla 3. 5: Datos para la ecuación de velocidad por el método diferencial

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
tiempo (s)	concentración C_A (gmol/L)	Pendiente dC_A/dt	$\log_{10}(dC_A/dt)$	$\log_{10} C_A$

Se grafica la columna 2 vs columna 1 para obtener una curva que relacione la concentración y el tiempo, con el fin de obtener una expresión similar a esta:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n \quad \text{Ec.3.19}$$

Donde $-r_A$ es la velocidad de reacción (gmol/L s), C_A es la concentración de A (gmol/L), t es el tiempo (s), k es la constante de la velocidad de reacción y n es el orden de la reacción.

A partir de cada una de las concentraciones se obtiene la pendiente, es decir los datos de la columna 3. En las columnas 4 y 5 se toman los logaritmos en base 10 de la pendiente y la concentración con el fin de relacionar estas dos columnas y obtener una recta mediante la siguiente ecuación:

$$\log_{10} \left(\frac{dC_A}{dt} \right) = \log_{10} k + n \log_{10} C_A \quad \text{Ec. 3.20}$$

Se grafican los datos de la columna 4 y 5 se obtienen los resultados de la constante k y el orden n de reacción. La ecuación de velocidad es la 3.19 en la cual se reemplazan los valores encontrados.

4 Resultados y discusiones del proceso experimental

4.1 Caracterización del aceite usado

Para la caracterización del aceite usado se exponen los resultados de cinco muestras provenientes de cinco lubricadoras diferentes. La figura 4. 1 es la fotografía de una de las muestras recolectadas.



Figura 4. 1: Muestra de aceite usado

Los resultados de la caracterización se encuentran tabulados en la Tabla 4. 1 e ilustrados en las diferentes gráficas presentadas a continuación.

Tabla 4. 1: Resultados de la caracterización de aceite usado

Experimentos	1	2	3	4	5	media	desviación
Azufre (%p/p)	0,521	0,462	0,320	0,305	0,305	0,38	0,10
Viscosidad cinemática (cSt) (40°C)	97,75	77,29	111,88	93,22	102,54	96,54	12,79
Viscosidad cinemática (cSt) (70°C)	30,01	26,73	31,75	28,43	32,39	29,86	2.34
Índice de viscosidad (-)	-	-	-	-	-	122	-
Gravedad API a 60°F (°API)	28,3	28,1	28,2	28,2	28,3	28,22	0,08
Punto de inflamación (°C)	95	88	90	87	94	90,80	3,56
Destilación (PIE) (°C)	50	120	79	75	75	79,80	25,25
Destilación (50%) (°C)	395	305	365	372	372	361,80	33,71
Destilación (90%) (°C)	413	390	387	405	405	400	11,05
Corrosión a la lámina de Cu	1b	1b	2 ^a	1b	1b	1b	-
Cantidad de Agua (% p/p)	0,396	0,379	0,357	0,364	0,395	0,378	0,02
TBN (mg KOH/g)	-	-	-	-	-	18.6	-

4.1.1 Contenido de Azufre

El contenido de azufre depende únicamente de los aditivos sulfurados contenidos en el aceite y dado que se trata de un mismo tipo de aceite el contenido es similar, la media es de 0,38% p/p de azufre. El resultado es relativamente bajo ya que el límite para el diesel #2 es de 0,7 % p/p y dado que el aceite lubricante usado es la materia prima para obtener diesel #2, es un buen resultado el hecho de que su contenido de azufre sea bajo. En la Figura 4. 2 se puede observar los datos de las cinco muestras analizadas y su respectiva media.

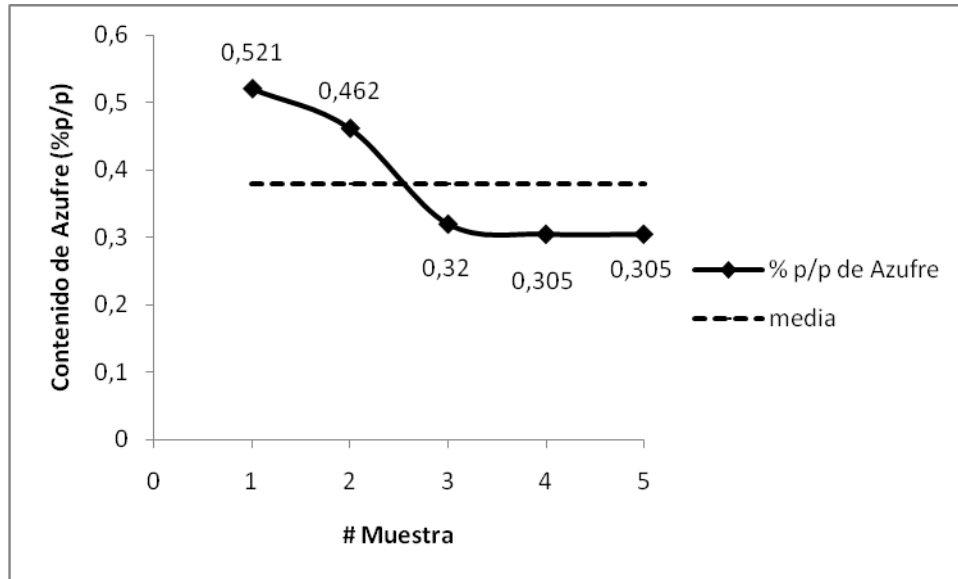


Figura 4. 2: Contenido de Azufre

4.1.2 Viscosidad cinemática e Índice de viscosidad

La viscosidad difiere ampliamente en todas las muestras porque depende del uso del aceite y cada muestra fue obtenida en lugares diferentes. Se tomaron datos a 40°C y 70°C con el fin de extrapolar un dato a 100°C y así obtener el índice de viscosidad que de acuerdo con la norma D2270 [16] determina la variación en la viscosidad cinemática debido a cambios en la temperatura del producto entre 40 y 100°C. El índice de viscosidad es 122, lo que significa que el aceite no tiene un buen comportamiento frente a las variaciones de temperatura, es decir que a medida que la temperatura aumenta, la viscosidad cinemática del aceite lubricante usado se ve afectada de mayor manera. En la Figura 4. 3 se muestran los diferentes datos de viscosidad cinemática a 40°C y 70°C y sus respectivas medias.

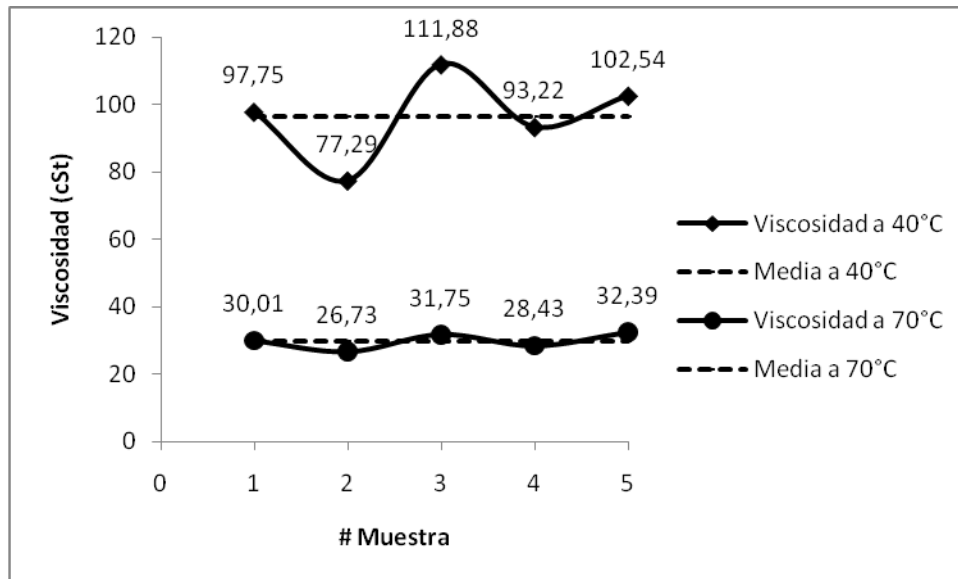


Figura 4. 3: Viscosidad a 40°C y 70°C

4.1.3 Gravedad API

La gravedad API es similar en todas las muestras porque básicamente depende de la estructura química del aceite lubricante. En la Figura 4. 4 se muestran los resultados de esta prueba para las diferentes muestras y su media.

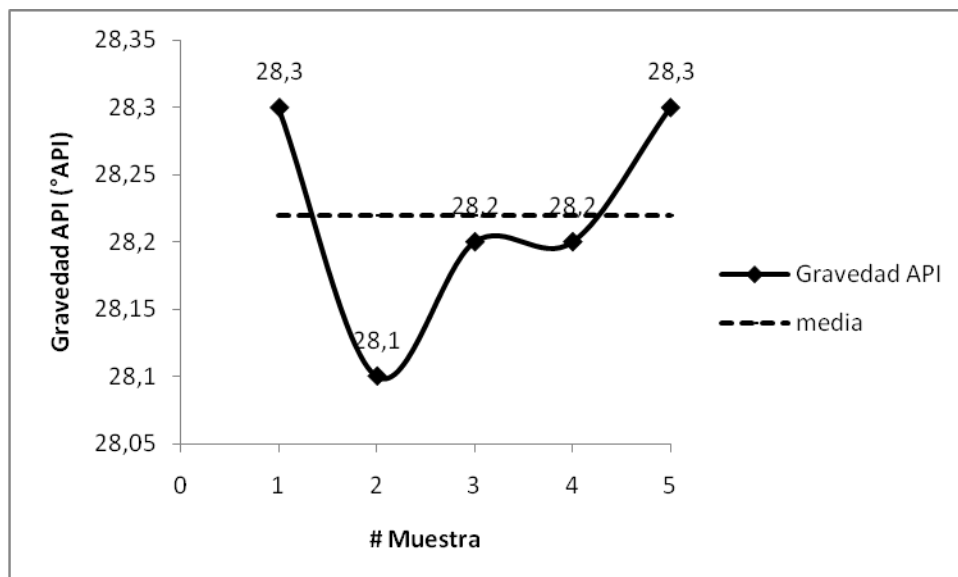


Figura 4. 4: Gravedad API

4.1.4 Punto de Inflamación

El punto de inflamación tiene una desviación estándar relativamente baja, esto es porque el aceite lubricante contiene básicamente hidrocarburos pesados. En la Figura 4.5 se puede observar que el punto más bajo es a 88°C y el más alto a 95°C; significa que el aceite lubricante usado está compuesto en su mayoría por hidrocarburos pesados con puntos de inflamación altos.

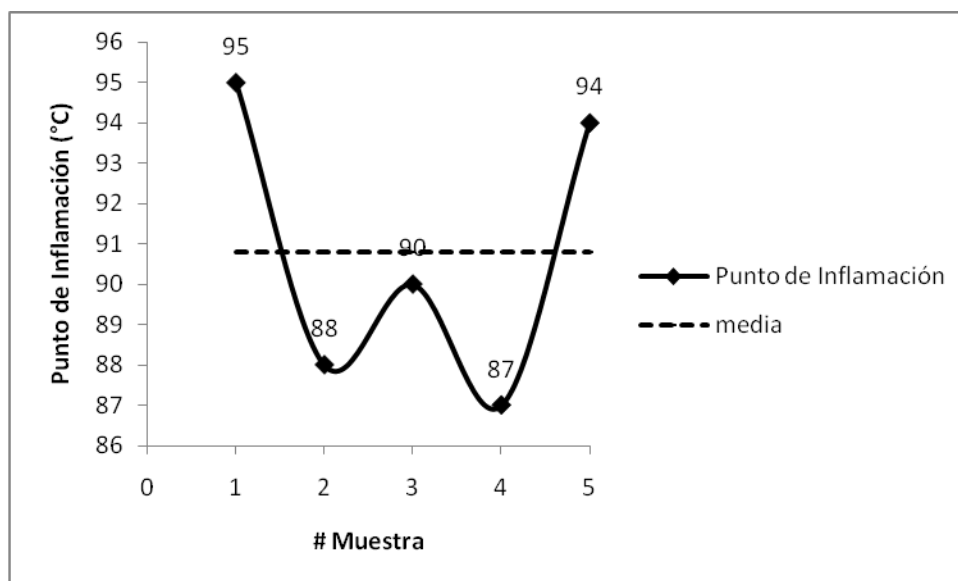


Figura 4. 5: Punto de Inflamación

4.1.5 Destilación

En lo que respecta a la destilación se nota que la media del punto inicial de ebullición es 79.80 °C, la media de la temperatura del 50% destilado es de 361.80°C y la media de la temperatura del 90% del destilado es de 400°C. En la Figura 4. 6 se puede ver una desviación estándar grande ya que algunas muestras de aceites lubricantes contienen gasolina o en general hidrocarburos livianos que destilan a temperaturas más bajas, en cambio otras muestras contienen mayor cantidad de pesados, por lo que los datos también difieren en la destilación del 90%.

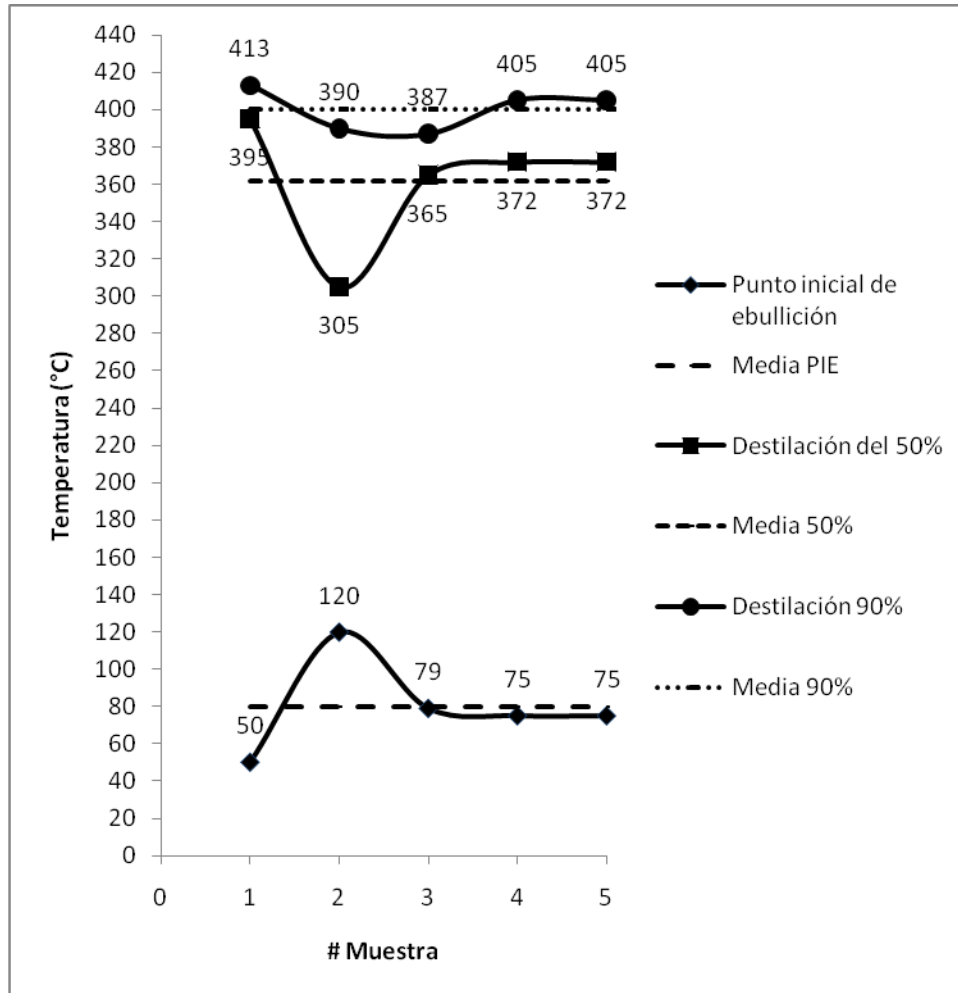


Figura 4. 6: Destilación

4.1.6 Corrosión a la lámina de cobre

En cuanto a la prueba de corrosión a la lámina de cobre, todas excepto la muestra 3 tienen un valor de 1b, este valor corresponde al segundo en la escala que va desde 1a hasta 4c; 1b significa que la acción corrosiva del aceite lubricante usado es baja.

4.1.7 Contenido de Agua

El contenido de agua en todas las muestras de aceite usado se encuentra en cantidades similares en promedio de 0.38% en peso.

