



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



[Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra, incluso con fines comerciales, siempre y cuando den crédito y licencia a las nuevas creaciones bajo los mismos términos. Esta licencia suele ser comparada con las licencias copyleft de software libre y de código abierto. Todas las nuevas obras basadas en la suya portarán la misma licencia, así que cualesquiera obras derivadas permitirán también uso comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

El que subscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al documento cuyo título es:

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE PROCESOS PARA DISEÑAR TECNOLOGÍA DE RECUPERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS.

Presentado por:

Bach. LUIS MANUEL ARIAS CASTILLÓN

Autor del Proyecto de Tesis del nivel de **PREGRADO** de la Facultad de **INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA**. El Resultado obtenido es 17%, **APROBADO**, según Reglamento de Evaluación de la Originalidad.

Se adjunta al presente reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Observaciones:

El porcentaje de similitud es mayor del 20%, establecido como máximo por Reglamento de Evaluación de originalidad.

Ica, 26 de noviembre de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



[Firma]
Dra. ROSA LUZ GARCÍA PASACHE
DIRECTORA (e)

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA



“Modelamiento y simulación de procesos para diseñar una tecnología de recuperación de aceites lubricantes usados”

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

CIENCIAS NATURALES, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO PETROQUÍMICO**

AUTOR: Bach. ARIAS CASTILLÓN LUIS MANUEL

ASESOR: Mg. JUAN ALFREDO TOLEDO HUAMÁN

ICA - PERÚ

2024

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerza para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se me presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ello soy lo que soy. Para mis padres por su apoyo, consejo y comprensión, ayuda en los momentos difíciles, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por su colaboración e interés en este trabajo. En segundo lugar, agradezco al ing. Cano, que me dio su tiempo y su cooperación para ayudarme en mi investigación. Además, quiero reconocer a mi esposa, y a mi hijo Santiago Arias, porque sin ellos nunca hubiera podido entender las necesidades, dificultades y esperanzas en este proceso, gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice de Contenidos	iv
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	ix
Resumen	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN	01
II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA	03
2.1. Funciones y tipos de lubricantes	03
2.2. Composición de los lubricantes	05
2.3. Aceites base para lubricantes	06
2.3.1. Clasificaciones de aceites base lubricantes	06
2.4. Aditivos para lubricantes	08
2.4.1. Antioxidantes o inhibidores de la oxidación	08
2.4.2. Aditivos antidesgaste	09
2.4.3. Estabilizadores del índice de viscosidad (IV)	09
2.4.4. Detergentes y agentes dispersantes	10
2.4.5. Aditivos anticonformación	10
2.4.6. Aditivos para mejorar el punto de fluidez	10
2.4.7. Aditivos anticorrosión	10
2.5. Aceites base minerales derivados de petróleo crudo	11
2.5.1. Petróleo crudo	11
2.5.2. Constituyentes de hidrocarburos puros en los petróleos crudos	11

2.5.3.	Otros componentes de los crudos	13
2.5.4.	Selección de crudo para producir materia prima para lubricantes	14
2.5.5.	Producción de materia prima lubricante a partir de petróleo crudo	15
2.5.6.	Procesos de refinación de aceites base minerales	17
2.6.	Lubricantes usados	20
2.6.1.	Composición de los lubricantes usados	20
2.6.2.	Compuestos de hidrocarburos	21
2.6.3.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	23
2.6.4.	Aditivos de lubricantes y combustibles	24
2.6.5.	Redes de gel de hollín	25
2.6.6.	Agua	25
2.6.7.	Metales traza y fragmentos metálicos	26
2.6.8.	Arena y suciedad	26
2.7.	Efectos de los lubricantes usados en la salud humana y el medio ambiente	26
2.7.1.	Efectos tóxicos sobre la salud humana	26
2.7.2.	Efectos tóxicos sobre los animales	26
2.7.3.	Efectos tóxicos en las plantas	27
2.7.4.	Contaminación del agua	28
2.7.5.	Contaminación del suelo	29
2.8.	Biodegradación del lubricante usado	29
2.9.	Beneficios de la regeneración de lubricantes usados	30
2.10.	Tecnología de regeneración de lubricantes usados	30
2.10.1.	Destilación atmosférica	31
2.10.2.	Destilación al vacío	31
2.10.3.	Proceso de ácido sulfúrico	32
2.10.4.	Proceso de adsorción	32
2.10.5.	Hidrotratamiento	33
2.10.6.	Extracción de propano	33
2.10.7.	Evaporación de película fina	34
2.10.8.	Centrifugación	34
2.11.	Sistemas de regeneración de lubricantes usados	34
III.	RESULTADOS	36
3.1.	Teoría y enfoque científicos	36
3.1.1.	Interacciones moleculares en lubricantes usados	38
3.1.2.	Interacción intermolecular y solubilidad	38
3.2.	Disolvente para la recuperación de compuestos de hidrocarburos	39

3.3.	Diseño de la tecnología	39
3.3.1.	Tanques de sedimentación	39
3.3.2.	Evaporador flash	40
3.3.3.	Diseño del Horno	42
3.3.4.	Simulación de los intercambiadores de calor	43
3.3.5.	Simulación de la Torre de destilación	43
3.3.6.	Tanques de clarificación	47
3.3.7.	Separador centrifugo	48
3.4.	Simulación de Procesos	49
3.4.1.	Ecuación de Estado de Peng-Robinson	50
3.4.2.	Análisis para la simulación del proceso	52
IV.	DISCUSIÓN	54
4.1.	Tanques Agitadores	54
4.2.	Separador flash	54
4.3.	Hornos	55
4.4.	Intercambiador de calor	55
4.5.	Columna de Destilación Multicomponente	55
4.6.	Centrífuga Separadora	56
V.	CONCLUSIONES	57
VI.	RECOMENDACIONES	58
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes típicos de los petróleos crudos	11
Tabla 2 Características generales de los compuestos de hidrocarburos puros encontrados en los petróleos crudos.	12
Tabla 3 Metales traza típicos encontrados en petróleo crudo	14
Tabla 4 Características de los Crudos Parafínicos y Nafténicos	15
Tabla 5 Características generales de la gasolina y el diésel	21
Tabla 6 Principales compuestos de carbono e hidrocarburos en los motores diésel	22
Tabla 7 Principales compuestos de hidrocarburos en la gasolina	22
Tabla 8 HAP típicos encontrados en lubricantes usados	23
Tabla 9 Aditivos generales utilizados para combustibles de gasolina	24
Tabla 10 Aditivos generales utilizados para motores diésel	25
Tabla 11 Efectos tóxicos de los lubricantes usados en los organismos acuáticos	27
Tabla 12 Sistemas de regeneración de lubricantes usados	35
Tabla 13 Solubilidad y polaridad del disolvente y el soluto [28]	38
Tabla 14 Composición del AU en los tanques de sedimentación	39
Tabla 15 Parámetros de los tanques sedimentadores	40
Tabla 16 Dimensiones de los tanques sedimentadores	40
Tabla 17 Masa de sedimentos separados en los tanques sedimentadores	40
Tabla 18 Flujo volumétrico de alimentación	40
Tabla 19 Composición másica de la alimentación	41
Tabla 20 Flujos molares de la alimentación	41
Tabla 21 Fracciones molares de la alimentación	41
Tabla 22 Peso molecular medio de las corrientes del evaporador flash	41
Tabla 23 Temperaturas en el tanque de evaporación flash	41
Tabla 24 Simulación del evaporador flash	42
Tabla 25 Simulación de las corrientes del evaporador flash	42
Tabla 26 Simulación del calor entregado a la alimentación del evaporador flash	42
Tabla 27 Diseño de la cámara del evaporador flash	42