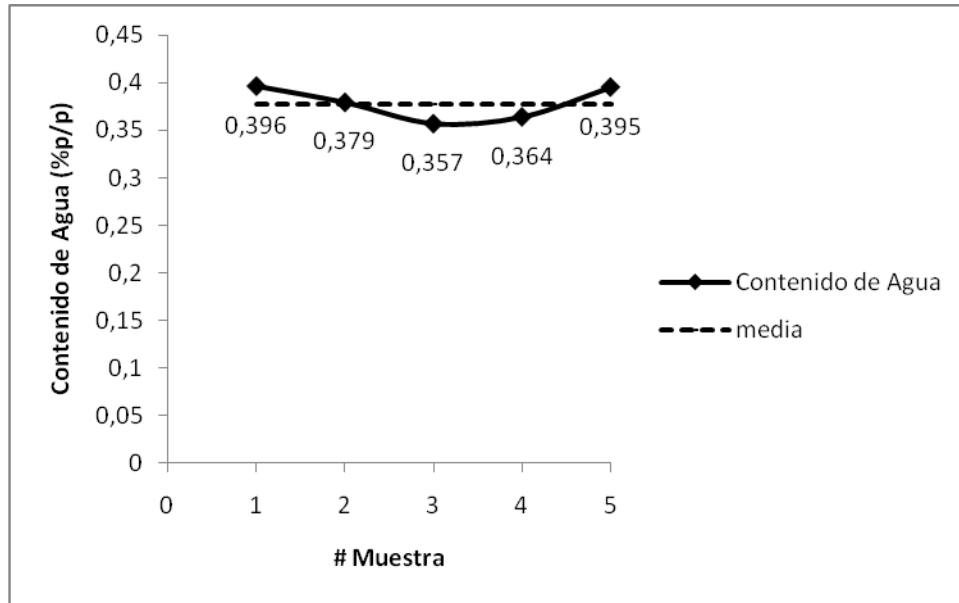


Figura 4. 7: Contenido de Agua

4.1.8 Número Total de Base (TBN)

Finalmente, el TBN es de 18.6 mg KOH/g, lo que está dentro de los rangos normales para aceites lubricantes usados. De acuerdo con la norma ASTM D-2896 [15], el rango para aceites lubricantes usados es de 5 a 27 mg KOH/g; esto significa que el aceite usado caracterizado tiene un nivel medio de constituyentes básicos.

4.1.9 Contenido de Metales

En la Tabla 4. 2 se encuentran tabulados los resultados del contenido de metales en el aceite usado.

Tabla 4. 2: Resultados de los metales presentes en el aceite usado

Experimento	1	2	3	4	5	media	desviación
Zinc (mg/L)	1036,96	954,43	1034,8	1035,7	1029,6	1018,28	35,80
Plomo (mg/L)	5,06	7,04	5,57	5,38	5,29	5,67	0,79
Hierro (mg/L)	46,44	55,39	48,2	46,32	47,59	48,79	3,77

Manganeso (mg/L)	10,13	10,14	10,38	10,28	10,15	10,216	0,11
Cromo (mg/L)	2,53	1,98	1,65	1,7	2,34	2,04	0,39

De acuerdo con la Figura 4. 8 se puede notar que el contenido metálico está dominado por el Zinc con 1018.28 mg/L de aceite usado. Esto se debe a que los aceites lubricantes contienen ditiofosfatos de Zinc, los cuales funcionan como inhibidores de oxidación y corrosión de rodamientos. Después le sigue el Hierro cuya concentración es de 48.79 mg/L de aceite usado. Esto se debe a que el motor de un automóvil está compuesto principalmente por hierro fundido. El manganeso, el plomo y el cromo también son metales que forman parte del motor, es por esto que son los metales que siguen en concentración con 10.21, 5.67 y 2.04 mg/L de aceite usado, respectivamente. Estos son los metales más representativos que se encuentran en el aceite usado.

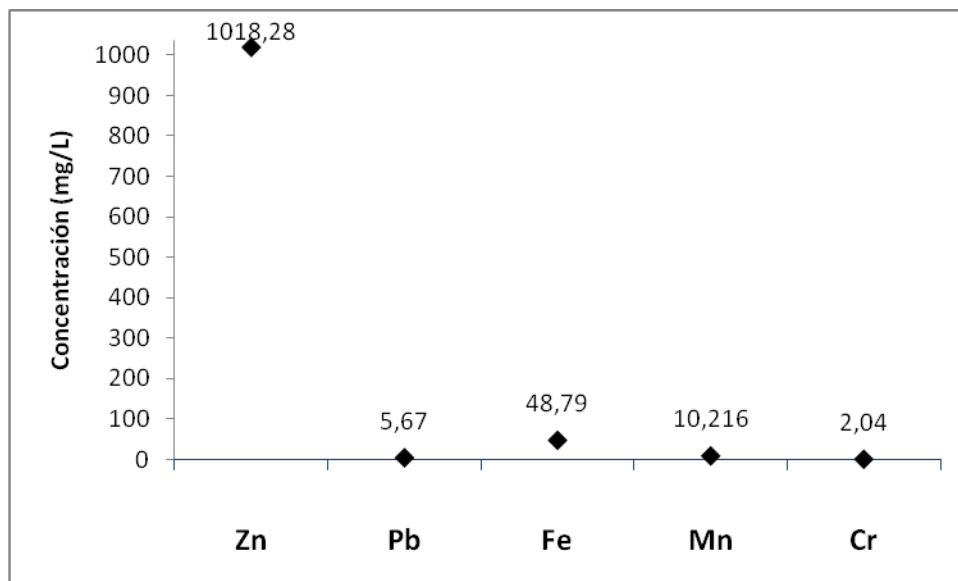


Figura 4. 8: Contenido Metálico

4.2 Proceso de Conversión del aceite usado en combustible líquido

4.2.1 Craqueo térmico

El proceso de craqueo térmico fue realizado 5 veces con cada una de las muestras para dar un total de 25 experimentos. La Figura 4. 9 expone la media de la temperatura obtenida a diferentes tiempos de la reacción de craqueo térmico. El proceso de craqueo térmico dura alrededor de 6 horas en promedio y la temperatura aumenta hasta 355°C en las dos primeras horas. En la primera hora la temperatura sube de 15 °C a 331°C. En la segunda hora la temperatura sube hasta 355°C y la potencia es bajada de 440W a 300W para que se mantenga la temperatura en 355°C. Desde la tercera hora hasta el final del experimento la temperatura se mantiene constante en 355°C con el fin de disminuir la producción de hidrocarburos livianos, como señala Wansbrough [4] en su patente.

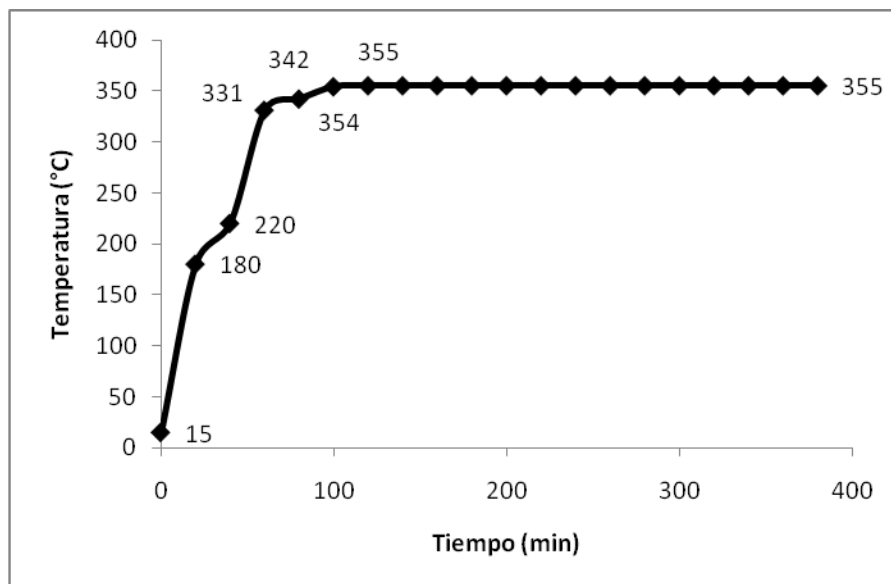


Figura 4. 9: Temperatura de craqueo vs tiempo

La Figura 4. 10 muestra el cambio de la conversión a medida que pasa el tiempo. La conversión está definida como la relación de la diferencia de las concentraciones inicial y final, y la concentración inicial. La conversión llega a 67% en las dos primeras horas y desde la tercera hora en adelante el proceso es más lento, demorándose alrededor de 4 horas en finalizar la reacción.

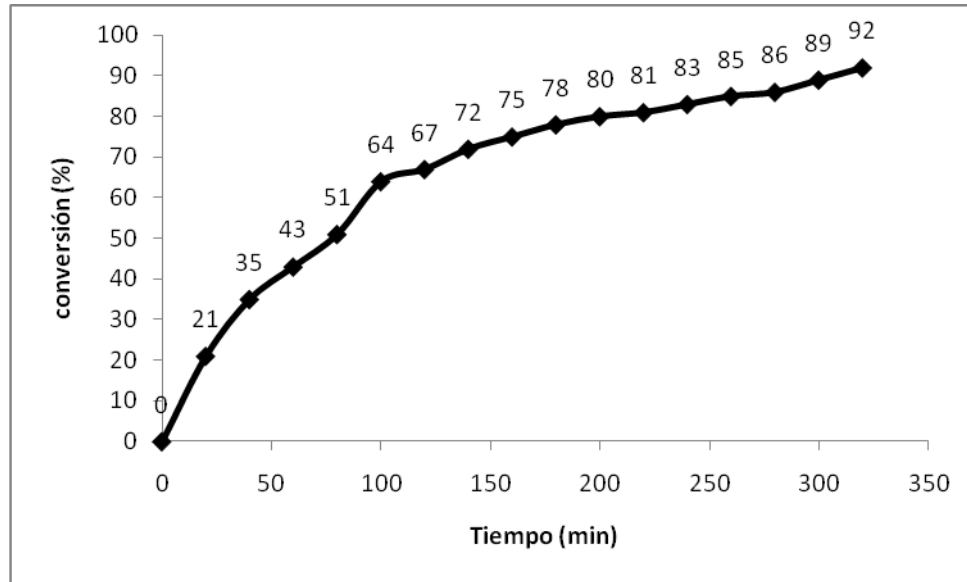


Figura 4. 10: Conversión del proceso de craqueo vs tiempo
(Carga = 200 mL, Presión = 1 atm)

Al finalizar el proceso, se procede a separar el producto del residuo, es decir los hidrocarburos líquidos del coque formado en la base y paredes del mini-reactor. El producto constituye el 87% de la carga, las pérdidas en gases expulsados constituyen el 3% y el coque el 10%. El producto está constituido por hidrocarburos con puntos de ebullición desde 53°C hasta 355°C.

La Figura 4. 11 es una fotografía del producto craqueado que constituye el 87% de la carga de aceite usado. Se puede notar que de un color negro espeso, en la Figura 4. 1, pasó a un color café oscuro fluido. Esto se debe a que los compuestos más pesados junto con los metales y contaminantes, se quedaron en el fondo del reactor en forma de coque.



Figura 4. 11: Producto del craqueo térmico

Para eliminar el coque del reactor se debe raspar el vidrio con una espátula de metal. El resto es removido con la ayuda de arena. Con este procedimiento los balones de vidrio o reactores pueden servir para un promedio de 5 experimentos hasta que finalmente el vidrio se fractura.

4.2.2 Destilación Fraccionada

En el proceso de destilación se toma el producto del craqueo térmico de los 25 experimentos anteriores y se lo somete a una destilación atmosférica en un balón de vidrio con cuello largo de 100 mL. En total se realizaron alrededor de 40 experimentos para la destilación fraccionada. La parte ancha del balón funciona como calderín y el cuello como columna de destilación. En la Tabla 4. 3 se muestran los resultados promedio de la destilación fraccionada y se detalla el porcentaje volumétrico obtenido para cada una de los rangos de temperatura. Se puede notar que en promedio los hidrocarburos livianos constituyen un 7.9 % del total de producto, los pesados un 8.1 % y la fracción de producto medio constituye un 84%. Los pesados son realimentados al proceso de craqueo térmico.

Tabla 4. 3: Resultados del proceso de destilación fraccionada

Temperatura (°C)	Destilado (% v/v)
$T \leq 160$	7,9
$161 \geq T \leq 360$	84
$T \geq 361$	8,1

Como se muestra en la Figura 4. 12, la temperatura empieza a aumentar de una manera acelerada hasta obtener alrededor del 15% del destilado. Después la temperatura aumenta constantemente desde los 200°C hasta que se termina el proceso de destilación.

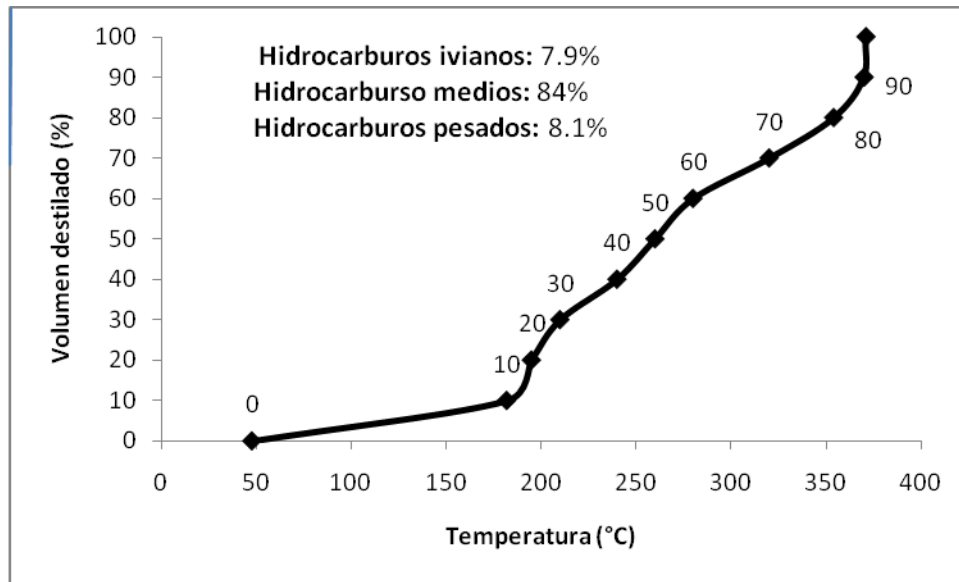


Figura 4. 12: Volumen destilado vs temperatura.
(Carga = 100 mL, Presión = 1 atm, Potencia = 440W)

Por otro lado, la Figura 4. 13 muestra el tiempo requerido para obtener los distintos porcentajes de volumen destilado. La velocidad de destilación es casi constante hasta el 80%, después aumenta hasta que finaliza la destilación.

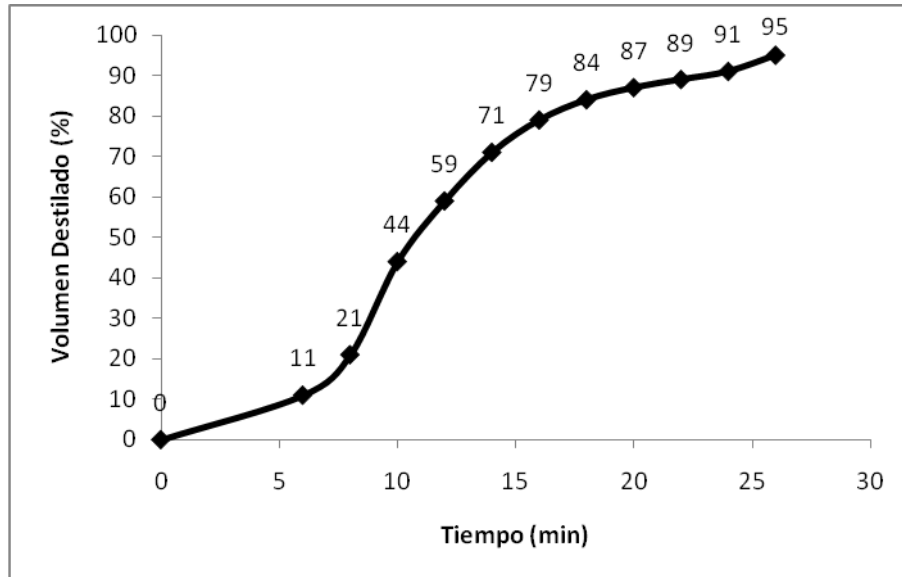


Figura 4. 13: Volumen destilado vs tiempo
(Carga = 100 mL, Presión = 1 atm, Potencia = 440W)

La Figura 4. 14 es una fotografía del producto medio, resultado de la destilación fraccionada. Se puede notar que su color es más claro que el del producto de craqueo.



Figura 4. 14: Hidrocarburos medios

4.2.3 Rectificación

La rectificación es una destilación atmosférica cuya alimentación son los hidrocarburos medios, de los cuales se obtendrá el diesel #2. Se somete a los hidrocarburos medios a una temperatura máxima de 160°C, con el fin de eliminar los hidrocarburos livianos que son los

que modifican de una manera importante el punto de inflamación y la prueba de destilación.

Para este proceso se eliminaron los livianos que se produjeron al realizar la destilación. Se puede notar en la Tabla 4. 4 que solamente se produjeron un promedio de 2.4% de livianos, los cuales fueron separados del producto medio que constituye el 97.6%.

Tabla 4. 4: Resultados del proceso de rectificación

Temperatura (°C)	Destilado (% v/v)
$T \leq 160$	2,40
$161 \geq T \geq 360$	97,60

4.2.4 Filtración

La filtración del producto medio, previamente sometido a rectificación, permitió la remoción del agua restante, olefinas reactivas y compuestos sulfurados. Ésta fue realizada en una columna de vidrio con lana de vidrio en el fondo y relleno de sílica gel. En total la columna rellena tiene un volumen de 94.24 cm³. De acuerdo con la Figura 4. 15 se nota que para filtrar una muestra de 50 cm³ se necesitan alrededor de 105 minutos, es decir que la velocidad de filtración es de 0.44 cm³/min.

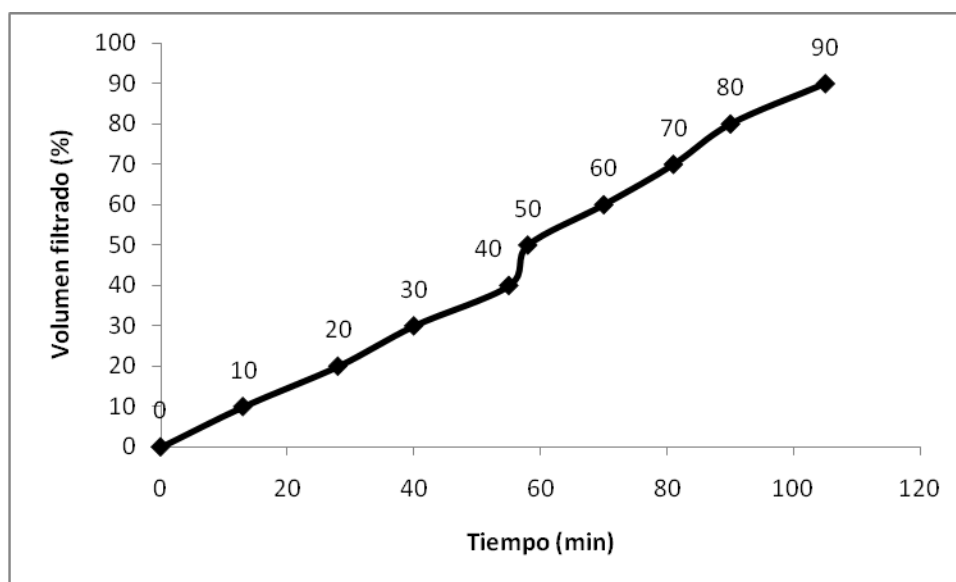


Figura 4. 15: Volumen filtrado vs tiempo

Si se observa la Figura 4. 16 se puede notar como el color del producto se aclaró pasando de café claro a verde claro. Esto se debe a la eliminación de algunas olefinas reactivas, que según Guthrie [6] se degradan y oscurecen al diesel #2.



Figura 4. 16: Producto final filtrado

El contenido de azufre bajó de 0.44 a 0.29 % p/p. En cuanto al agua no se pueden dar cifras, porque anteriormente el producto tenía solamente trazas, sin embargo dada la condición desecante de la sílica gel, se supone una remoción de la mayoría de las trazas de agua. Se recuperó como diesel #2 filtrado solamente el 91% del total filtrado, es decir que las impurezas retenidas y algo del producto que se quedó retenido en la sílica gel representan el 9% del total filtrado.

Finalizado el proceso de conversión de aceite lubricante usado en diesel #2, en la Figura 4. 17 se muestran los porcentajes de cada producto obtenido a partir del aceite lubricante usado.

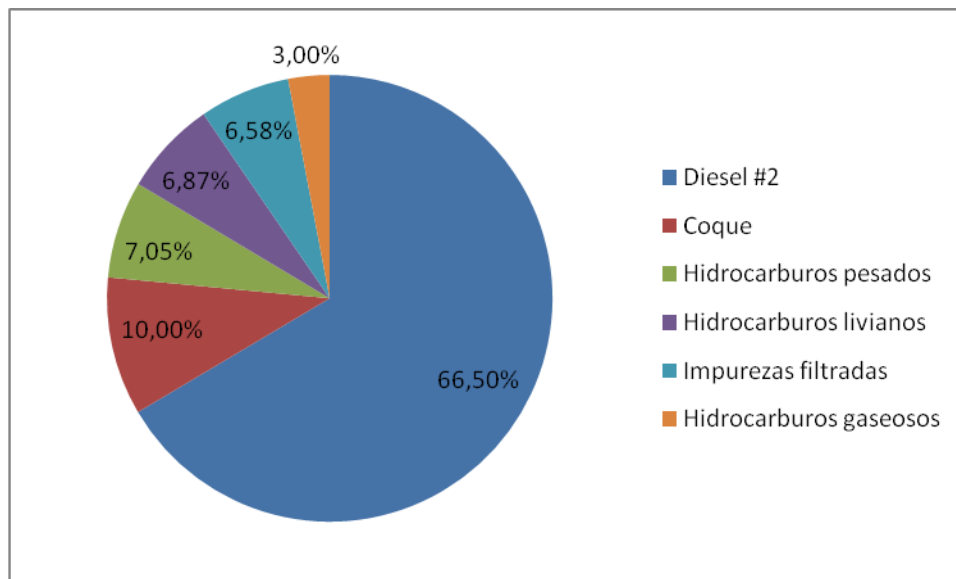


Figura 4. 17: Porcentajes de productos obtenidos a partir del aceite lubricante usado

4.3 Comparación de las propiedades de los productos de cada proceso

En la Tabla 4. 5 están tabuladas las propiedades de la materia prima, los productos intermedios y el producto final con el fin de visualizar mejor la evolución de las propiedades representativas.

Tabla 4. 5: Evolución de las propiedades luego de cada proceso

	Aceite usado	Hidrocarburos craqueados	Hidrocarburos Medios	Producto rectificado	Producto filtrado
Azufre (% p/p)	0.38	0.46	0.5	0.44	0.29
Viscosidad	113.24	12.07	5.19	3.43	3.22

Cinemática a 37.8°C (cSt)					
Gravedad API (°API)	28.22	35.08	35.53	37.59	37.87
Punto de Inflamación (°C)	90.8	19	42	63	62
Destilación PIE (°C)	79.8	64	141	161	162
Destilación 50% (°C)	361.8	356	310	279	279
Destilación 90% (°C)	400	392	387	348	349
Corrosión a la lámina de cobre	1b	1b	1b	1a	1a
Cantidad de Agua (% p/p)	0.38	0.15	trazas	trazas	trazas
Color	negro	café oscuro	café medio	café claro	verde claro

4.3.1 Contenido de Azufre

Se puede observar en la Figura 4. 18 que el contenido de azufre aumenta desde 0.38 % p/p en el aceite usado hasta llegar a 0.5% p/p en los hidrocarburos medios, resultado de la destilación. Este cambio en el azufre se debe a que a medida que se somete a la carga a procesos con altas temperaturas, se concentra el azufre ya que hay pérdidas en gases y coque. Luego empieza a disminuir hasta llegar a 0.29 % p/p en el producto final que ha sido sometido a filtración, esto se debe a que la sílica gel, es decir el medio filtrante, retiene los compuestos sulfurados.

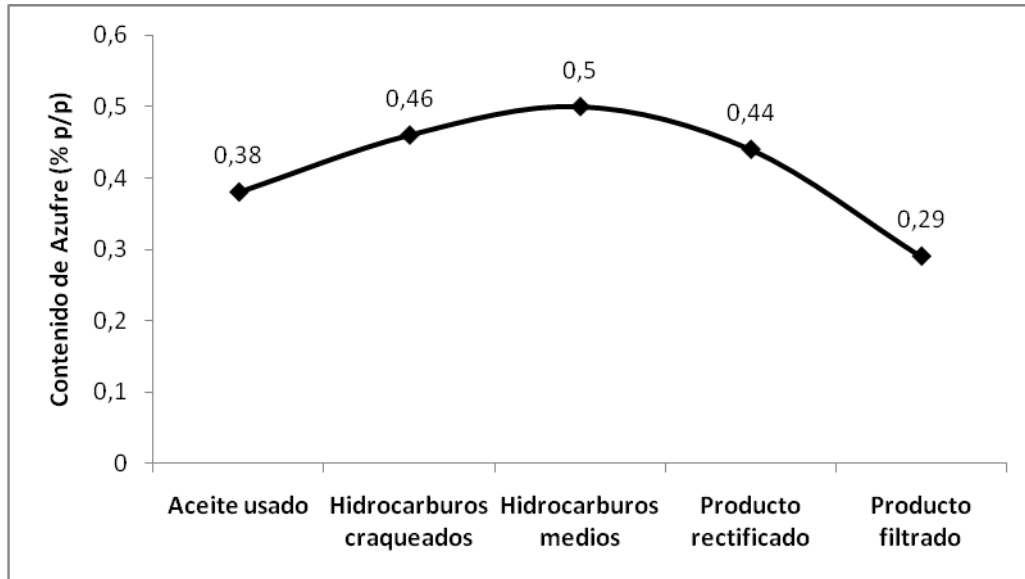


Figura 4. 18: Contenido de Azufre

4.3.2 Viscosidad Cinemática a 37.8°C

Según la Figura 4. 19, la viscosidad disminuye desde 113.24 cSt que tiene el aceite usado antes de ser sometido a algún procedimiento, hasta 3.22 cSt al finalizar la filtración. Este fenómeno se da porque a medida que la carga es sometida a los diferentes procesos las cadenas de hidrocarburos disminuyen en tamaño y esto hace que los hidrocarburos disminuyan su viscosidad.

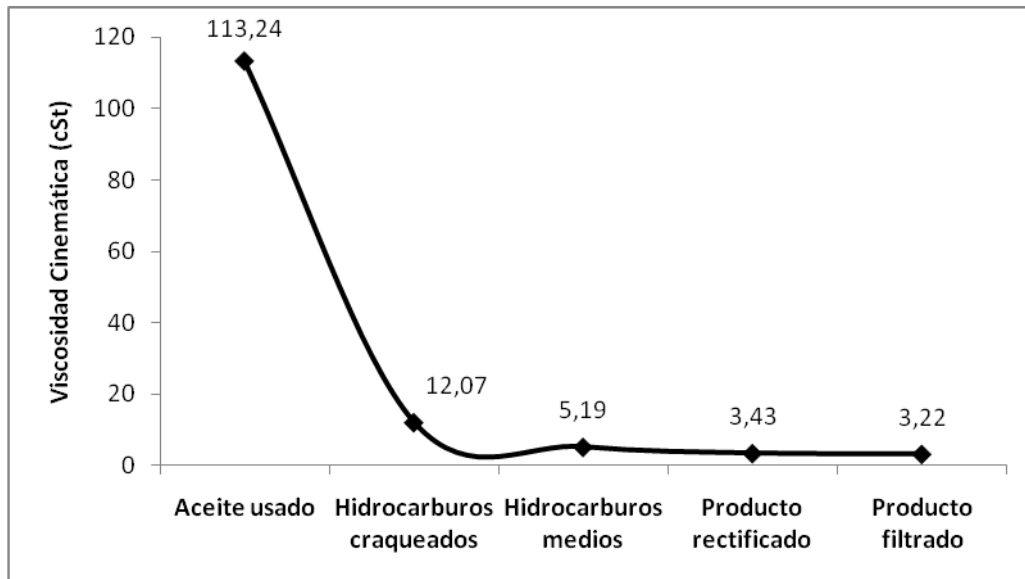


Figura 4. 19: Viscosidad Cinemática a 37.8°C

4.3.3 Gravedad API a 15.6 °C

Se puede notar en la Figura 4. 20 como la gravedad API aumenta de una manera casi lineal desde 28.22°API en el aceite usado hasta 37.87 °API en el producto final que ha sido sometido a filtración. Esto significa que a medida que las cadenas de hidrocarburos disminuyen su tamaño, el producto presenta menor peso específico.

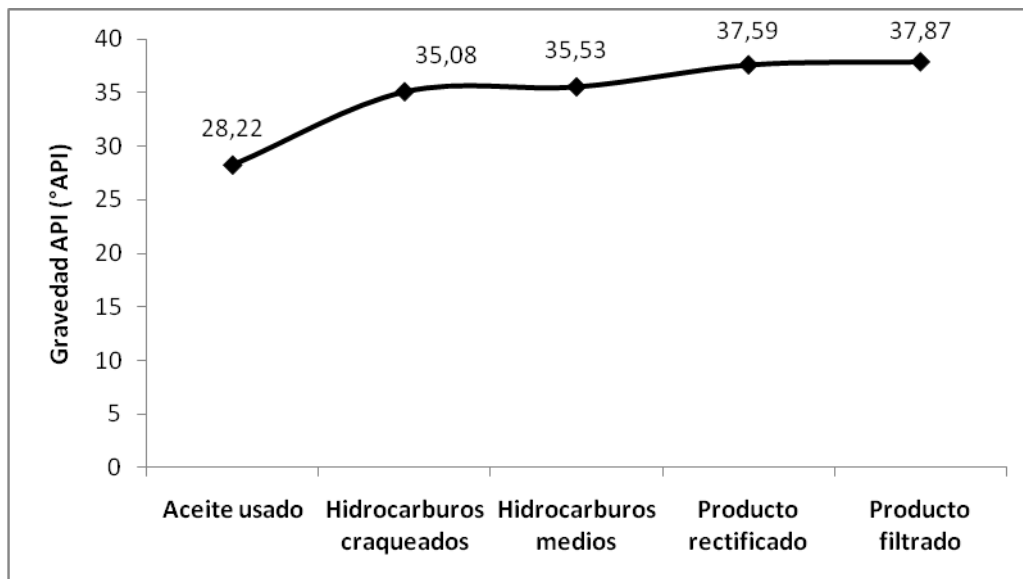


Figura 4. 20: Gravedad API a 15.6 °C

4.3.4 Punto de Inflamación

Se establece como una guía la Tabla 4. 6, en la que se presentan los puntos de inflamación para los combustibles más comunes.

Tabla 4. 6: Puntos de inflamación para hidrocarburos combustibles

Hidrocarburo	Punto de inflamación (°C)
GLP	- 67
gasolina extra	- 42
Jet A1	38
diesel #1	41
diesel #2	60

Se puede ver en la Figura 4. 21 que el punto de inflamación disminuye después del craqueo de 90.8°C a 19 °C. Este cambio tan brusco se debe a que las cadenas de hidrocarburos se rompen hasta obtener hidrocarburos muy livianos cuyos puntos de inflamación son muy bajos. Después de la destilación y rectificación del producto medio, el punto de inflamación empieza a aumentar desde 42°C a 62°C. Este fenómeno se debe a que al momento de la

destilación se separan los componentes livianos y finalmente en la rectificación los livianos son retirados por completo.

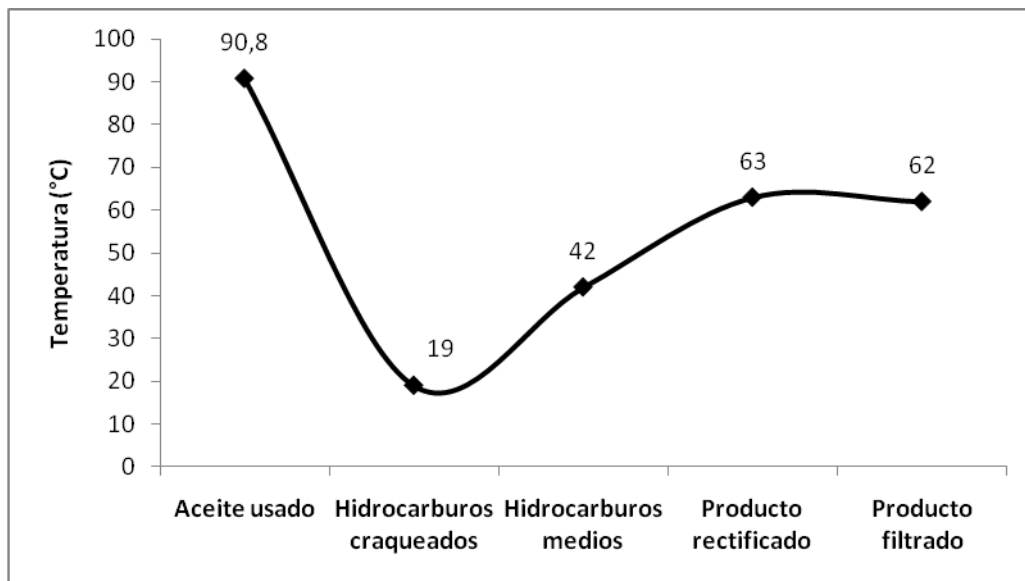


Figura 4. 21: Punto de Inflamación

4.3.5 Destilación

En la Figura 4. 22 se nota que en la destilación se dan cambios en las temperaturas inicial, media y final. En cuanto a la temperatura inicial, disminuye después del proceso de craqueo térmico, es decir en el paso de aceite usado a hidrocarburos craqueados. Luego cuando el producto es rectificado, aumenta hasta llegar a parecerse a la temperatura inicial del diesel comercial en 162°C. Asimismo, las temperaturas media y final disminuyen después del craqueo térmico, como se espera para volver a aumentar y asemejarse al diesel #2 comercial.