Tabla 28 Resultado de la selección del horno	42
Tabla 29 Resultados de la simulación del intercambiador E-302	43
Tabla 30 Resultados de la simulación del intercambiador E-411	43
Tabla 31 Flujos molares de la alimentación a la torre de destilación	43
Tabla 32 Fracciones molares de la torre de destilación	44
Tabla 33 Flujos molares del destilado de la torre de destilación	44
Tabla 34 Fracciones molares del destilado de la torre de destilación	44
Tabla 35 Flujos molares de los fondos de la torre de destilación	44
Tabla 36 Fracciones molares de los fondos de la torre de destilación	45
Tabla 37 Simulación del punto de burbuja del destilado a 49°C	45
Tabla 38 Simulación del punto de burbuja de los fondos a 360°C	45
Tabla 39 Simulación del punto de burbuja de los fondos a 340°C	45
Tabla 40 Simulación del punto de burbuja del destilado a 68,85°C	46
Tabla 41 Volatilidades relativas en el punto de burbuja del destilado	46
Tabla 42 Volatilidades relativas en el punto de burbuja de los fondos	46
Tabla 43 Volatilidad relativa promedio de la torre de destilación	46
Tabla 44 Número mínimo de etapas de la torre de destilación	46
Tabla 45 Reflujo mínimo de la torre de destilación	47
Tabla 46 Número de etapas teóricas de la torre	47
Tabla 47 Número de etapas en la rectificación	47
Tabla 48 Número de etapas de agotamiento	47
Tabla 49 Masa y volumen de bentonita requerida en los tanques	47
Tabla 50 Densidad de la mezcla	47
Tabla 51 Dimensiones de los tanques agitados	48
Tabla 52 Condiciones de operación	48
Tabla 53 Parámetros del separador centrífugo	48
Tabla 54 Diseño del separador centrífugo	48
Tabla 55 Velocidad de giro	49
Tabla 56 Tiempo de sedimentación para la partícula	49
Tabla 57 Tiempo de residencia del flujo	49
Tabla 58 Flujo de aceite base regenerado	49
Tabla 59 Eficiencia del proceso de regeneración	49
Tabla 60 Producción de aceite regenerado por año	49
Tabla 61 Asunciones en la simulación de procesos	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Clasificación de aceites de motor (Pirro, 2001)	4
Fig. 2 Etiqueta de servicio API en los contenedores de aceite del motor	5
Fig. 3 Interpretación de la etiqueta API	5
Fig. 4 Diagrama esquemático simplificado del proceso ADU	16
Fig. 5 Diagrama esquemático simplificado del proceso VDU	16
Fig. 6 Diagrama de flujo simplificado del sistema de separación	18
Fig. 7 Diagrama de flujo simplificado del sistema de conversión	19
Fig. 8 Enfoque científico en el desarrollo de regeneración de lubricantes usados	37
Fig. 9 Estructura molecular del hexano	39
Fig. 10 PFD del proceso de simulación	53

RESUMEN

Este estudio investiga el reciclaje de aceite lubricante usado (ULO) mediante diversas tecnologías, entre ellas la extracción con solvente usando un solvente ternario que consiste en 2-propanol, 1-butanol y metiletilcetona (MEK) seguido de una unidad de destilación al vacío. Para seleccionar la mejor combinación de solventes para el proceso de extracción líquido-líquido, primero se evaluaron muchos parámetros a escala de laboratorio, como el efecto de la composición del solvente, la relación solvente-aceite y la temperatura.

Se midieron la eficiencia de recuperación de aceite y las propiedades fisicoquímicas del aceite obtenido del proceso de extracción, y los resultados mostraron que un sistema ternario que consiste en 50% 1-butanol/25% isopropanol/25% MEK es la mejor mezcla para reducir efectivamente los contaminantes en ULO con una buena separación de lodos antes del fraccionamiento. Además, una relación solvente-aceite de 3:1 y una temperatura de 25 °C son los parámetros óptimos para la extracción cuando se usa la mezcla de solventes antes mencionada.

Luego se simuló todo el proceso de re-refinación, incluida la unidad de destilación al vacío, para una capacidad de planta de 2125 kg/h utilizando Aspen Plus™. Se utilizaron cuatro pseudocomponentes (saturado, monoaromático, diaromático y poliaromático) junto con el coeficiente de actividad cuasiquímica universal (UNIQUAC) y el de dos líquidos no aleatorios (NRTL) para describir el equilibrio líquido-líquido (LLE) en el sistema de aceites lubricantes/disolventes durante la fase de extracción.

Los rendimientos calculados en la unidad de extracción realizada para diferentes composiciones de disolventes, relaciones disolvente-aceite y temperaturas mostraron una buena concordancia con los datos experimentales realizados a escala de laboratorio, lo que verifica la elección correcta de la mezcla de disolventes.

La investigación de la cantidad y composición de la pérdida de aceite dentro del lodo obtenida de la simulación mostró que la reducción de contaminantes y la recuperación de aceite dependen del porcentaje de 1-butanol en la mezcla de disolventes. Además, los resultados confirmaron que la cantidad de MEK y 2-propanol en la mezcla de disolventes no debe superar

el 25% y los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizó 1-butanol como disolvente base con una cantidad del 50%.

Palabras clave: Simulación, aceites lubricantes usados, recuperación de aceite lubricante

ABSTRACT

This study investigates the recycling of used lubricating oil (ULO) using different technologies, including solvent extraction using a ternary solvent composed of 2-propanol, 1-butanol and methyl ethyl ketone (MEK) followed by a vacuum distillation unit. To select the optimal solvent combination for the liquid–liquid extraction process, many parameters were first investigated in the laboratory, such as the effect of solvent composition, solvent–oil ratio, and temperature.