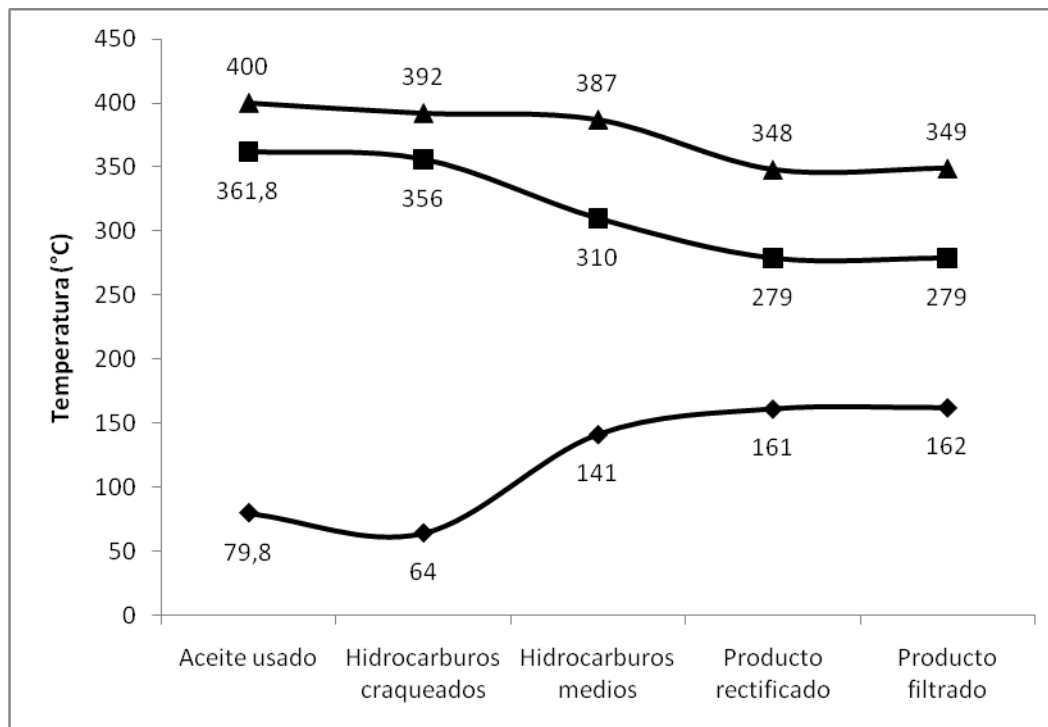


Figura 4. 22: Destilación

4.3.6 Corrosión a la lámina de cobre

La corrosión a la lámina de cobre se mantiene constante en 1b hasta que baja a 1a después de que la muestra es rectificada. Esto significa que el producto final es menos corrosivo que la materia prima y los productos intermedios.

4.3.7 Contenido de Agua y Color

La cantidad de agua disminuye con el paso de los diferentes procesos. Finalmente, el color se aclara desde negro hasta verde claro, obteniendo así un producto final de buen aspecto.

4.4 Comparación del producto obtenido con diesel #2 comercial

4.4.1 Comparación de las propiedades fisicoquímicas

Comparando con la Tabla 3. 2, se puede notar que tanto los datos del diesel #2 comercial como los del producto medio cumplen con los requisitos establecidos por el INEN. Los resultados se encuentran resumidos en la Tabla 4. 7.

Tabla 4. 7: Resultados de propiedades para diesel comercial y producto final

Prueba	Diesel #2 comercial	Producto final	Requisitos INEN
Punto de inflamación (°C)	72	62	mínimo 51
Agua y sedimentos (% v/v)	trazas	trazas	máximo 0,05
Residuo Carbonoso al 10% (% p/p)	0,08	0,12	máximo 0,15
Cenizas (% p/p)	0,01	0,01	máximo 0,01
Temperatura de destilación (90%) (°C)	345	349	máximo 360
Viscosidad (cSt) (37,8°C)	3,2	3,2	de 2.5 a 6
Azufre (%p/p)	0,36	0,29	máximo 0.7
Corrosión a la lámina de Cu	1a	1b	máximo 1c
Índice de Cetano calculado	49,7	54	mínimo 45

Las Figuras 4. 23 y 4. 24 son el diesel #2 comercial y el producto final obtenido, respectivamente.



Figura 4. 23: Diesel #2 comercial



Figura 4. 24: Producto final

4.4.2 Comparación de los espectros IR

Mediante el instrumento *Spectrum BX FT-IR System Perkin Elmer*, se obtuvieron los espectros IR de diesel #2 comercial y el producto final. Se puede notar en la Figura 4. 25 que los espectros son similares, sus bandas se encuentran dispuestas de manera que absorben radiación a números de onda parecidos. En la Tabla 4. 8 se expresan algunos rangos en los que coinciden el diesel #2 comercial y el producto final.

Tabla 4. 8: Comparación de frecuencias de absorción en el rango infrarrojo

Enlaces	Tipo de compuesto	Rangos de frecuencia (cm ⁻¹)		
		<i>Texto Skoog [38]</i>	<i>Diesel #2 comercial</i>	<i>Producto final</i>
C-H	Alcanos	2850-2970	2873.67	2873.39
C-H	Alcanos	1340-1470	1461.32	1461.32
C-H	Alquenos	675-995	931.24	909.67
C-H	Aromático	690-900	740.39	723.61
C=C	Alquenos	1610-1680	1668.22	1642.39
C ≡ C	Alquinos	2100-2260	2210.87	2211.85

Tanto el diesel #2 comercial como el producto final son una mezcla de hidrocarburos que van desde cadenas con 12 carbonos hasta cadenas con 20 carbonos. De acuerdo con la Tabla 4. 8, que es un resumen de la Figura 4. 25, se observa que tanto el diesel #2 comercial como el producto final tienen alcanos, alquenos, compuestos aromáticos y

alquinos. Esto se ve reflejado en las frecuencias en las que los diferentes enlaces absorben energía. El diesel #2 comercial y el producto final tienen alcanos cuyos enlaces carbono-hidrógeno vibran en frecuencias de 2873.67 cm^{-1} y 2873.39 cm^{-1} ; y 1461.32 cm^{-1} y 1461.32 cm^{-1} respectivamente. En cuanto a los alquenos, sus enlaces carbono-hidrógeno vibran en 931.24 cm^{-1} para el diesel #2 comercial y 909.67 cm^{-1} para el producto final. Los enlaces carbono-carbono de los alquenos vibran en 1668.22 cm^{-1} para el diesel #2 comercial y en 1642.39 cm^{-1} para el producto final. En cuanto a los compuestos aromáticos, los enlaces carbono-hidrógeno vibran en 740.39 cm^{-1} para el diesel #2 comercial y en 723.61 cm^{-1} para el producto final. Para los alquinos, los enlaces carbono-carbono vibran en 2210.87 cm^{-1} para el diesel #2 comercial y en 2211.85 cm^{-1} para el producto final.

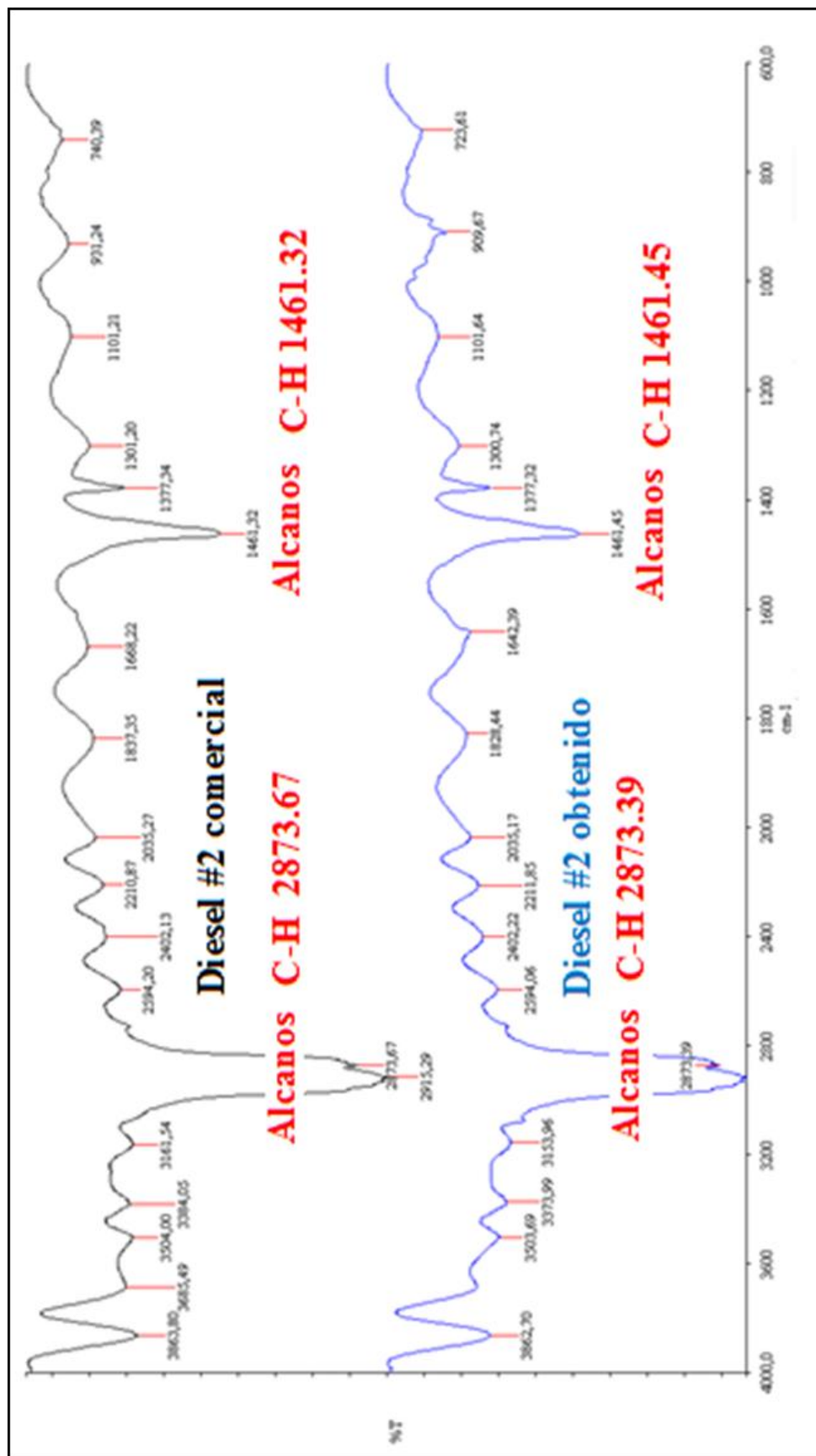


Figura 4. 25: Espectros IR para diesel #2 comercial y producto final

5 Diseño de una planta piloto de obtención de combustible líquido a partir de aceite lubricante usado

5.1 Definición del proceso a utilizarse

La planta piloto es diseñada para una producción diaria de 19 L de diesel #2. Aunque en el procedimiento experimental se dispone de cuatro etapas, en el diseño de la planta piloto se reducen a tres porque se elimina el proceso de rectificación. Esto se debe a que en la planta piloto se dispone de equipos individuales con mayor control para cada etapa y no de un solo equipo en el que se realiza todo, como en la parte experimental. La descripción del proceso está basada en la Figura 5. 1, que es el diagrama de flujo del proceso.

Las tres etapas del proceso de conversión de aceite lubricante usado en diesel #2 son: craqueo térmico del aceite usado, destilación del producto craqueado y filtración del producto final. Primeramente, se almacena el aceite recolectado en el tanque (a), el cual tiene capacidad para 400 L. El tiempo de residencia del aceite usado en el tanque es de 15 días, es decir que cada 15 días se vuelve a llenar el tanque. Este tanque además de servir para almacenar el aceite, funciona como un decantador, permitiendo que parte de las impurezas y el agua contenida en el aceite se sedimenten.

Mediante la bomba (P_1) se bombean 24.27 kg/día de aceite lubricante usado e hidrocarburos pesados recirculados hacia el reactor de craqueo térmico (b), en donde las moléculas de los hidrocarburos del aceite lubricante usado se rompen a causa de la temperatura que se debe mantener en 355°C para orientar la reacción a un combustible similar al diesel #2. Luego se bombean 21.12 kg de producto craqueado mediante la bomba (P_2) hacia la columna de destilación (c) en donde se separa el producto craqueado en tres: 6.53 kg de hidrocarburos livianos hasta 160°C, 18.68 kg de hidrocarburos medios hasta 350°C y 1.84 kg de hidrocarburos pesados.

Los hidrocarburos livianos son enfriados en el condensador (W_1), 5.93 kg son devueltos a la columna de destilación (c) y 0.6 kg son almacenados en un tanque. Los hidrocarburos medios son enfriados mediante el intercambiador de calor (W_2), para luego ser bombeados por la bomba (P_3) hacia el sistema de filtración. El producto final son 20 L

de hidrocarburos medios, denominados diesel #2, que mediante la bomba (P₄) son bombeados hacia un tanque de almacenamiento. Finalmente, los hidrocarburos pesados son enfriados en el intercambiador (W₃) para luego ser recirculados hacia el reactor de craqueo térmico (b) con el fin de que sean craqueados nuevamente.

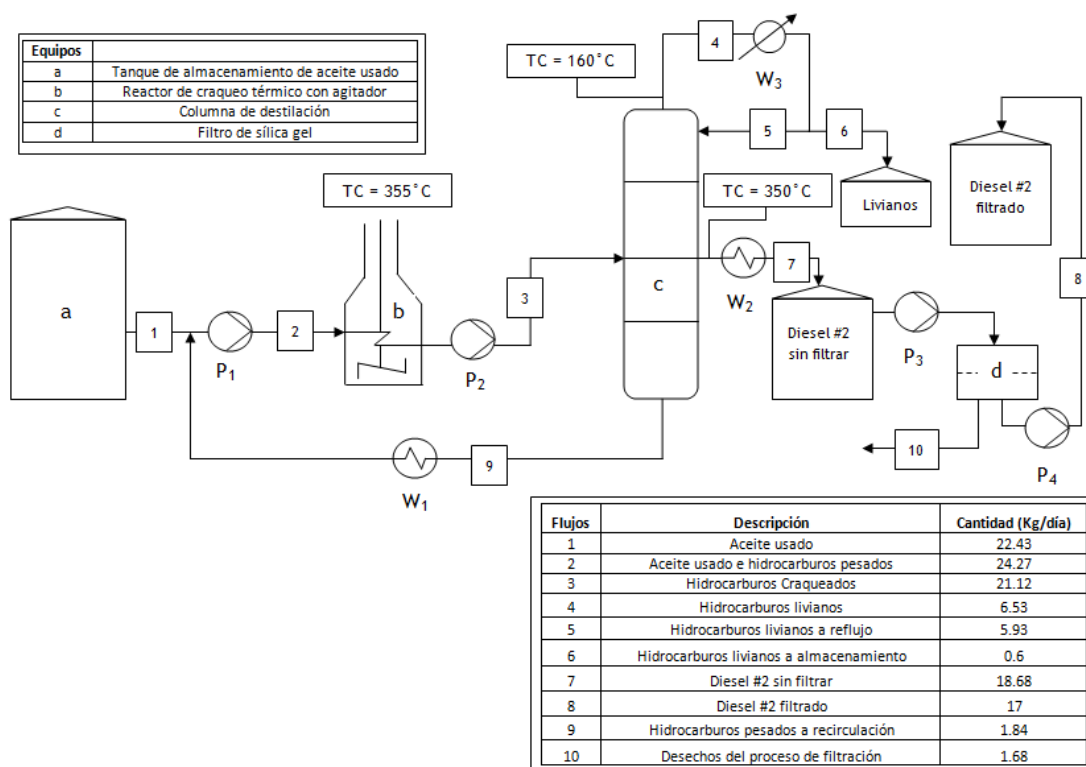


Figura 5. 1: Diagrama de Flujo del proceso de conversión de aceite usado en combustible líquido

5.2 Obtención de la conversión, rendimiento y selectividad de la reacción química del proceso

En la Tabla 5. 1 se presentan datos de concentración para el aceite lubricante usado, que constituye el reactivo y para el producto que es la mezcla de hidrocarburos. Como se explica en el punto 3.5, se asume como reactivo al tricontano (C₃₀H₆₂), que es un alcano presente en los aceites lubricantes tanto nuevos como usados.

Tabla 5. 1: Concentración del reactivo y el producto, de acuerdo al tiempo

tiempo (min)	Concentración (gmol/L)	
	Reactivo	Producto
0	209,72	0,00
20	165,68	78,98
40	136,32	131,64
60	119,54	161,73
80	102,76	191,81
100	75,50	240,71
120	69,21	251,99
140	58,72	270,80
160	52,43	282,08
180	46,14	293,36
200	41,94	300,88
220	39,85	304,65
240	35,65	312,17
260	31,46	319,69
280	29,36	323,45
300	23,07	334,73
320	16,78	346,02

Con los datos obtenidos en la Tabla 5.1 se puede determinar la conversión, rendimiento y selectividad de la reacción de craqueo térmico para el tricontano, que en este caso es el reactivo que representa al aceite usado. De acuerdo con Levenspiel [39], la conversión es la fracción del reactivo que ha reaccionado, el rendimiento es la fracción de todo el reactivo que ha reaccionado y se ha convertido en el producto y finalmente la selectividad es la

relación entre las moles formada de producto deseado y las moles formadas de producto no deseado.

A continuación se presentan las ecuaciones para la obtención de cada uno de los términos anotados anteriormente:

Tabla 5. 2: Ecuaciones de conversión, rendimiento y selectividad

<i>Conversión</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Selectividad</i>
$X_A = \frac{N_{A0} - N_A}{N_{A0}}$ <p style="text-align: center;">Ec.5.2</p>	$Y_{KA} = \frac{N_k - N_{k0}}{N_{A0}} \times \left(\frac{v_A}{v_k} \right)$ <p style="text-align: center;">Ec.5.3</p>	$S_{KA} = \frac{N_k - N_{k0}}{N_{A0} - N_A} \times \left(\frac{v_A}{v_k} \right) = \frac{Y_{KA}}{X_A}$ <p style="text-align: center;">Ec.5.4</p>

Donde A es el reactivo, K es el producto, X_A es la conversión de A (-), Y_{KA} es el rendimiento de K sobre A , S_{KA} es la selectividad de K sobre A , N_{A0} es el número inicial de moles de A (mol), N_A es el número final de moles de A (mol), N_{K0} es el número inicial de moles de K (mol), N_K es el número final de moles (mol) y $\left(\frac{v_A}{v_k} \right)$ es el factor estequiométrico.