The oil recovery efficiency and the physicochemical properties of the oil obtained from the extraction process were measured, and the results showed that the ternary system consisting of 50% 1-butanol/25% isopropanol/25% MEK was the best that mixture to reduce the removal efficiency of contaminants in the ULO well-separated sludge prior to fractionation. In addition, a solvent-to-oil ratio of 3:1 and a temperature of 25 °C were the optimal parameters for extraction when using the aforementioned solvent mixture.

The entire refinement process, including the vacuum distillation unit, was simulated for a plant capacity of 2125 kg/h using Aspen Plus™. Four pseudocomponents (saturated, monoaromatic, diaromatic and polyaromatic) along with the universal quasichemical activity coefficient (UNIQUAC) and the two non-random liquids (NRTL) were used to describe the liquid-liquid equilibrium (LLE) in the lubricating oil system / system lubricating oil solvents during extraction.

The calculated yields in the extraction unit performed for different solvent compositions, solvent-oil ratios and temperatures showed good agreement with the experimental data performed at the laboratory scale, confirming the correct selection of the solvent mixture. Investigation of the amount and composition of lost oil within the simulated sludge revealed that contaminant reduction and oil recovery depended on the percentage of 1-butanol in the solvent mixture.

Furthermore, the results confirmed that the amount of MEK and 2-propanol in the solvent mixture should not exceed 25% and the best results were obtained when 1-butanol was used as the base solvent with an amount of 50%.

Keywords: Simulation, used lubricating oils, lubricating oil recovery

I. INTRODUCCIÓN

El aceite lubricante (LO) es un producto derivado del petróleo y consiste en una mezcla de hidrocarburos que son una cadena más larga de isoalcanos, monocicloalcanos y varias ramificaciones cortas en el anillo de monoaromáticos [1].

Los LO están hechos de dos componentes que son el aceite base y los aditivos y se forman por destilación del petróleo con un rango de temperatura de 300°C a 400°C [2].

El LO se clasifica en cinco grupos diferentes que son aceite industrial, grasa, aceites automotrices, fluidos metalúrgicos y aceites de proceso que se utilizan ampliamente en industrias a nivel mundial [3].

Según Moura et al., los LO son aceites base que se mezclan con aditivos para mejorar sus características que luego se pueden usar para minimizar el desgaste causado por la fricción física. Durante el uso, el LO sufrirá cambios en términos de degradación, oxidación y contaminación, que hacen que el LO sea ineficaz para una aplicación posterior y necesite ser reemplazado [4].

Literalmente, el LO se usa ampliamente en todas las maquinarias móviles para reducir la fricción entre dos partes móviles que se frotan entre sí [5]. En otras palabras, ayuda a reducir la acumulación de temperatura y la formación de corrosión dentro de las partes móviles que indirectamente reduce la eficiencia de la máquina [1].

Básicamente, los LO constan de dos componentes, el aceite base y los aditivos. Los principales aditivos incluyen antioxidantes, detergentes, materiales antidesgaste, desactivadores de metales, inhibidores de corrosión, inhibidores de óxido, modificadores de fricción, productos resistentes a la presión, agentes antiespumantes, potenciadores del índice de viscosidad, agentes demulsionantes o emulsionantes, potenciadores de la pegajosidad, etc.

Sin embargo, el rendimiento del LO llegará a su fin después de un período de tiempo y reducirá la eficiencia a medida que los aditivos se alteren químicamente y el aceite se contamine con varias toxinas y contaminantes dañinos debido a numerosas interacciones físicas y químicas [6].

La degradación del LO también puede deberse a una mezcla de diferentes materias no deseadas que contienen limaduras, polvo de metal, otros aceites y aditivos también. La oxidación del LO produce aceite lubricante usado (ULO) que tiene un color más oscuro, el valor ácido aumenta para producir precipitado, mal olor, lodos de aceite y contenido de agua [6].

La ocurrencia del proceso de oxidación hará que el LO se vuelva ácido y estos productos ácidos en el aceite causarán corrosión en las partes internas del motor, depósitos y productos de oxidación insolubles que literalmente disminuyen el rendimiento del motor. Cuanto mayor sea la

oxidación, más compuestos con estados de oxidación más altos se producen y la acidez del lubricante aumenta con los niveles crecientes de ácidos carboxílicos.

Además, a alta temperatura, el aceite de motor (EO) aún se degradará incluso en ausencia de oxígeno. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la viscosidad del aceite, que también es una de las causas del deterioro del EO [6].

Por lo tanto, se podría concluir que al mejorar la estabilidad térmica del EO también se mejorará la estabilidad de oxidación y la viscosidad del LO, además de mejorar la volatilidad y la tasa de evaporación del EO. Los contaminantes que contienen compuestos fenólicos, aldehído, metales, barnices, gomas y compuestos asfálticos se producen debido a la combustión interna del motor [7].

Emam & Shoaib (2012) mencionaron que la causa de la formación de impurezas se debe a la oxidación o degradación térmica del aceite. El uso posterior de ULO deteriorado en las maquinarias o equipos, los contaminantes en el aceite se depositan en la superficie de las partes móviles y causan fallas en el instrumento [8].

Los desechos de lubricante tienen un riesgo muy alto ya que contienen cantidades masivas de contenido de ceniza, residuos de carbono, materiales asfálticos, metales, agua y otros materiales sucios [9]. Pueden surgir varios problemas ambientales si los desechos no se eliminan correctamente [10].

La gestión del aceite usado es una preocupación creciente para muchas naciones, especialmente en las áreas industriales y urbanas, ya que este residuo peligroso se ha eliminado en el medio ambiente y ha causado muchas complicaciones. De alguna manera, la idea de la recuperación de petróleo es un gran esfuerzo y ha sido una tradición de cuatro décadas desde que se presentó por primera vez en la década de 1930. Inicialmente, el ULO se había sometido a combustión para la producción de energía y luego se volvió a mezclar con aceite de motor (EO) después del tratamiento.

La evolución de la tecnología de reciclaje es crucial para volver a refinar el ULO para eliminar las contaminaciones físicas, mecánicas y químicas a través del proceso, como la destilación, la hidrogenación, el refinado ácido, el refinado de solventes o combinaciones de los primeros [11].

Últimamente, se han realizado numerosos estudios sobre la recuperación de ULO utilizando adsorbentes a través del proceso llamado adsorción. La adsorción es un proceso mediante el cual se utiliza un adsorbato para adsorber los contaminantes no deseados del aceite usado para mejorar las propiedades.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Funciones y tipos de lubricantes

La función principal de los lubricantes es minimizar la fricción y el desgaste. Otras funciones de los lubricantes incluyen:

➤ **Reducción de ruido y vibración**

El ruido y la vibración resultantes de la fricción entre dos superficies metálicas deslizantes en contacto se pueden minimizar mediante una película lubricante adherida a las superficies metálicas.

➤ **Agente de limpieza y suspensión**

El lubricante puede actuar como agente de limpieza para evitar que productos potencialmente dañinos, como barniz y laca, se depositen en la superficie de los pistones o cilindros de los motores. Los lubricantes pueden proteger las máquinas y los motores de daños por corte al actuar como un medio para suspender impurezas duras y afiladas, como metales, del desgarro y el desgaste de las piezas móviles.

➤ **Protección contra la corrosión**

Los aditivos formulados en lubricantes, como los inhibidores de óxido y corrosión, los agentes antioxidantes y los agentes antidesgaste, pueden proteger los motores y las máquinas del óxido y la corrosión como resultado de la oxidación.

➤ **Enfriamiento**

El lubricante puede actuar como un medio disipador de calor en motores o máquinas para disipar el calor generado durante el funcionamiento.

➤ **Transferencia de energía**

Los lubricantes se pueden utilizar para transferir energía dentro de un sistema cerrado, como sistemas de circulación, sistemas de transmisión y sistemas hidráulicos.

Los lubricantes, dependiendo de las aplicaciones, pueden formularse y producirse en diferentes formas, como sólidos, semisólidos, gaseosos o fluidos. Los lubricantes se clasifican en dos grupos principales: 1) lubricantes automotrices y 2) lubricantes industriales. Más del 60% del total de lubricantes vendidos en todo el mundo se utilizan para vehículos [12].

Los lubricantes industriales se pueden subdividir en aceites industriales y aceites industriales especiales. Los aceites especiales incluyen grasas, lubricantes para trabajar metales y películas lubricantes sólidas. Los grados de lubricantes especiales están estandarizados por los fabricantes de equipos originales [12].

Los aceites de motor, también conocidos como aceites de motor o aceites de cárter, son los lubricantes automotrices de tipo fluido típicos que se utilizan para proteger los motores de combustión interna de los ciclos intensivos de operación y la combustión constante de combustibles.

La viscosidad de los aceites de motor es un factor esencial para mantener los motores funcionando en condiciones óptimas en un amplio rango de temperaturas y condiciones de trabajo.

La Sociedad de Motores Automotrices (SAE) clasifica los aceites de motor en diferentes grados según la viscosidad de los aceites, como se muestra en la Fig. 1.

SAE viscosity grade	Low temperature (°C) cranking viscosity (cP, max) ^b	Low temperature (°C) pumping viscosity (cP, max, with no yield stress) ^c	Kinematic viscosity (cSt) at 100°C min ^d	Kinematic viscosity (cSt) at 100°C max ^d	High shear viscosity (cP), at 150°C and 10 ⁶ s ⁻² , min ^e
0W	3250 at -30	60 000 at -40	3.8	—	—
5W	3500 at -25	60 000 at -35	3.8	—	—
10W	3500 at -20	60 000 at -30	4.1	—	—
15W	3500 at -25	60 000 at -25	5.6	—	—
20W	4500 at -20	60 000 at -20	5.6	—	—
25W	6000 at - 5	60 000 at -15	9.3	—	—
20	—	—	5.6	< 9.3	2.6
30	—	—	9.3	< 12.5	2.9
40	—	—	12.5	< 16.3	2.9 ^f
40	—	—	12.5	< 16.3	3.7 ^g
50	—	—	16.3	< 21.9	3.7
60	—	—	21.9	< 26.1	3.7

Fig. 1 Clasificación de aceites de motor (Pirro, 2001)

^a Todos los valores son especificaciones críticas según lo definido por ASTM D 3244.

^b ASTM D 5293.

^c ASTM D 4684. Tenga en cuenta que la presencia de cualquier límite elástico detectable por este método constituye una falla independientemente de la viscosidad.

^d ASTM 445

^e ASTM D 4683 o ASTM D 4741.

^f Grados 0W-40, 5W-40 y 10W-40.

^g Grados 15W-40, 20W-40, 25W-40 y 40.

La etiqueta de servicio API (Figura 3-1) que se muestra en los contenedores de aceite de motor se utiliza para identificar la clasificación de un aceite de motor específico [13].

La Figura 2 ilustra la interpretación de la etiqueta de servicio API.

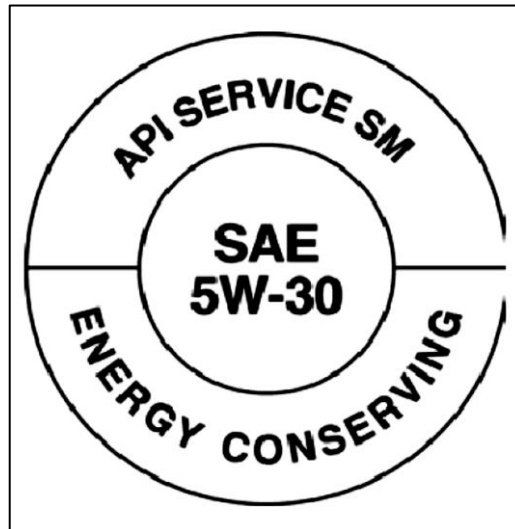


Fig. 2 Etiqueta de servicio API que se muestra en los contenedores de aceite del motor

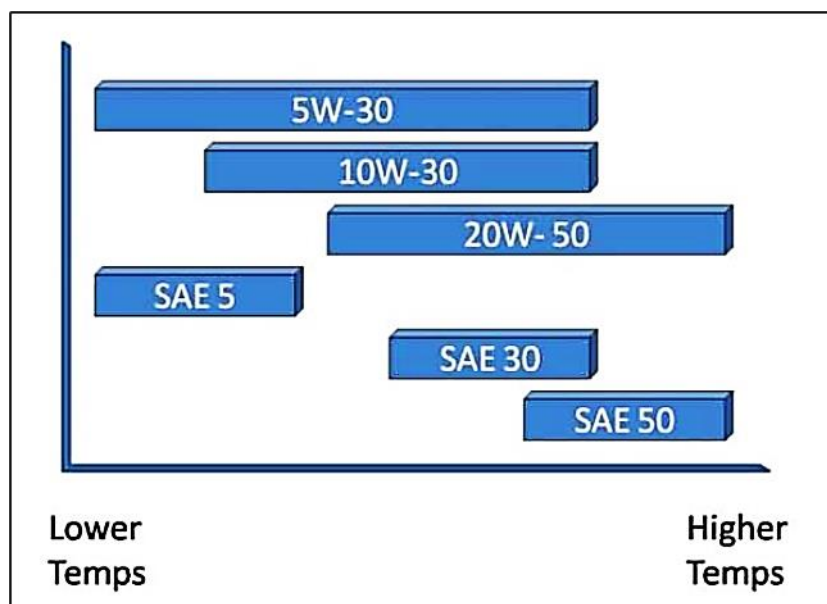


Fig. 3 Interpretación de la etiqueta API

2.2. Composición de los lubricantes

Las industrias modernas necesitan lubricantes de alto rendimiento para proteger sus máquinas del desgaste. Los motores que se utilizan en los vehículos modernos deben mantener sus funciones en una amplia gama de condiciones de funcionamiento. Por lo

tanto, los lubricantes modernos no solo contienen material base, sino también una variedad de aditivos para mejorar el rendimiento específico que el material base por sí solo no puede lograr. La mayoría de los lubricantes que se utilizan hoy en día consisten en un 80 a 95% de aceites base y un 5 a 20% de varios aditivos (Pirro, 2001).