Con los datos de la Tabla 5. 1 y la ecuación 5.1, se presenta la Tabla 5. 3 donde se muestran los resultados conversión, rendimiento y selectividad para la reacción de craqueo térmico, utilizando las concentraciones y una base de 100 mL:

Tabla 5. 3: Datos para la obtención de conversión, rendimiento y selectividad

N_{A0}	N_A	N_{K0}	N_K	V_A/V_K	X_A	Y_{KA}	S_{KA}
2,097	0,167	0	3,460	1/3	0,92	0,597	0,649

Estos resultados significan que durante la reacción de craqueo térmico la conversión es de 92%, el rendimiento de la reacción es 60% y la selectividad de 65%.

5.3 Estudio cinético para obtener la ecuación de velocidad del craqueo térmico

Para obtener la expresión de velocidad de la reacción de craqueo se midió la concentración con respecto al tiempo para el reactivo principal de la reacción, asumido como tricontano ($C_{30}H_{62}$). Se supuso una cinética de orden n y se utiliza el método diferencial, previamente explicado en el punto 3.5.2. En la Tabla 5. 4 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 5. 4: Datos para obtener la ecuación de velocidad por el método diferencial

t (min)	C_A (gmol/L)	dC_A/dt	$\log_{10} (dC_A/dt)$	$\log_{10} C_A$
0	209,72	1,25	0,10	2,32
20	165,68	1,08	0,03	2,22
40	136,32	0,94	-0,03	2,13
60	119,54	0,82	-0,09	2,08
80	102,76	0,71	-0,15	2,01
100	75,50	0,62	-0,21	1,88
120	69,21	0,54	-0,27	1,84
140	58,72	0,47	-0,33	1,77
160	52,43	0,41	-0,39	1,72
180	46,14	0,35	-0,45	1,66
200	41,94	0,31	-0,51	1,62
220	39,85	0,27	-0,57	1,60
240	35,65	0,23	-0,63	1,55
260	31,46	0,20	-0,69	1,50
280	29,36	0,18	-0,76	1,47
300	23,07	0,15	-0,82	1,36
320	16,78	0,13	-0,88	1,22

A continuación se presenta la gráfica de concentración vs tiempo:

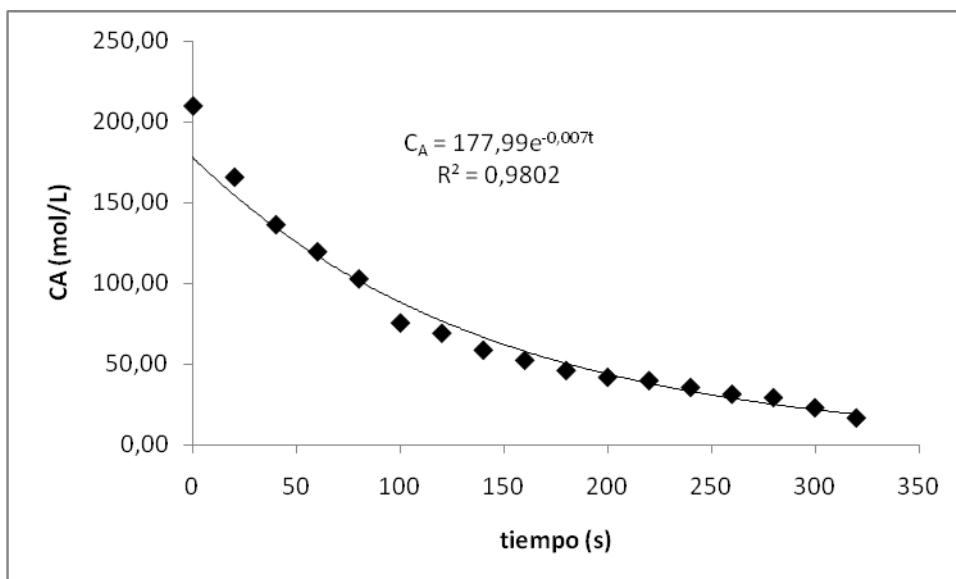
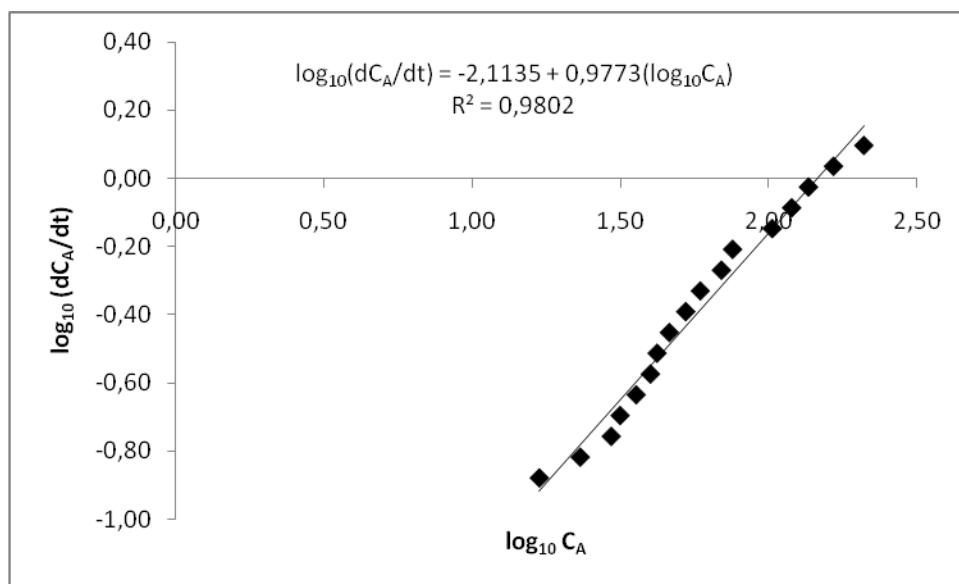


Figura 5. 2: Concentración vs tiempo

De acuerdo con la Figura 5. 2 se nota que los datos de concentración con respecto al tiempo siguen una tendencia exponencial. A partir de la expresión $C_A = 177.99e^{-0.007t}$ se obtienen las pendientes, es decir los datos de la columna 3. En las columnas 4 y 5 se toman los logaritmos en base 10 de la pendiente y la concentración con el fin de relacionar estas dos columnas y obtener una recta. A continuación se presenta en la Figura 5. 3 la gráfica lineal, basada en la ecuación 3.20, a partir de la cual se determinan los valores de la constante k y el orden n .

$$\log_{10}\left(\frac{dC_A}{dt}\right) = \log_{10} k + n \log_{10} C_A \quad \text{Ec. 3.20}$$

**Figura 5. 3:** Grafica lineal basada en la ecuación 3.20

De acuerdo con la figura 5. 3 la constante $k = 7.7 \times 10^{-3}$ y el orden es $n = 1$. Entonces la ecuación de velocidad queda de la siguiente manera:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = (0.0077)C_A \frac{\text{gmol}}{\text{L} \cdot \text{min}} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde $-r_A$ es la velocidad de reacción, C_A es la concentración de A (gmol/L), t es el tiempo (min), k es la constante de la velocidad de reacción (min^{-1}) y n es el orden de la reacción.

5.4 Balance de materiales

De acuerdo con la Figura 5. 1 se realiza el balance general de materiales del proceso de conversión de aceite usado en combustible, para una producción de 17 kg de diesel #2 por día en un proceso discontinuo.

En la Tabla 5. 5 se muestran los flujos resultantes del balance de materiales descrito, de acuerdo al diagrama de flujo del proceso.

Tabla 5. 5: Descripción de los flujos dentro del balance de materiales

Flujos	Descripción	Cantidad (kg/día)
1	Aceite usado	22.43
2	Aceite usado e hidrocarburos pesados	24.27
3	Hidrocarburos Craqueados	21.12
4	Hidrocarburos livianos	6.53
5	Hidrocarburos livianos a reflujo	5.93
6	Hidrocarburos livianos a almacenamiento	0.6
7	Diesel #2 sin filtrar	18.68
8	Diesel #2 filtrado	17
9	Hidrocarburos pesados a recirculación	1.84
10	Desechos del proceso de filtración	1.68

5.5 Balance térmico

Para realizar el balance térmico se necesitan las ecuaciones presentadas por Farrauto y Bartholomew [40] y Speight [41].

Tabla 5. 6: Ecuaciones necesarias para realizar el balance térmico

Ecuación de velocidad	$-r_A = \frac{1}{60000}(0.0077C_A)$	Ec.5.6
Balance de Energía (Batch)	$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \sum r_A (-\Delta H_R) + \frac{Q}{V}$	Ec.5.7
Capacidad Calorífica	$C_p = \frac{[0.758 + 0.00339(T + 273)]}{\rho^{0.5}}$	Ec.5.8
Entalpía	$H = 4186.8 \left[\frac{1}{\rho(0.388 + 0.000225T^2 - 12.65)} \right]$	Ec.5.9

Donde r_A es la velocidad de reacción de craqueo térmico ($\text{gmol/cm}^3 \text{ s}$), C_A es la concentración del aceite usado (gmol/L), ρ es la densidad (g/cm^3), C_p es la capacidad calorífica ($\text{J/g}^\circ\text{C}$), T es la temperatura ($^\circ\text{C}$), ΔH_R es la entalpía de la reacción de craqueo térmico (J/gmol), V es el volumen de la carga (cm^3) y Q es el calor que debe ser añadido para llevar a cabo la reacción (J/s).

Para poder realizar el balance de energía se asume a la ecuación 3.16 como la reacción que se da en el reactor de craqueo térmico:



En la Tabla 5. 7 se presentan los datos de densidad a temperatura ambiente para cada uno de estos productos y reactivos presentes en la ecuación 3.16.

Tabla 5. 7: Densidad para reactivos y productos

Productos y Reactivos	densidad (g/cm^3)
$C_{30}H_{62}$	0.885
$C_{13}H_{28}$	0.850
$C_{12}H_{24}$	0.845

C ₅ H ₁₀	0.612
--------------------------------	-------

En la Tabla 5. 8 se presentan los diferentes datos de entalpía (J/gmol) y capacidad calorífica (J/g °C) a las temperaturas inicial (25°C) y final (355°C).

Tabla 5. 8: Entalpía y capacidad calorífica a 25 °C y 355 °C

Productos y Reactivos	Entalpía (25°C)	Entalpía (355°C)	Capacidad C. (25°C)	Capacidad C. (355°C)
C ₃₀ H ₆₂	-390.290	293.958	1.880	3.069
C ₁₃ H ₂₈	-406.360	306.062	1.918	3.131
C ₁₂ H ₂₄	-408.765	307.873	1.924	3.141
C ₅ H ₁₀	-564.389	425.086	2.260	3.690

Con estos datos se obtiene la entalpía de reacción:

$$\Delta H_R = -(H_{R(25^\circ C)} + H_{R(355^\circ C)} + H_{P(355^\circ C)}) \quad \text{Ec. 5.10}$$

Donde ΔH_R es la entalpía de la reacción de craqueo térmico (J/gmol), H_R es la entalpía de los reactivos (J/gmol) y H_P es la entalpía de los productos (J/gmol).

La entalpía de reacción es $\Delta H_R = 86.37$ J/gmol, esto significa que se trata de una reacción endotérmica.

5.5.1 *Requerimiento de adición de energía calórica en el reactor de craqueo térmico*

Se procede a calcular los requerimientos de energía calórica para el reactor de craqueo térmico, con el fin de establecer el tipo de manta de calentamiento necesario para que se produzca la reacción. Para esto se utilizan las ecuaciones de la Tabla 5. 6 y los datos de las tablas 5. 7 y 5. 8.

De la ecuación 5. 7 se obtiene el valor del calor necesario para que la reacción de craqueo térmico pueda llevarse a cabo. En la Tabla 5. 9 se presentan los valores de los términos de la ecuación 5. 7

Tabla 5. 9: Valores de los términos de la ecuación 5. 7

C_p (J/g °C)	r_A (gmol/cm ³ s)	$-\Delta H_R$ (J/gmol)	V (cm ³)	T (°C)	t (s)
$\frac{[0.758 + 0.00339(T + 273)]}{0.885^{0.5}}$	2.153×10^{-6}	-86.37	19209	T ₁ = 25 T ₂ = 355	t ₁ = 0 t ₂ = 19200

Desarrollando la ecuación 5.7, se obtiene la siguiente expresión:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{Q}{V} + r_A (-\Delta H_R) \right] dt = \rho \int_{T_1}^{T_2} (C_p) dT \quad \text{Ec.5.11}$$

De donde se obtiene que $Q = 726.53$ (J/s), es decir que se necesitan 0.726 kW para calentar el reactor y que se pueda llevar a cabo la reacción de craqueo térmico.

5.5.2 *Requerimiento de remoción de energía calórica en la columna de destilación*

Para calcular los requerimientos de remoción de energía calórica en la columna de destilación se debe considerar los tres diferentes productos que se obtienen de la columna de destilación: hidrocarburos livianos, medios y pesados. En la Tabla 5. 10 se presentan las suposiciones que se hacen para cada caso en cuanto a temperaturas antes y después del proceso de enfriamiento.

Tabla 5. 10: Suposiciones para los productos de la destilación

	Productos		
	Livianos	Medios	Pesados
Fórmula química	C ₅ H ₁₀	C ₁₂ H ₂₄	C ₃₀ H ₆₂
Temperatura inicial (°C)	160	355	355
Temperatura final (°C)	40	40	40

Capacidad Calorífica (J/g °C)	$C_p = \frac{[0.758 + 0.00339(T + 273)]}{\rho^{0.5}}$ Ec. 5.8		
Densidad (g/cm ³)	0.612	0.845	0.885
Peso (g)	600	18680	1840
tiempo (s)	60	240	60

Dado que en el proceso de destilación no se lleva a cabo ninguna reacción química, el balance de energía se convierte en:

$$\int_{t_1}^{t_2} Q dt = m \int_{T_1}^{T_2} (C_p) dT \quad \text{Ec. 5.12}$$

En la Tabla 5. 11 se presentan los datos del calor que necesita ser removido para cada compuesto:

Tabla 5. 11: Calores a ser removidos para enfriar los productos de la destilación

Hidrocarburos	Calor a ser removido (J/s)
Livianos	3102.3
Medios	62761
Pesados	24163

De acuerdo con la Tabla 5. 11 se concluye que en total para enfriar los productos de la destilación se necesitan 90.02 kW.

5.6 Dimensionamiento de equipos

A continuación se presentan los resultados del dimensionamiento de los principales equipos para la planta que funciona con una producción diaria de 17 kg de diesel #2.

Todos los equipos van a estar hechos en acero inoxidable 2205, que tiene resistencia mecánica y también resistencia a la corrosión.

5.6.1 Tanque de decantado y recepción de materia prima

A continuación se presentan los datos asumidos para el diseño del tanque de recepción y decantado del aceite usado:

Tabla 5. 12: Datos para el diseño del tanque de almacenamiento y decantado

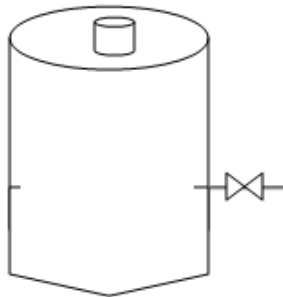
Carga diaria (kg)	Densidad (kg/m ³)	Tiempo de residencia (días)
19.28	855	15

Con estos datos y aplicando un sobredimensionamiento de 20%, se obtiene el volumen del tanque y sus dimensiones:

Tabla 5. 13: Resultados del tanque de almacenamiento y decantado

Volumen (m ³)	Forma	Diámetro (m)	Altura (m)
0.4	cilíndrica	0.63	1.27

La Figura 5. 4 es un esquema de la forma del tanque de almacenamiento y decantado del aceite usado, la válvula de salida del líquido se encuentra casi en la mitad con el fin de que los sedimentos se asienten y no formen parte del proceso, por la parte de arriba se introduce el aceite usado cada 15 días.

**Figura 5. 4:** Tanque de almacenamiento y decantado

5.6.2 Reactor de craqueo térmico

Para diseñar el reactor de craqueo térmico se necesita utilizar las ecuaciones presentadas en la Tabla 5. 14:

Tabla 5. 14: Ecuaciones utilizadas en el diseño del reactor de craqueo térmico

Velocidad de reacción	Ecuación de diseño (BATCH)
$-r_A = (0.0077C_A)$ Ec.5.6	$t = n_{A0} \int_0^{X_A} \frac{1}{(-r_A)V} dX_A$ Ec.5.14
$-r_A = 0.0077C_{A0}(1 - X_A)$ Ec.5.13	

Donde r_A es la velocidad de reacción de craqueo térmico (gmol/L min), C_A es la concentración del aceite usado (gmol/L), C_{A0} es la concentración inicial del aceite usado (gmol/L), X_A es la conversión de la reacción de craqueo térmico (-), t es el tiempo de reacción (min), n_{A0} es la carga al reactor (gmol) y V es el volumen del reactor (L).