2.3. Aceites base para lubricantes

Los materiales que se pueden utilizar para fabricar aceites base para lubricantes incluyen: 1) los aceites minerales derivados del petróleo (petróleo crudo); 2) las moléculas de cadena larga creadas artificialmente, como fluidos de hidrocarburos sintetizados, ésteres orgánicos, poliglicoles, ésteres de fosfato, siliconas y ésteres de silicato; y 3) aceites extraídos de plantas o grasas y sebos animales [12].

Los aceites base derivados de plantas (por ejemplo, canola, palma, ricino, girasol, semillas de uva) son principalmente ésteres de triglicéridos, que se componen de tres ácidos grasos (esteárico, oleico y linoleico) y un glicerol [14].

Los beneficios de los aceites vegetales incluyen baja volatilidad, alta solubilidad de aditivos, alto índice de viscosidad y buena compatibilidad ambiental. Sin embargo, la estabilidad de oxidación de los aceites vegetales es pobre en comparación con el aceite base 1) y 2).

El uso de grasas animales como aceites base lubricantes ya no es práctico debido a las propiedades indeseables de la mayoría de las grasas animales y la esencia de la protección animal.

2.3.1. Clasificaciones de aceites base lubricantes

Las propiedades de los lubricantes varían según los aceites base. El Instituto Americano del Petróleo (API) clasifica el aceite base en diferentes grupos, según las fuentes y las características de los aceites base [15].

En general, los grupos 1, 2 y 3 son diferentes grados de aceites base minerales. Los grupos 4 y 5 son diferentes tipos de aceites sintéticos.

➤ Grupo 1: Aceites base convencionales

Los aceites base del grupo 1 son aceites minerales convencionales derivados de fracciones seleccionadas de la destilación del petróleo crudo. Los aceites minerales convencionales se han utilizado como aceites base lubricantes desde la década de 1930. Los aceites base del grupo 1 tienen menos del 90 % de hidrocarburos saturados y más

de 300 ppm de compuestos de azufre. El índice de viscosidad (VI) de los aceites base del grupo 1 se encuentra en el rango de 80 a 119 [15].

➤ **Grupo 2: Aceites base convencionales modernos**

Los aceites base del grupo 2 son aceites minerales producidos mediante tecnologías de hidroprocesamiento modernas, como hidrotratamiento, hidrocrackeo, hidroisomerización de ceras e hidroacabado. En comparación con los aceites base minerales convencionales del grupo 1, los aceites base del grupo 2 tienen un mejor rendimiento y los compuestos de azufre e impurezas del grupo 2 son menores. Además, los aceites base del grupo 2 son más estables que los del grupo 1 a alta temperatura.

Los aceites base del grupo 2 normalmente contienen más del 90% de compuestos de hidrocarburos saturados y menos de 300 ppm de compuestos de azufre [16]. El índice de viscosidad (VI) de los aceites base del grupo 2 también está en el rango de 80 a 119 [16].

➤ **Grupo 3: Aceites base no convencionales del grupo 3 (UCBOS)**

Los aceites base del grupo 3 también se conocen como aceites base de índice de viscosidad muy alto (VHVI). El VI de los aceites base del grupo 3 es mucho más alto que el de los aceites base de los grupos 1 y 2. El rendimiento de los aceites base del grupo 3 es mucho mejor que el de los grupos 1 y 2 a baja temperatura.

Los UCBOS son actualmente el tipo de aceites base minerales más popular en América del Norte. Los UCBOS contienen más del 90% de hidrocarburos saturados y menos de 300 ppm de compuestos de azufre. El índice de viscosidad (VI) de los aceites base del grupo 3 normalmente es mayor que 120 [16].

➤ **Grupo 4: Aceites base sintéticos tradicionales**

Los aceites base sintéticos del grupo 4 se conocen comúnmente como alfa olefinas polimerizadas (PAO). En comparación con los aceites base minerales, las PAO tienen un punto de fluidez extremadamente bajo, por lo que son adecuados para su uso en aplicaciones a temperaturas muy bajas.

El rendimiento general de los aceites base sintéticos del grupo 4 es similar al de los UCBO. Sin embargo, las PAO todavía no son tan populares como los UCBO en la actualidad debido a su alto costo. En la actualidad, el Departamento Nacional de Publicidad del Better Business Bureau de América del Norte reconoce que los UCBO son tan buenos como los aceites base sintéticos [16].

➤ **Grupo 5: Aceites base sintéticos especializados**

El grupo 5 son aceites base diseñados que incluyen fluidos de hidrocarburos sintetizados (por ejemplo, polialfaolefinas, polibutenos), ésteres orgánicos (por ejemplo, éster de polioliol, éster de ácido dibásico) y ésteres de silicato, poliglicoles (por ejemplo, polialquileno, polioxialquileno, poliéteres, ésteres de poliglicósidos), ésteres de fosfato

(por ejemplo, éster de fosfato de triarilo, ésteres de fosfato de trialquilo), siliconas y ésteres de silicato [17].

Los ésteres son los aceites base sintéticos más populares utilizados hoy en día en el mercado de lubricantes porque sus puntos de ebullición son altos y sus viscosidades son relativamente estables a alta temperatura [18].

2.4. Aditivos para lubricantes

Los aceites base para lubricantes, ya sean minerales o sintéticos, pueden no tener todas las propiedades necesarias para mantener sus funciones en diversas condiciones. Por lo tanto, los aditivos son elementos esenciales en los lubricantes modernos para mejorar el rendimiento específico. Se han utilizado diversos aditivos como potenciadores del rendimiento de los lubricantes desde la década de 1920.

La concentración de aditivos en lubricantes varía de mil a trescientas mil ppm, según las aplicaciones (Pirro, et al., 2001). El consumo de aditivos ha aumentado enormemente a medida que la demanda de lubricantes ha aumentado significativamente en todo el mundo en las últimas décadas.

En 1997, el consumo total de aditivos para lubricantes en todo el mundo era de aproximadamente 5,7 mil millones de libras [19]. En 2006, la demanda de aditivos aumentó a 6,6 mil millones de libras como resultado del rápido crecimiento de las economías de Asia y América Latina [19]. La mayoría de los aditivos son compuestos químicos. Las posibles reacciones químicas entre los aditivos pueden generar efectos negativos en el rendimiento del lubricante [18].

Es muy importante que los fabricantes de lubricantes utilicen los aditivos de forma adecuada en la formulación del lubricante para lograr un rendimiento óptimo. Los siguientes son los aditivos típicos que se utilizan hoy en día para mejorar el rendimiento del lubricante:

2.4.1. Antioxidantes o inhibidores de la oxidación

La oxidación del lubricante conduce al aumento de la viscosidad y a la formación de productos corrosivos, como ácidos orgánicos. La velocidad del proceso de oxidación normalmente varía con la temperatura. Cuando la temperatura es inferior a 200 °F (93 °C), la velocidad de oxidación es lenta y el proceso de oxidación se inicia por la reacción en cadena de radicales libres, como los radicales peróxido ($\text{HO}_2\cdot$) resultantes de la oxidación de moléculas de hidrocarburos inestables.

Los fenoles alquilados (p. ej., 2,6-diterbutil-4-metilfenol) y las aminas aromáticas (p. ej., N-fenil- α -naftilamina) se utilizan comúnmente para obstaculizar la reacción en cadena neutralizando los radicales libres para formar compuestos inactivos [11].

Cuando la temperatura es superior a 200 °F (93 °C), el proceso de oxidación se ve promovido por el efecto catalítico de los metales de transición como CO, Fe, Cr, CU, Mn y V. Los ditiofosfatos metálicos (p. ej., Zn, Sb y Mo) se utilizan comúnmente como desactivadores de metales para formar una capa de revestimiento protector sobre la superficie de las piezas metálicas (Audibert, 2006; Pirro, et al., 2001).

2.4.2. Aditivos antidesgaste

Los aditivos antidesgaste pueden formar una película protectora sobre las superficies de las piezas metálicas para protegerlas del desgarro y el desgaste. Los ejemplos de aditivos antidesgaste son los compuestos orgánicos polares (p. ej., alcoholes), ésteres grasos, aminas grasas y compuestos orgánicos que contienen azufre, fósforo, cloro, nitrógeno, plomo o zinc. Los compuestos químicos, como los ditiofosfatos de zinc, se pueden utilizar como aditivos antioxidantes y antidesgaste [3].

2.4.3. Estabilizadores del índice de viscosidad (IV)

El índice de viscosidad es una de las características más importantes de los lubricantes. Es una medida del cambio de viscosidad con la temperatura. En general, la viscosidad de los aceites cambia inversamente con la temperatura. Si la viscosidad es demasiado alta, el lubricante puede perder su función y crear efectos negativos para las máquinas o motores. Los estabilizadores de IV se utilizan generalmente para mantener la estabilidad de la viscosidad de los lubricantes en un amplio rango de temperaturas de funcionamiento.

Los materiales que se utilizan comúnmente como estabilizadores de IV son los polímeros de cadena larga que son capaces de cambiar la estructura molecular con la temperatura. La viscosidad de los lubricantes disminuye con el aumento de la temperatura.

Los polímeros de cadena larga son capaces de estirarse e interactuar entre sí para mantener la viscosidad del lubricante a alta temperatura y viceversa a baja temperatura. Los polímeros que pueden realizar tales efectos son polímeros de estireno butadieno hidrogenados, polímeros de metacrilato, polímeros de acrilato y polímeros de olefina.

2.4.4. Detergentes y agentes dispersantes

Los detergentes y agentes dispersantes se añaden a los lubricantes para controlar la formación de barniz y laca, que pueden depositarse en la superficie de las piezas y la cámara de combustión del motor y reducir la eficiencia del motor o incluso causarle un daño significativo. Las sales de metales alcalinotérreos, como los sulfonatos de calcio y magnesio y los fenatos de calcio, se utilizan comúnmente hoy en día como detergentes para mantener los motores limpios y que funcionen correctamente. Las bencilamidas y las succinimidas poliméricas, como las alquenilsuccinimidas, se utilizan habitualmente para desestabilizar la adsorción de barniz y laca [6].

2.4.5. Aditivos anticonformación

Dependiendo de las características de los lubricantes, los detergentes y los aditivos dispersantes pueden provocar la formación de burbujas de aire, denominadas formación, en los lubricantes. La formación puede reducir la eficiencia de los lubricantes y del motor. Los polímeros de silicio y los polimetacrilatos de alquilo con bajo peso molecular se utilizan comúnmente como aditivos anticonformación para colapsar las burbujas de aire al reducir la tensión superficial de las burbujas de aire [17].

2.4.6. Aditivos para mejorar el punto de fluidez

El punto de fluidez es la temperatura más baja a la que un lubricante aún puede fluir. Los motores de los vehículos deben funcionar correctamente durante el clima frío. Sin la ayuda de un mejorador del punto de fluidez, la formación de cristales de cera de parafina en los lubricantes puede reducir la movilidad del lubricante a baja temperatura. Los aditivos para mejorar el punto de fluidez, como los polímeros aromáticos alquílicos y el polimetacrilato, se utilizan comúnmente para ocultar la formación de cristales de cera de parafina al reaccionar con los cristales de cera y evitar que se expandan [12].

2.4.7. Aditivos anticorrosión

Los metales y las aleaciones que se utilizan para fabricar piezas de motores, como el cobre-plomo o el plomo-bronce, pueden corroerse fácilmente por los ácidos fuertes generados a partir de la combustión de compuestos de azufre o materiales antidetonantes en los combustibles [2].

Los succinatos de amina y los sulfonatos alcalinotérreos se utilizan comúnmente como aditivos anticorrosión para proteger las superficies metálicas de la corrosión mediante la formación de una película protectora que se adsorbe físicamente o se une químicamente a la superficie de las piezas metálicas.

2.5. Aceites base minerales derivados de petróleo crudo

2.5.1. Petróleo crudo

La materia prima para la elaboración de aceites base minerales se origina a partir del petróleo crudo. Las propiedades y la composición del petróleo crudo varían según las condiciones geológicas del lugar de extracción.

Los petróleos crudos generalmente constan de diversas cantidades de compuestos de hidrocarburos de diferentes tipos, compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno, compuestos de oxígeno y trazas de componentes metálicos [20].

La Tabla 1 resume la composición típica de los petróleos crudos en todo el mundo.