Aparte de las ecuaciones presentadas, se necesitan los siguientes datos:

Tabla 5. 15: Datos para el diseño del reactor de craqueo térmico

t (min)	n_{A0} (gmol)	X_A (-)	C_{A0} (gmol/L)
320	4550.83	0.92	209.716

A partir de las ecuaciones en la Tabla 5. 14 y los datos de la Tabla 5. 15 se presenta la Tabla 5. 16 con el volumen del reactor y sus dimensiones, aplicando un sobredimensionamiento del 20%:

Tabla 5. 16: Resultados del diseño del reactor de craqueo térmico

Volumen (m ³)	Forma	Diámetro (m)
0.0267	esférico	0.37

Se ha propuesto un reactor a manera de balón, ya que facilita el calentamiento en una manta eléctrica; además consta de un agitador para evitar que le coque se adhiera al fondo del reactor

La Figura 5. 5 es un esquema de la forma del reactor de craqueo térmico:

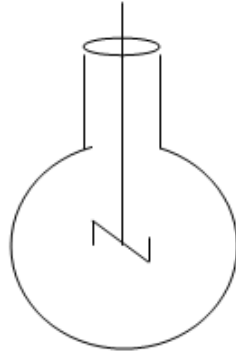


Figura 5. 5: Reactor de craqueo térmico

5.6.3 Columna de destilación

Los cálculos requeridos para el dimensionamiento de la columna de destilación se hacen siguiendo los pasos descritos a continuación:

5.6.3.1 Suposiciones

- La presión de operación es atmosférica
- Se definen tres seudocompuestos a ser destilados:
 1. Hidrocarburos livianos
 2. Hidrocarburos medios
 3. Hidrocarburos pesados
- Para determinar el número de platos en la columna de destilación se utiliza la Tabla 5.17, establecida por Nelson [42]:

Tabla 5. 17: Número de platos empleados en los equipos industriales

Operación	Materiales separados	Platos entre las fracciones	
		Bibliografía	Recomendados
A presión	Gasolina ligera y naftas	3-8	4-5
	Nafta y queroseno	3-6	3-5

atmosférica	gasolina y queroseno	6-8	5-6
	Queroseno y gas oil	4-7	4-5

- Para determinar la longitud de la columna se utiliza la siguiente ecuación, establecida por Luyben [43], en la que se asume un sobredimensionamiento del 20% :

$$L_c = 1.2 \times (0.6 \times (NP - 2)) \quad \text{Ec.5.15}$$

Donde L_c es la longitud de la columna (m) y NP es el número de platos.

- Para determinar el diámetro de la columna cilíndrica se emplea las siguientes ecuaciones, asumiendo un sobredimensionamiento del 20%.

$$V_c = \frac{\pi D_c^2}{4} \times h \quad \text{Ec.5.16}$$

$$h = 2D_c \quad \text{Ec.5.17}$$

Donde V_c es el volumen de la columna (m^3), D_c es el diámetro de la columna (m) y h es la altura de la columna (m).

5.6.3.2 Flujos y su composición

A continuación, en la Tabla 5. 18 se presenta la composición de los hidrocarburos a la salida de la columna de destilación. En base a los datos experimentales expuestos en la Tabla 5. 5., se procederá a nombrar a los flujos que están relacionados con la columna de destilación como: la alimentación (3), destilado (6+7) y el residuo (9).

Tabla 5. 18: Composición de los flujos de la destilación

FLUJOS Y FRACCIONES MOLARES		
Alimentación	Destilado	Residuo
(3)	(6) + (7)	(9)

Productos	<i>Flujo (gmol)</i>	<i>Fracción (-)</i>	<i>Flujo (gmol)</i>	<i>Fracción (-)</i>	<i>Flujo (gmol)</i>	<i>Fracción (-)</i>
livianos	93,29	0,45	8,57	0,07	0	0
medios	111,19	0,53	111,19	0,93	0	0
pesados	4,36	0,02	0	0	4,36	1
TOTAL	208,84	1	119,76	1	4,36	1

5.6.3.3 *Número total de platos y plato de alimentación*

Para determinar el número de platos, se utiliza la Tabla 5. 17 que es una recopilación de datos de platos para columnas atmosféricas, especificando los productos a ser separados. El número de platos a ser utilizados será 3 y el plato de alimentación será el segundo.

5.6.3.4 *Reflujo*

La relación de reflujo es la relación entre el líquido que vuelve a la columna de destilación y el líquido que forma parte del destilado. Kister [44] recomienda valores de reflujo entre 5:1 y 20:1 para columnas de destilación a escala de laboratorio. Para el diseño de esta columna de destilación se asume un reflujo de 10:1, lo que significa que por cada 10 moles de hidrocarburos livianos que vuelven a la columna de destilación, 1 mol forma parte del destilado.

5.6.3.5 *Calor para el calderín*

En el caso de esta planta piloto, el reactor de craqueo térmico funciona como calderín, es por esto que el calor que necesita el reactor térmico, es el calor necesario para calentar el calderín. El valor fue obtenido en el punto 5.5.1 y es de 726.53 (J/s), es decir que se necesitan 0.726 kW para calentar el reactor térmico que a su vez funciona como calderín en el sistema de destilación.

5.6.3.6 *Calor removido en el condensador*

El calor removido en el condensador es el mismo obtenido en el punto 5.5.2, que es el calor removido de los hidrocarburos livianos para enfriarlos. Este valor es de 3102.3 (J/s), es decir que se necesita remover 0.310 kW de los hidrocarburos livianos, a la salida de la columna de destilación para poder enfriarlos a una temperatura de 40°C.

5.6.3.7 *Altura de la columna*

Para obtener la altura de la columna se utiliza el dato del número de platos expuesto en el punto 5.6.3.3 que es de 3 platos. Se utiliza la ecuación 5.15 establecida por Luyben [43] y se determina que la altura es de 0.72 m.

5.6.3.8 *Diámetro de la columna*

El diámetro de la columna se obtiene con los datos de la altura y la alimentación a la columna, expuestos en la Tabla 5. 19 y utilizando la ecuación 5.16.

Tabla 5. 19: Datos para obtener el diámetro de la columna

Alimentación (kg)	Densidad (kg/m³)	Volumen (m³)	Altura (m)
21.12	850	0.024	0.72

El diámetro de la columna es 0.2 m

Un esquema de la columna de destilación se presenta en la Figura 5. 6, la cual consta de tres platos y un condensador.

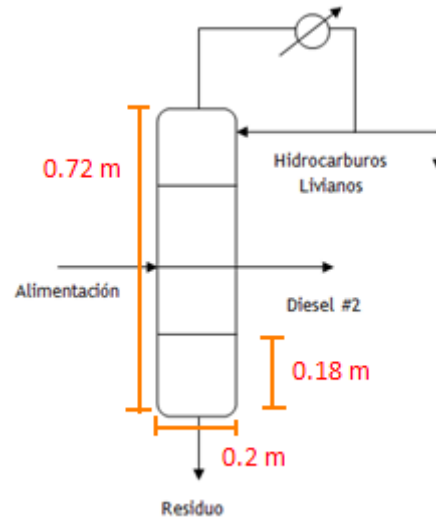


Figura 5. 6: Esquema de la columna de destilación

5.6.4 Filtro de sílica gel

Para el diseño de la columna de filtración se emplean los datos obtenidos experimentalmente:

Tabla 5. 20: Datos experimentales de la filtración

Velocidad (L/min)	Carga (L)	R = V_f / V_L (L/L)
0.02112	22.37	1.88

Además de los datos, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$t_f = \frac{V_L}{v_f} \quad \text{Ec.5.17}$$

$$V_f = R \times V_L \quad \text{Ec.5.18}$$

Donde t_f es el tiempo de filtración (min), V_L es el volumen de la carga (L), v_f es la velocidad de filtración (L/min), V_f es el volumen del filtro (L) y R es la relación entre el volumen del filtro y el volumen del líquido a ser filtrado (-).

En la Tabla 5. 21 se presentan el volumen y las dimensiones del filtro, con un sobredimensionamiento de 20%:

Tabla 5. 21: Tiempo de filtración, volumen y dimensiones del filtro de sílica gel

Tiempo de filtración (h)	Volumen del filtro (L)	Altura (m)	Diámetro (m)
40	50.5	0.67	0.31
20	25.25	0.34	0.16

Dado que el proceso de filtración se demora 40 horas, se utilizarán dos filtros de la mitad del volumen del expuesto en la Tabla 5. 21, es decir que se emplearán dos filtros de 25.25 L cada uno, con el fin de que el proceso se demore solamente 20 horas.

Aparte de los filtros, se necesitan recipientes cilíndricos, colectores de la carga filtrada, los cuales dependen directamente de la carga, en la Tabla 5. 22 se exponen el volumen y las dimensiones:

Tabla 5. 22: Volúmenes de los recipientes recolectores

Volumen de los recipientes (L)	Altura (m)	Diámetro (m)
11.2	0.39	0.2

La Figura 5. 7 es un esquema de los filtros de sílica gel:

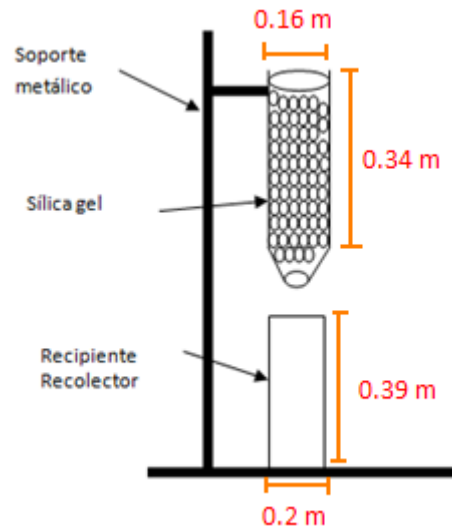


Figura 5. 7: Esquema del equipo de filtración

5.6.5 Tanques de almacenamiento para los productos medio y final

Se necesitan 2 tanques de almacenamiento, uno a la salida de la columna para el producto medio y el otro para el producto final filtrado. A continuación se presentan los datos asumidos para el diseño de los tanques de almacenamiento de producto medio y producto final:

Tabla 5. 23: Datos para el diseño de los tanques de almacenamiento

Carga diaria (kg)	Densidad (kg/m ³)	Tiempo de residencia (días)
17	835	7

Con estos datos y aplicando un sobredimensionamiento de 20%, se obtiene el volumen de los tanques y sus dimensiones:

Tabla 5. 24: Resultados del tanque de almacenamiento

Volumen (m ³)	Forma	Diámetro (m)	Altura (m)
0.17	cilíndrica	0.48	0.95

La Figura 5. 8 es un esquema de la forma de los tanques de almacenamiento para producto medio y producto final. Los tanques tienen una válvula de salida del líquido y una tapa para proteger el contenido.

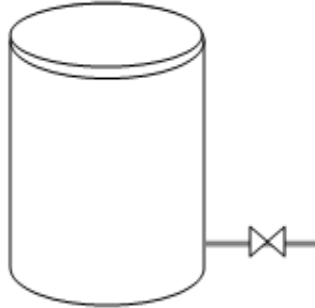


Figura 5. 8: Esquema de los tanques de almacenamiento

5.6.6 *Tanque de almacenamiento para hidrocarburos livianos*

A continuación se presentan los datos asumidos para el diseño del tanque de almacenamiento de hidrocarburos livianos:

Tabla 5. 25: Datos para el diseño del tanque de almacenamiento de livianos

Carga diaria (kg)	Densidad (kg/m ³)	Tiempo de residencia (días)
0.6	612	7

Con estos datos y aplicando un sobredimensionamiento de 20%, se obtiene el volumen del tanque y sus dimensiones, presentados en la Tabla 5. 26:

Tabla 5. 26: Resultados del tanque de almacenamiento y decantado

Volumen (m ³)	Forma	Diámetro (m)	Altura (m)
0.0069	cilíndrica	0.16	0.33

5.6.7 *Intercambiadores de calor*

De acuerdo con Incropera y Dewitt [45], las ecuaciones que se necesitan para establecer el área de un intercambiador de calor y la cantidad de agua utilizada para enfriamiento, son las expuestas en la Tabla 5. 27.

Tabla 5. 27: Ecuaciones para el diseño de los intercambiadores de calor

$M_f = \frac{q}{C_{p_{H2O}} \Delta T_3}$	Ec.5.19
$q = U_g A_e \Delta T_{ml}$	Ec.5.20
$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$	Ec.5.21
$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i}$	Ec.5.22
$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o}$	Ec.5.23
$\Delta T_3 = T_{h,o} - T_{c,i}$	Ec.5.24

Donde M_f es cantidad de agua de enfriamiento (g), q es el calor transferido (W), $C_{p_{H2O}}$ es la capacidad calorífica del agua ($J/g^\circ C$), ΔT_3 es el cambio de temperatura del agua ($^\circ C$), U_g es el coeficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 \text{ }^\circ C$), A_e es el área del intercambiador de calor (m^2), ΔT_{ml} es la diferencia de temperaturas media logarítmica, ΔT_1 es la diferencia de temperaturas de los líquidos caliente y frío a condiciones iniciales, ΔT_2 es la diferencia de temperaturas de los líquidos caliente y frío a condiciones finales, $T_{h,i}$ es la temperatura del líquido caliente al inicio, en este caso los hidrocarburos livianos, medios pesados; $T_{c,i}$ es la temperatura del líquido frío al inicio, en este caso el agua de enfriamiento; $T_{h,o}$ es la temperatura del líquido caliente al final y $T_{c,o}$ es la temperatura del líquido frío al final.

Además de las ecuaciones, se necesitan los datos de las temperaturas para cada uno de los intercambiadores, los cuales están tabulados en la Tabla 5. 28:

Tabla 5. 28: Datos de calor y temperaturas para cada intercambiador

#	Calor removido (W)	Temperaturas ($^\circ C$)							
		$T_{h,i}$	$T_{c,i}$	$T_{h,o}$	$T_{c,o}$	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_{ml}
W ₁	24163	355	25	60	40	330	20	35	110.58
W ₂	62761	355	25	60	40	330	20	35	110.58

W_3	3102.3	160	25	60	40	135	20	35	60.22
-------	--------	-----	----	----	----	-----	----	----	-------

Dado que los fluidos que participan del intercambio de calor son agua y combustibles, de acuerdo con Incropera y Dewitt [45], se utiliza el valor $U = 350 \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C)}$

5.6.7.1 Primer intercambiador

El primer intercambiador es el que permite el enfriamiento de los hidrocarburos pesados que salen de la columna de destilación y son recirculados al reactor de craqueo térmico. Los resultados del diseño de este intercambiador están tabulados en la Tabla 5. 29:

Tabla 5. 29: Resultados del intercambiador 1

Agua de enfriamiento (g/s)	Área del intercambiador (m ²)
165	0.62

5.6.7.2 Segundo intercambiador

El segundo intercambiador es el que permite el enfriamiento de los hidrocarburos medios que salen de la columna de destilación para dirigirse al sistema de filtración. Los resultados del diseño de este intercambiador están tabulados en la Tabla 5. 30:

Tabla 5. 30: Resultados del intercambiador 2

Agua de enfriamiento (g/s)	Área del intercambiador (m ²)
428.58	1.62

5.6.7.3 Tercer intercambiador

El tercer intercambiador es el que permite el enfriamiento de los hidrocarburos livianos que salen de la columna de destilación y deben ser almacenados. Los resultados del diseño de este intercambiador están tabulados en la Tabla 5. 31:

Tabla 5. 31: Resultados del intercambiador 3

Agua de enfriamiento (g/s)	Área del intercambiador (m ²)
21.18	0.15

5.7 Dimensionamiento y selección de bombas

Dentro de la planta piloto de producción de diesel #2 a partir de aceite lubricante usado, se necesitan un total de cuatro bombas. La primera bomba (P₁) permite mover el aceite usado desde el tanque de almacenamiento hacia el reactor de craqueo térmico; la segunda bomba (P₂) permite mover los hidrocarburos craqueados hacia la columna de destilación para que sean separados; la tercera bomba (P₃) permite mover el diesel #2 sin filtrar hacia el sistema de filtración y finalmente la cuarta bomba (P₄) permite mover el diesel #2 filtrado hacia el tanque de almacenamiento.

Dado que se trata de un proceso intermitente, se asume el caudal mínimo para cada tramo que es de $6.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 gal/min), se asume una tubería galvanizada y se utilizan las tablas y gráficos del capítulo de Anexos, tomados del Catálogo de LADISH [50]. En las figuras 9. 1 y 9. 2, de los Anexos A y B se encuentran los gráficos para determinar los factores de corrección para caudales y alturas para cada tramo. En el Anexo C, en la Tabla 9. 1 se muestran las pérdidas en cuanto a accesorios de tubería. En el Anexo D, en la Tabla 9. 2 se muestran las pérdidas por fricción en la tubería y finalmente en el Anexo E, en la Figura 9. 3 se encuentra el gráfico para seleccionar el tamaño de la bomba y su potencia.

Las tablas y gráficos están diseñadas para agua, sin embargo se realizan correcciones de caudal y altura mediante las siguientes ecuaciones:

$$Z_c = \frac{Z \times \rho}{f_1} \text{ Ec.5.25}$$

$$hc = \frac{h}{f_2} \text{ Ec.5.26}$$

Donde Z_c es el caudal corregido (m^3/s), Z es el caudal original (m^3/s), ρ es la densidad del líquido que se transporta, f_1 es el factor de corrección de caudal, hc es la altura corregida (m), h es la altura original (m) y f_2 es el factor de corrección de la altura.

5.7.1 Bomba (P_1)

El tramo en el que actúa la primera bomba es el mostrado en la Figura 5. 9.