Tabla 1 Componentes típicos de los petróleos crudos

Componente	% Peso
<u>Hidrocarburos</u>	
Compuestos ricos en carbono	83 - 87
Compuestos ricos en hidrógeno	10-14
<u>No hidrocarburos</u>	
Compuestos que contienen azufre	0.05 - 6
Compuestos que contienen nitrógeno	0.1 - 2
Compuestos que contienen oxígeno	0.05 - 1.5
Trazas de metales (incluidos los organometálicos)	0.1 - mas
Asfalteno y resina	Varía ampliamente

2.5.2. Constituyentes de hidrocarburos puros en los petróleos crudos

Los compuestos de hidrocarburos puros que se encuentran en los petróleos crudos son: 1) parafinas (alcanos); 2) olefinas (alquenos); y 3) hidrocarburos aromáticos [21].

Tabla 2 Características generales de los compuestos de hidrocarburos puros encontrados en los petróleos crudos.

Propiedad	n-parafina	iso-parafina	Naftaleno	Aromático
Estabilidad Oxidativa	Buena	Buena	Equitativo	Pobre
Estabilidad Térmica	Buena	Buena	Equitativo	Pobre
Índice de Viscosidad	Alta	Alta	Medio	Bajo
Punto Puntos (F)	Alta	Baja	Bajo	Bajo

- **Parafinas (alcanos)**

Los alcanos también se conocen como hidrocarburos saturados. Las parafinas lineales incluyen parafinas normales (n-parafinas) y parafinas ramificadas (iso-parafinas) con una fórmula general C_nH_{2n+2} . La cera de parafina y el asfalto son los alcanos con un alto valor de n [22].

Los naftenos son alcanos con forma cíclica. El lubricante puede contener naftenos hasta seis anillos por molécula. Los ejemplos típicos de naftenos son ciclohexano, ciclopentano y sus derivados metílicos [22].

- **Olefinas (alquenos)**

Los alquenos son hidrocarburos insaturados con un doble enlace. La fórmula general de los alquenos es C_nH_{2n} . El contenido total de olefinas en el petróleo crudo es pequeño. Las olefinas son altamente inestables. Por lo tanto, no son adecuados para su uso en la fabricación de materias primas para lubricantes [22].

- **Hidrocarburos aromáticos**

Los hidrocarburos aromáticos son hidrocarburos insaturados cíclicos que contienen uno o más anillos de benceno con una fórmula general C_nH_{2n-6} . Los compuestos de hidrocarburos aromáticos tienen una estabilidad oxidativa y térmica deficientes y un bajo índice de viscosidad.

Por lo tanto, los compuestos de hidrocarburos aromáticos no son adecuados para su uso en la fabricación de materias primas para lubricantes. Sin embargo, los bencenos se pueden combinar con parafinas para proporcionar las propiedades de viscosidad y temperatura deseadas para la fabricación de materias primas para lubricantes [22].

2.5.3. Otros componentes de los crudos

- **Compuestos que contienen azufre**

El contenido de azufre varía generalmente con la densidad del crudo. Los compuestos de azufre, como el sulfuro, los disulfuros y los tiofenos, contribuyen a la corrosión y a la formación de carbón en el motor.

Los compuestos de azufre típicos que se encuentran en el crudo son los mercaptanos (tioles), los sulfuros (tioéteres), los disulfuros, los sulfuros cíclicos, el tiofeno, el benzotiofeno, el dibenzotiofeno y el nafobenzotiofeno [22].

- **Compuestos que contienen nitrógeno**

En comparación con los crudos parafínicos, la concentración de nitrógeno es alta en los crudos napeénicos. Los compuestos de nitrógeno que se encuentran comúnmente en los petróleos crudos incluyen pirrol (C_4H_5N), piridina (C_5H_5N), indol (C_8H_7N), indolina (C_8H_9N), quinolina (C_9H_7N), carbazol ($C_{12}H_9N$), benzo(f)quinolina ($C_{13}H_9N$) y benzo(a)carbazol ($C_{16}H_{11}N$) [22].

- **Compuestos que contienen oxígeno**

Los compuestos de oxígeno más abundantes que se encuentran en los crudos son los ácidos naftéricos. Otros compuestos de oxígeno que se encuentran en los crudos en bajas concentraciones incluyen cetonas, amidas, ésteres y fenoles (Speight, 2007; Optima Energy, 2009).

- **Metales traza (incluidos los organometálicos)**

Los metales traza y organometálicos que se encuentran comúnmente en los crudos son 1) sales inorgánicas solubles en agua, como cloruros y sulfatos de sodio, potasio, magnesio y calcio, en la fase acuosa de las emulsiones de crudo o 2) compuestos solubles en aceite, como vanadio, cobre, parte del hierro y níquel [20].

La Tabla 3 muestra los metales traza típicos que se encuentran en los crudos.

Tabla 3 Metales traza típicos encontrados en petróleo crudo

Metal	Concentración (ppm)
Cobre	0.2 - 12.0
Calcio	1.0 - 2.5
Magnesio	1.0 - 2.5
Bario	0.001 - 0.1
Estroncio	0.001 - 0.1
Zinc	0.05 - 1.0
Mercurio	0.03 - 0.1
Cesio	0.001 - 0.6
Boro	0.001 - 0.1
Aluminio	0.5 - 1.0
Galio	0.001 - 0.1
Titanio	0.001 - 0.4
Zirconio	0.001 - 0.4
Silicio	0.1 - 5.0
Estaño	0.1 - 0.3
Plomo	0.001 - 0.2
Vanadio	5.0 - 1500.0
Hierro	0.04 - 120.0
Cobalto	0.001 - 12.0
Níquel	3.0 - 120.0

- **Asphatain y resina**

El asphatain y la resina son compuestos naturales que se producen durante la formación de petróleo crudo. Tienen compuestos con estructura de múltiples anillos, que no son deseables para los lubricantes y se requiere eliminarlos durante la producción de lubricantes.

2.5.4. Selección de crudo para producir materia prima para lubricantes

Las características del petróleo crudo, como el índice de viscosidad, el punto de fluidez, la estabilidad oxidativa y la estabilidad térmica son los factores esenciales que se deben evaluar durante la selección de petróleo crudo para fabricar materia prima para lubricantes [20].

Como se discutió previamente en este capítulo, las olefinas insaturadas son altamente inestables y se encuentran en cantidades bajas en los petróleos crudos. Por lo tanto, la selección de crudos para la fabricación de materias primas para lubricantes se divide en dos grupos principales: 1) los tipos parafínicos, que consisten principalmente en n-parafinas o hidrocarburos isoparafínicos, y 2) los tipos nafténicos, que contienen principalmente hidrocarburos cicloparafínicos [7].

La Tabla 4 muestra las características de estos dos grupos. En comparación con el tipo nafténico, los crudos parafínicos son más estables y tienen muchas características deseables para la producción de materias primas para lubricantes.