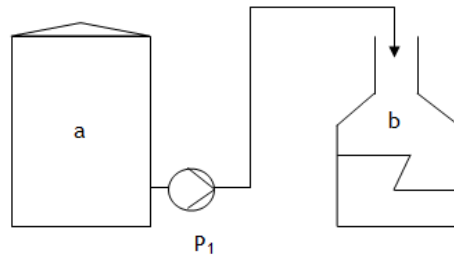


Figura 5. 9: Tramo para la primera bomba

En la Tabla 5. 32 se detallan los datos necesarios para seleccionar la bomba:

Tabla 5. 32: Datos para seleccionar la primera bomba

Caudal (m^3/s)	6.3×10^{-5}
Caudal corregido (m^3/s)	6×10^{-5}
Diámetro de la tubería (cm)	1.27
Pérdidas por fricción (m/m)	1.65
Longitud de la tubería (m)	3

Longitud por pérdidas (m)	0.05
Accesorios	3 codos de 90°
Longitud por pérdidas por accesorios (m)	1.2
Longitud por pérdidas totales (m)	1.25
Altura (m)	0.5
Altura corregida (m)	0.51
Altura total incluidas pérdidas (m)	1.75

Utilizando las tablas del capítulo de Anexos y de acuerdo a los datos de caudal corregido y altura total incluidas pérdidas, se escoge la bomba centrífuga con las siguientes características, mostrada en la Tabla 5. 33:

Tabla 5. 33: Características de la primera bomba

Velocidad (rpm)	Inlet (in)	Outlet (in)	Impeler (in)	Potencia (HP)
1750	2	1.5	3.5	0.5

5.7.2 Bomba (P_2)

El tramo en el que actúa la segunda bomba es el mostrado en la Figura 5. 10.

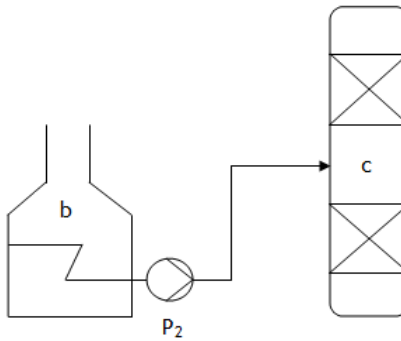


Figura 5. 10: Tramo para la segunda bomba

En la Tabla 5. 34 se detallan los datos necesarios para seleccionar la bomba:

Tabla 5. 34: Datos para seleccionar la segunda bomba

Caudal (m ³ /s)	6.3 x 10 ⁻⁵
Caudal corregido (m ³ /s)	6 x 10 ⁻⁵
Diámetro de la tubería (cm)	1.27
Pérdidas por fricción (m/m)	1.65
Longitud de la tubería (m)	2
Longitud por pérdidas (m)	0.03
Accesorios	2 codos de 90°
Longitud por pérdidas por accesorios (m)	0.8
Longitud por pérdidas totales (m)	0.83
Altura (m)	0.5
Altura corregida (m)	0.51
Altura total incluidas pérdidas (m)	1.33

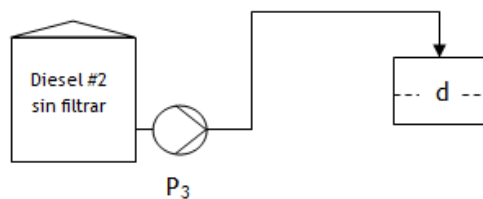
Utilizando las tablas del capítulo de Anexos y de acuerdo a los datos de caudal corregido y altura total incluidas pérdidas, se escoge la bomba centrífuga con las siguientes características, mostrada en la Tabla 5. 35:

Tabla 5. 35: Características de la primera bomba

Velocidad (rpm)	Inlet (in)	Outlet (in)	Impeler (in)	Potencia (HP)
1750	2	1.5	3.25	0.25

5.7.3 Bomba (P₃)

El tramo en el que actúa la segunda bomba es el mostrado en la Figura 5. 11.

**Figura 5. 11:** Tramo para la tercera bomba

En la Tabla 5. 36 se detallan los datos necesarios para seleccionar la bomba:

Tabla 5. 36: Datos para seleccionar la primera bomba

Caudal (m ³ /s)	6.3 x 10 ⁻⁵
Caudal corregido (m ³ /s)	6 x 10 ⁻⁵
Diámetro de la tubería (cm)	1.27
Pérdidas por fricción (m/m)	1.65
Longitud de la tubería (m)	2
Longitud por pérdidas (m)	0.03
Accesorios	3 codos de 90°
Longitud por pérdidas por accesorios (m)	1.2
Longitud por pérdidas totales (m)	1.23
Altura (m)	0.7
Altura corregida (m)	0.71
Altura total incluidas pérdidas (m)	1.93

Utilizando las tablas del capítulo de Anexos y de acuerdo a los datos de caudal corregido y altura total incluidas pérdidas, se escoge la bomba centrífuga con las siguientes características, mostrada en la Tabla 5. 37:

Tabla 5. 37: Características de la primera bomba

Velocidad (rpm)	Inlet (in)	Outlet (in)	Impeler (in)	Potencia (HP)
1750	2	1.5	3.75	0.5

5.7.4 Bomba (P₄)

El tramo en el que actúa la segunda bomba es el mostrado en la Figura 5. 12.

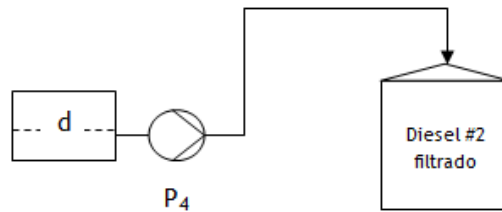


Figura 5. 12: Tramo para la cuarta bomba

En la Tabla 5. 38 se detallan los datos necesarios para seleccionar la bomba:

Tabla 5. 38: Datos para seleccionar la primera bomba

Caudal (m ³ /s)	6.3 x 10 ⁻⁵
Caudal corregido (m ³ /s)	6 x 10 ⁻⁵
Diámetro de la tubería (cm)	1.27
Pérdidas por fricción (m/m)	1.65
Longitud de la tubería (m)	2
Longitud por pérdidas (m)	0.03
Accesorios	3 codos de 90°
Longitud por pérdidas por accesorios (m)	1.2

Longitud por pérdidas totales (m)	1.23
Altura (m)	0.7
Altura corregida (m)	0.71
Altura total incluidas pérdidas (m)	1.93

Utilizando las tablas del capítulo de Anexos y de acuerdo a los datos de caudal corregido y altura total incluidas pérdidas, se escoge la bomba centrífuga con las siguientes características, mostrada en la Tabla 5. 33:

Tabla 5. 39: Características de la primera bomba

Velocidad (rpm)	Inlet (in)	Outlet (in)	Impeler (in)	Potencia (HP)
1750	2	1.5	3.75	0.5

6 Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio del proceso de conversión de aceite lubricante usado de automóviles con motor a gasolina en diesel #2. Para esto se adaptaron de la patente de Wansbrough [4] los procesos de craqueo térmico y destilación. Se diseñó una planta piloto; para esto se tomaron en cuenta cuatro fases: caracterización de aceite lubricante usado, puesta en marcha de experimentos para la producción de combustible, caracterización del producto principal y el diseño de una planta piloto de obtención de combustible a partir de aceite lubricante usado. Este trabajo fue llevado a cabo con cinco muestras de aceite lubricante usado de cinco diferentes lubricadoras en el valle de los Chillos y la ciudad de Quito.

Después de realizar la caracterización del aceite usado se concluye que todas las muestras tienen un contenido promedio de azufre de 0.38% en peso; un contenido de agua de 0.37% en peso. En cuanto al contenido de metales el que predomina es el Zinc con valores alrededor de 1018.28 mg/L, seguido por el Hierro con 48.79 mg/L. El resto de metales analizados, que son plomo, manganeso y cromo, varían en concentraciones de 5 a 11 mg/L. El índice de viscosidad fue de 122 y el TBN promedio fue de 18.6 mg de KOH/g, ambos dentro de los rangos sugeridos por sus respectivas normas ASTM. De acuerdo a la prueba de corrosión se determinó que el aceite tiene una baja concentración de constituyentes ácidos. El punto de inflamación fue de 90.8 °C y la temperatura del 90% de la destilación fue de 400°C. Finalmente los grados API fueron en promedio de 28.22.

La fase de puesta en marcha se divide en cuatro partes de información experimental para: craqueo térmico, destilación, rectificación y filtración. Para el craqueo térmico se desarrollaron 25 experimentos con una duración en promedio de 5 horas cada uno. La temperatura se mantuvo manualmente en 355°C con el fin de generar pocos hidrocarburos livianos y reducir la generación de coque. En cuanto a la destilación, se desarrollaron, igual

que para el craqueo, 25 experimentos, ya que son procesos conjuntos. Se obtuvo 7.9% de hidrocarburos livianos, 8.1 % de hidrocarburos pesados y 84% de hidrocarburos medios. La rectificación se tomó el 84%, que corresponde a hidrocarburos medios, y se lo sometió a una separación. Se obtuvo 2.4% de hidrocarburos livianos y el resto de hidrocarburos medios, que son los hidrocarburos que forman el diesel #2. Finalmente, en la filtración se pudieron eliminar algunas olefinas reactivas, agua y compuestos sulfurados. El producto adquirió un color más claro y además su olor mejoró notablemente.

En la tercera fase se procedió a caracterizar el producto final realizando las mismas pruebas que al diesel #2. Se obtuvieron resultados favorables ya que el producto cumplió con todos los requisitos impuestos por el INEN. Datos como la viscosidad, agua y sedimentos, y el porcentaje de cenizas se encontraron dentro del rango especificado por la norma para el diesel #2. En cuanto al porcentaje de azufre el producto obtenido tuvo menos que el diesel comercial. En cuanto al punto de ebullición, el del diesel #2 comercial fue mayor que el del producto obtenido. El índice de cetano calculado y el residuo de carbono del producto obtenido fueron mayores que el de diesel #2 comercial, pero de todas formas cumplían con las normas ASTM e INEN. En cuanto a corrosión el diesel comercial era menos corrosivo que el producto y en lo que respecta a la temperatura del 90% de destilación, la del producto fue mayor que la de diesel #2 comercial.

Finalmente, en la cuarta fase de este trabajo se realizó el diseño de una planta piloto que produzca 19 L diarios de producto similar al diesel #2 a partir de 28.88 L de aceite usado, diseñando un total de 10 equipos. En total son cuatro tanques de almacenamiento: tanque de almacenamiento y decantado para el aceite usado, un tanque de almacenamiento para el diesel #2 antes de ser filtrado, un tanque de almacenamiento para el diesel #2 después de ser filtrado y un tanque de almacenamiento para los hidrocarburos livianos que salen del tope de la columna de destilación. Existen 3 intercambiadores de calor: el primero permite enfriar los hidrocarburos pesados recirculados al reactor térmico, el segundo permite enfriar los hidrocarburos medios que se dirigen al sistema de filtración y el tercero enfría los hidrocarburos livianos. Finalmente, el resto de equipos son el reactor de craqueo térmico, en el que se separan las cadenas de carbonos del aceite usado; la columna de destilación, donde se separan los hidrocarburos livianos, medios y pesados y el sistema de

filtración en el que se filtran los hidrocarburos medios que salen de la columna de destilación.

7 Recomendaciones

Se ofrecen recomendaciones en cuanto al material del reactor, material filtrante y aditivos para el producto final. El material del reactor de craqueo térmico debe ser acero inoxidable y no vidrio como en los experimentos, ya que el coque generado al final de la reacción se pega en las paredes y desgasta el vidrio hasta que finalmente se fractura; en cambio el acero inoxidable es un material resistente, que puede ser sometido a altas temperaturas y resiste por más tiempo. Se ha propuesto como material filtrante a la sílica gel para uso en laboratorios químicos, ya que ha dado muy buenos resultados. Sin embargo, su precio en el mercado es elevado. Por esto se recomienda utilizar la sílica gel comercial con mayor tamaño de partícula, que es usada para absorber la humedad de ropa y zapatos, ya que resultaría más barato.

8 Referencias Bibliográficas

[1] FIGEMPA. “Desarrollo del análisis de situación, estudio de factibilidad para el manejo ambientalmente adecuado de los desechos aceitosos en el Ecuador.” (2005). 12 de enero de 2009.

< http://www.basel.int/centers/proj_activ/tctf_projects/021.pdf>

[2] “Loja cuenta con una planta para reciclar el aceite de los vehículos”. Diario El Comercio. 29 Marzo 2008.

<http://www2.elcomercio.com/noticiaEC.asp?id_noticia=180744&id_seccion=10>

[3] Unidad de planeación minero energética. “Transformación de los Aceites usados para utilización como energéticos en procesos de combustión”. (2003). 12 de enero de 2009.

<http://www.ripit.granma.inf.cu/vitec/2003/Mayo_2003/ef_en/articulos/EstudiosEficiencia_AceitesUsados.pdf>

[4] Wansbrough, Robert, Calvin Moore y Willian Carraway. (1999) US Patente No. 5885444. 23 de enero de 2009. <<http://www.freepatentsonline.com/5885444.pdf>>

[5] Guthrie, Virgil. Petroleum Products Handbook. New York: Mc Graw Hill Book Company, 1960.

[6] Blount, Estefanía y otros. Industria como naturaleza: hacia la producción limpia. Madrid: Los libros de la Catarata, 2003

[7] Firas, Awaja y Pavel Dumitri. Design Aspects of used oil re-refining. Boston: Elsevier, 2006.

[8] Whisman, M. L., Reynolds, W., Goetzinger, J. E. and Cotton, F. O. Re-refining makes quality oils, *Hydrocarbon Processing*, 1978 141-145

[9] Snow, R. J. and Delaney, S. F. Vacuum distillation of used lubricating, *Chemeca* 77, 14-16. 1977

- [10] Reis M. A. and Jeronimo, M. S. Used lubricating oil re-refining by extraction-floculation 1-A scientific basis to design efficient solvents, I&EC Res. 29, 432-436, 1990
- [11] Rittner, Don y Ronald A. Bailey. Encyclopedia of Chemistry. New York: Facts on file, 2005
- [12] Permsubscul, Amnat; Tharapong Vitidsant y Somsak Damronglerd. "Catalytic cracking reaction of used lubricating oil to liquid fuels catalyzed by sulfated zirconia". Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand. 2006 <<http://www.energy-based.nrct.go.th/Article/Ts-3%20catalytic%20cracking%20reaction%20of%20used%20lubricating%20oil%20to%20liquid%20fuels%20catalyzed%20by%20sulfated%20zirconia.pdf>>
- [13] Charusiri, W. and Vitidsant, T., "Kinetic study of used vegetable oil to liquid fuels over sulfated zirconia," Energy and Fuels, 19, 1783 .2005
- [14] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure, ASTM D-86. Vol. 5.01, 1998
- [15] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Base Number of Petroleum Products by Potentiometric Perchloric Acid Titration, ASTM D-2896. Vol. 5.01, 1998
- [16] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Practice for Calculating Viscosity Index From Kinematic Viscosity at 40 and 100°C, ASTM D-2270. Vol. 5.01, 1998
- [17] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Flash Point by Tag Closed Tester, ASTM D-56. Vol. 5.01, 1998
- [18] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Methods for Water and Sediments in crude oils by centrifuge, ASTM D-1796. Vol. 5.01, 1998
- [19] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test, ASTM D-130. Vol. 5.01, 1998
- [20] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry, ASTM D-4294. Vol. 5.02, 1998

[21] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method, ASTM D-1298. Vol. 5.01, 1998

[22] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products, ASTM D-341. Vol. 5.01, 1998

[23] Meiz, Vern. Used Oil Characterization Study. Washington State Department of Ecology. 1991.

[24] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos derivados del petróleo, requisitos-diesel. NTE INEN 1489.1999

[25] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Classification of Diesel Fuel oils, ASTM D-975. Vol. 5.01, 1998

[26] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Punto de inflamación en copa cerrada. Método Tag. NTE INEN 1047.1984

[27] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Determinación de agua y sedimento por centrifugación. NTE INEN 1494.1987

[28] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Determinación del residuo de carbón Conradson. NTE INEN 1491.1987

[29] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Determinación de cenizas. NTE INEN 1492.1987

[30] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Ensayos de destilación. NTE INEN 926.1984

[31] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Determinación de la viscosidad cinemática en líquidos. NTE INEN 810.1987

[32] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Determinación de la corrosión sobre la lámina de cobre. NTE INEN 927.1984

[33] Instituto de Normalización Ecuatoriano, INEN. Productos de petróleo. Determinación del índice de cetano calculado. NTE INEN 1495.1987

[34] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products, ASTM D-189. Vol. 5.01, 1998

- [35] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Ash from Petroleum Products, ASTM D-482. Vol. 5.01, 1998
- [36] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids the Calculation of Dynamic Viscosity, ASTM D-445. Vol. 5.01, 1998
- [37] American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants. Standard Test Methods for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels, ASTM D-976. Vol. 5.01, 1998
- [38] Skoog, Douglas; James Holler y Timothy Nieman. Principios de Análisis Instrumental. Madrid: Mc Graw Hill, 2001
- [39] Levenspiel, Octave. Ingeniería de las reacciones químicas. México: Limusa Wiley, 2004.
- [40] Farrauto, J y C. H. Bartholomew. Fundamentals of Industrial Catalytic Processes. United States: Wiley-Interscience, 2006.
- [41] Speight, James. Handbook of Petroleum Analysis. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- [42] Nelson W. L. Refinación de petróleos. Barcelona: Reverté, 1958
- [43] Luyben, William L. Distillation design and control using Aspen simulation. United States: Wiley Interscience, 2006
- [44] Kister, Henry. Distillation design. New York: Mc Graw Hill, 1992
- [45] Incropera, Frank y David Dewitt. Fundamentos de transferencia de calor. México: Pearson Educación, 1999.
- [46] Couper, James et al. Chemical Process Equipment. Burlington: Elsevier, 2005
- [47] Wade, LG. Química Orgánica. Madrid: Pearson Educación S.A., 2004
- [48] McCabe, Warren; Julian Smith y Peter Harriot. Operaciones unitarias en ingeniería química. México: Mc Graw Hill, 2007.
- [49] Perry, Robert and Don Green. Perry's Chemical Engineer's Handbook. New York: Mc Graw Hill, 1999.

[50] Catálogo de LADISH Co. LADISH Co: Tri - Clover Division. Kenosha, Wisconsin
53140. Catalog TF - 74 .30M

9 Anexos

Anexo A

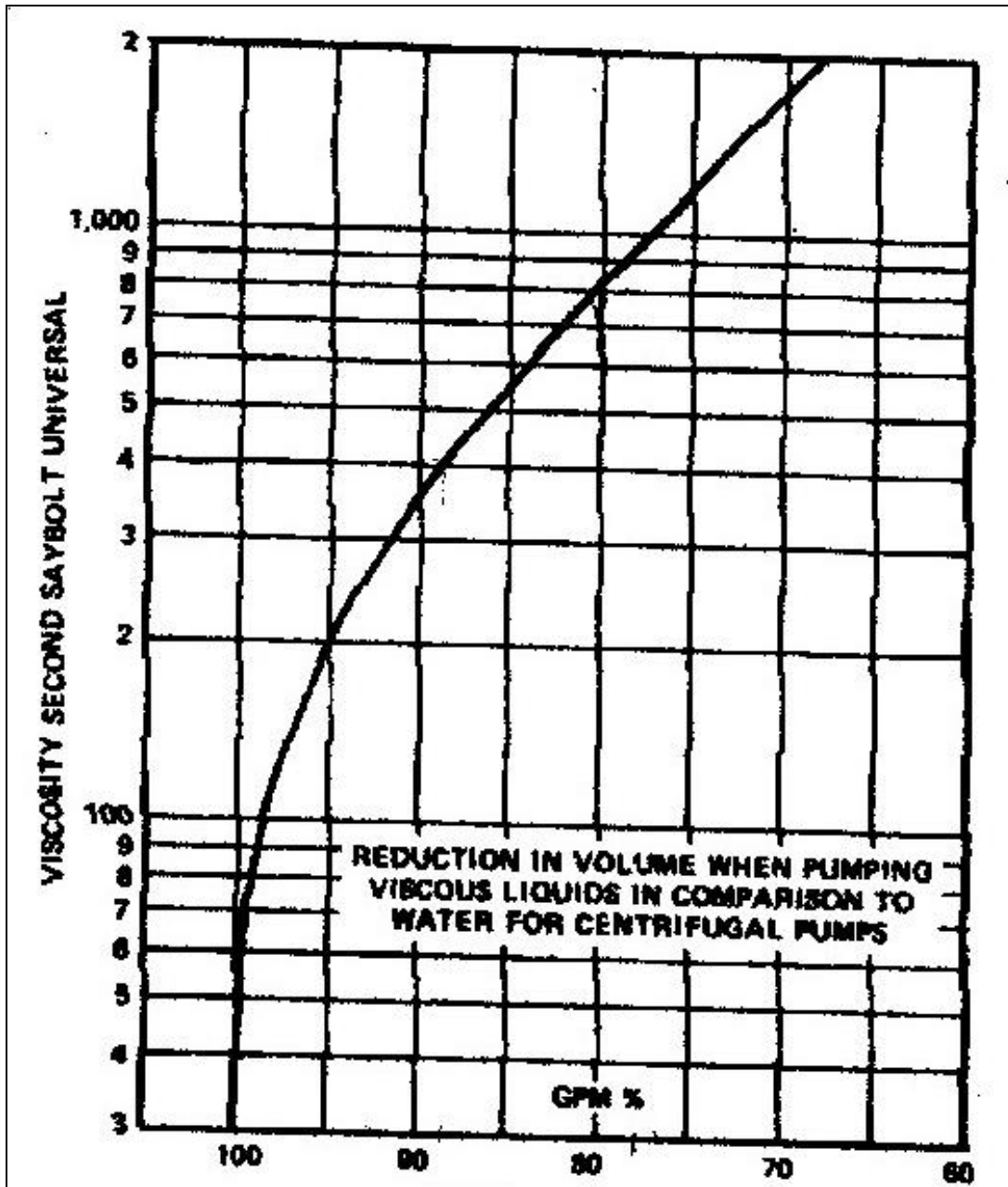


Figura 9. 1: Gráfica para corregir el caudal, para la selección de bombas

Anexo B

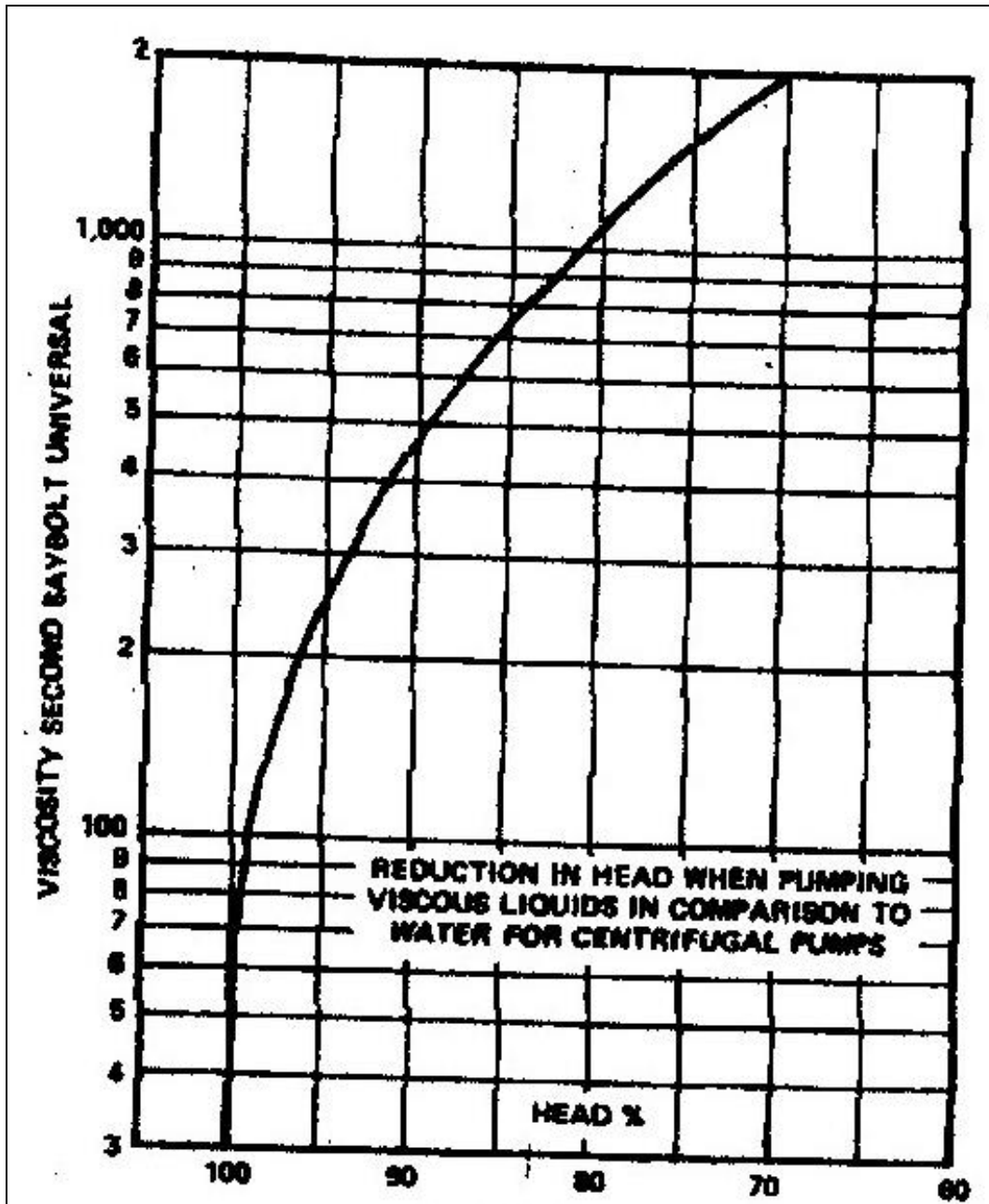


Figura 9. 2: Gráfica para corregir la altura, para la selección de bombas

Anexo C

Tabla 9. 1: Longitudes equivalentes a pérdidas localizadas

P E R D I D A S							
Diametro D	Codo 90°	Codo 90°	Codo 90°	Codo 45°	Curva 90° R/D = 1-1/2	Curva 90° R/D = 1	Curva 45°
mm	Pulgadas	Radio largo	Radio medio	Radio corto			
13	1/2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2
19	3/4	0.4	0.6	0.3	0.3	0.4	0.2
25	1	0.5	0.7	0.4	0.3	0.5	0.2
32	1-1/4	0.7	0.9	0.5	0.4	0.6	0.3
38	1-1/2	0.9	1.1	0.6	0.5	0.7	0.3
50	2	1.1	1.4	0.8	0.6	0.9	0.4
63	2-1/2	1.3	1.7	0.9	0.8	1.0	0.5
75	3	1.6	2.1	1.2	1.0	1.3	0.6
100	4	2.1	2.8	1.5	1.3	1.6	0.7
125	5	2.7	3.7	1.9	1.6	2.1	0.9
150	6	3.4	4.3	2.3	1.9	2.5	1.1
200	8	4.3	5.5	3.0	2.4	3.3	1.5
250	10	5.5	6.7	3.8	3.0	4.1	1.8
300	12	6.1	7.9	4.6	3.6	4.8	2.2
350	14	7.3	9.5	5.3	4.4	5.4	2.5

Anexo D

Tabla 9. 2: Longitudes equivalentes a pérdidas por fricción en la tubería

Galvanizada C = 100

$$V = 0.1244 \frac{Q}{D^2} = m/seg$$

$$J = 0.2083 \left(\frac{100}{C} \right)^{1.85} \frac{Q^{1.85}}{D^{4.766}} = m/100 m$$

Q	0.635 1/2 pulgada		0.869 3/4 pulgada		1.087 1 pulgada		1.431 1 1/4 pulgada		1.668 1 1/2 pulgada		2.106 2 pulgadas	
	V	J	V	J	V	J	V	J	V	J	V	J
	1	0.29	1.65	0.16	0.41	0.11	0.14	0.06	0.04	0.04	0.02	0.03
1.5	0.44	3.49	0.25	0.87	0.16	0.29	0.09	0.08	0.07	0.04	0.04	0.01
2	0.58	5.96	0.33	1.49	0.21	0.50	0.12	0.13	0.09	0.06	0.06	0.02
2.5	0.73	9.00	0.41	2.25	0.26	0.78	0.15	0.20	0.11	0.09	0.07	0.03
3	0.88	12.62	0.49	3.15	0.32	1.06	0.18	0.28	0.13	0.13	0.08	0.04
3.5	1.02	16.70	0.58	4.19	0.37	1.41	0.21	0.37	0.16	0.18	0.10	0.06
4	1.17	21.48	0.66	5.36	0.42	1.80	0.24	0.47	0.18	0.22	0.11	0.07
4.5			0.74	6.67	0.47	2.24	0.27	0.59	0.20	0.28	0.13	0.09
5			0.82	8.10	0.53	2.73	0.30	0.72	0.22	0.34	0.14	0.11
5.5			0.91	9.66	0.58	3.25	0.33	0.85	0.25	0.40	0.15	0.13
6			0.99	11.35	0.63	3.82	0.36	1.00	0.27	0.48	0.17	0.15
6.5			1.07	13.16	0.68	4.43	0.39	1.16	0.29	0.55	0.18	0.18
7			1.15	15.10	0.74	5.08	0.43	1.33	0.31	0.63	0.20	0.20
7.5			1.24	17.15	0.79	5.77	0.46	1.51	0.34	0.72	0.21	0.23
8			1.32	19.33	0.84	6.50	0.49	1.71	0.36	0.81	0.22	0.26
8.5			1.40	21.62	0.89	7.27	0.52	1.91	0.38	0.91	0.24	0.29
9					0.95	8.09	0.55	2.12	0.40	1.01	0.25	0.32
9.5					1.00	8.94	0.58	2.34	0.42	1.11	0.27	0.36
10					1.05	9.83	0.61	2.58	0.45	1.22	0.28	0.39
10.5					1.11	10.75	0.64	2.82	0.47	1.34	0.29	0.43
11					1.16	11.72	0.67	3.08	0.49	1.46	0.31	0.47
15					1.58	20.80	0.91	5.48	0.67	2.59	0.42	0.83
20							1.21	9.30	0.89	2.41	0.56	1.42
25							1.52	14.05	1.12	6.66	0.70	2.14
30							1.82	19.68	1.34	9.34	0.84	3.00
35									1.56	12.42	0.98	3.99
40									1.79	15.90	1.12	5.11
45									2.01	19.77	1.26	6.36
50											1.40	7.72

Anexo E

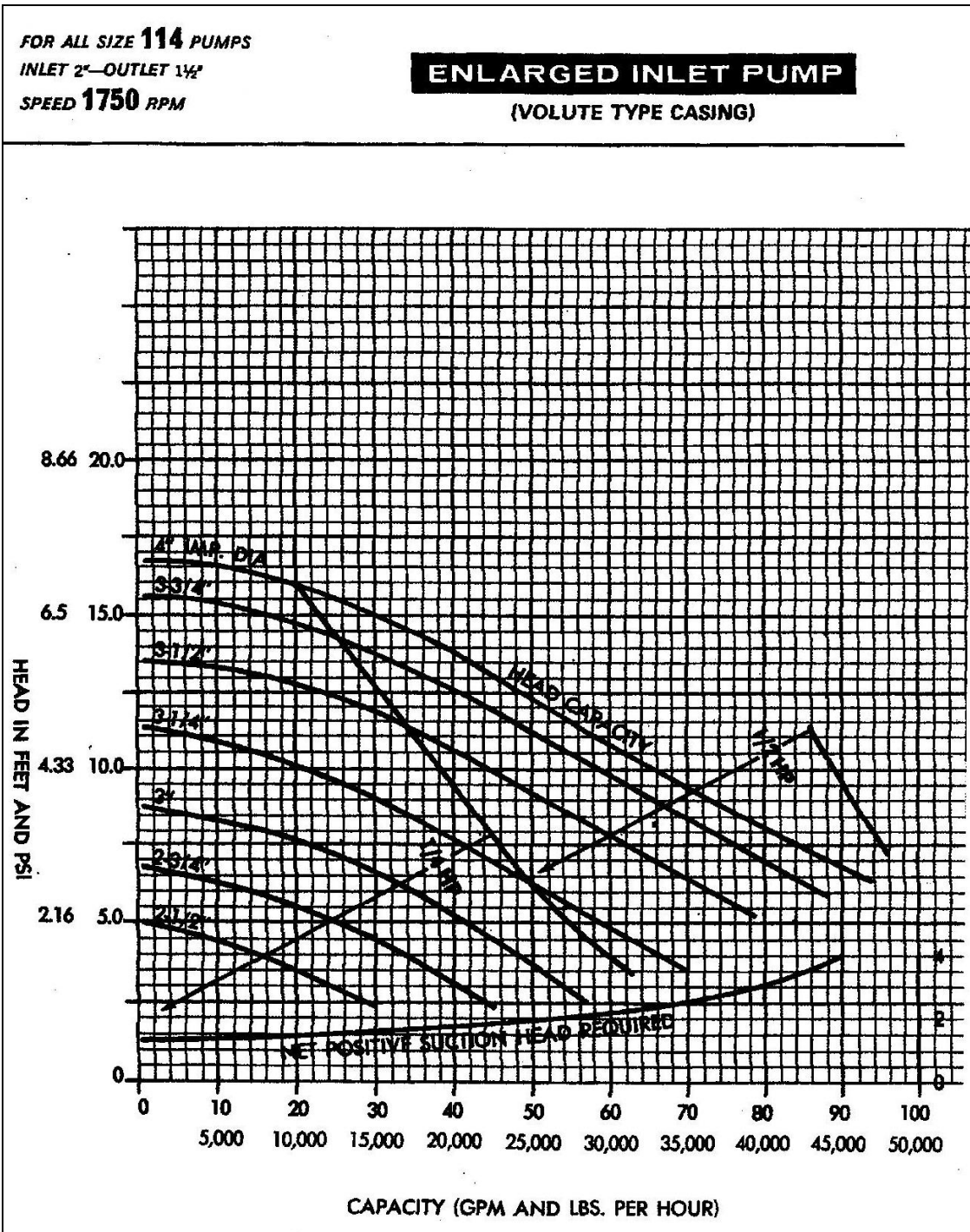


Figura 9. 3: Gráfico para determinar la potencia y el diámetro de Impeler de las bombas centrífugas

Anexo F