Tabla 4 Características de los Crudos Parafínicos y Nafténicos

Tipo de crudo	Parafínico	Nafténico
Contenido	Poco asfalto, diversas cantidades de cera	Poca o ninguna cera, poco asfalto
Viscosidad (cSt a 40°C)	20.53	20.53
Índice de viscosidad (IV)	100	15
Punto puntos, (F)	0	-50

2.5.5. Producción de materia prima lubricante a partir de petróleo crudo

El primer paso en la producción de aceites base minerales es obtener materia prima lubricante a partir de petróleo crudo, como se explicó anteriormente. Existen dos procesos de destilación principales involucrados en la producción de materia prima lubricante [18].

Primero, el petróleo crudo se fracciona bajo presión atmosférica mediante una unidad de destilación atmosférica (ADU) en varias fracciones, como gases de hidrocarburos, gasolina, queroseno, combustible diésel y gasóleos, en función de las diferencias en su punto de ebullición, como se muestra en la Figura 4.

Los compuestos pesados restantes se fraccionan continuamente mediante una unidad de destilación al vacío (VDU) en materia prima lubricante, como se muestra en la Figura 5.

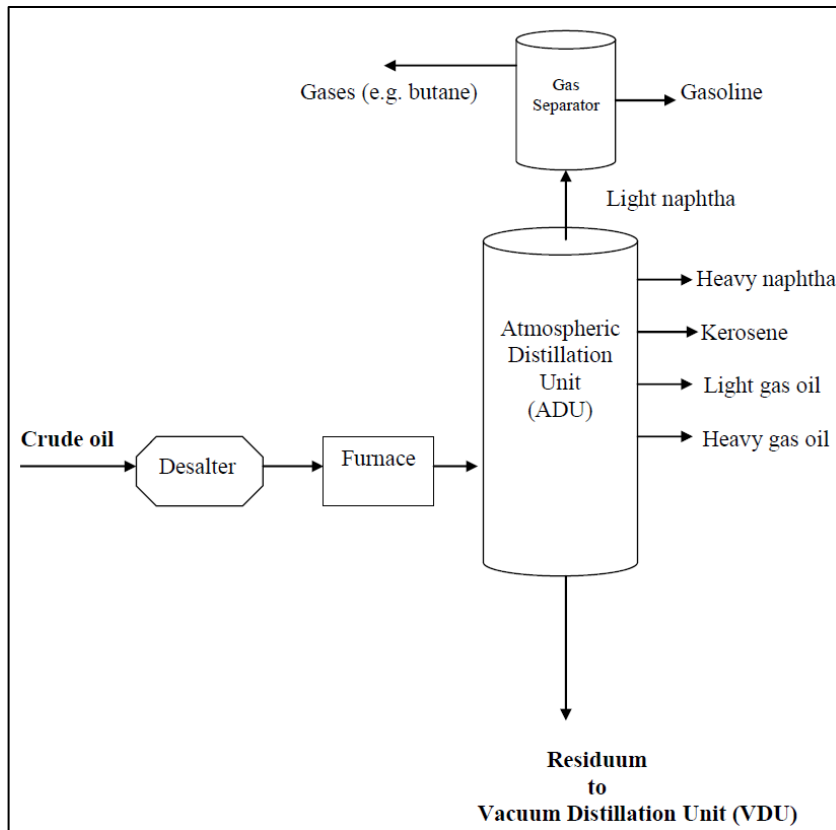


Fig. 4 Diagrama esquemático simplificado del proceso ADU

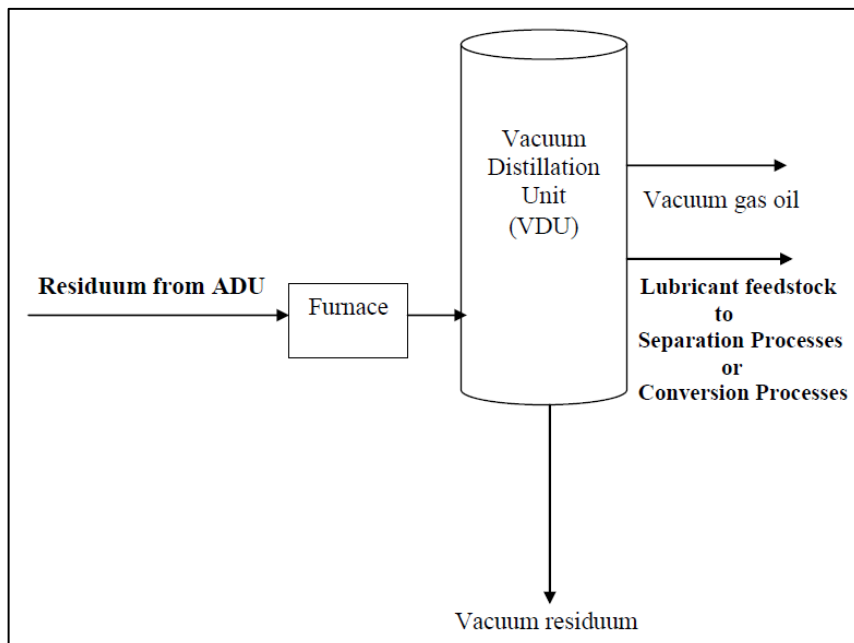


Fig. 5 Diagrama esquemático simplificado del proceso VDU

2.5.6. Procesos de refinación de aceites base minerales

Existen dos métodos bien conocidos para refinar la materia prima lubricante y convertirla en aceites base lubricantes: 1) procesos de separación y 2) procesos de conversión

- **Tecnología de separación**

La tecnología de separación es el método más popular que se utiliza hoy en día para producir aceites base minerales en todo el mundo. La materia prima de lubricante generada a través de ADU y VDU todavía contiene diversas cantidades de asfaltenos, resinas y ceras, que se deben eliminar. El primer proceso en la tecnología de separación es el desasfaltado.

El desasfaltado con propano se utiliza comúnmente para separar los asfaltenos y las resinas de la cera en función de la diferencia en la solubilidad del propano y la solubilidad de los asfaltenos y las resinas. La materia prima desasfaltada se denomina refinado ceroso, que es un compuesto de hidrocarburo de cadena larga (p. ej., C38 y más) que se refina continuamente mediante varios procesos diferentes para obtener aceites base minerales.

Los compuestos de hidrocarburos aromáticos en los petróleos crudos son los compuestos indeseables para fabricar lubricantes, como se mencionó anteriormente. El segundo proceso de la tecnología de separación es la extracción con furfural, que se utiliza para eliminar los compuestos aromáticos.

La tercera etapa se utiliza para eliminar la cera de la materia prima. La metiletilcetona (MEK) se utiliza habitualmente para eliminar la cera. La última etapa de los procesos de separación es el hidroacabado o el tratamiento con arcilla.

El tratamiento tradicional con arcilla ha sido reemplazado gradualmente por el hidroacabado, ya que este último proceso es rentable y sencillo.

La figura 6 ilustra un diagrama de flujo de proceso simplificado del proceso de separación.

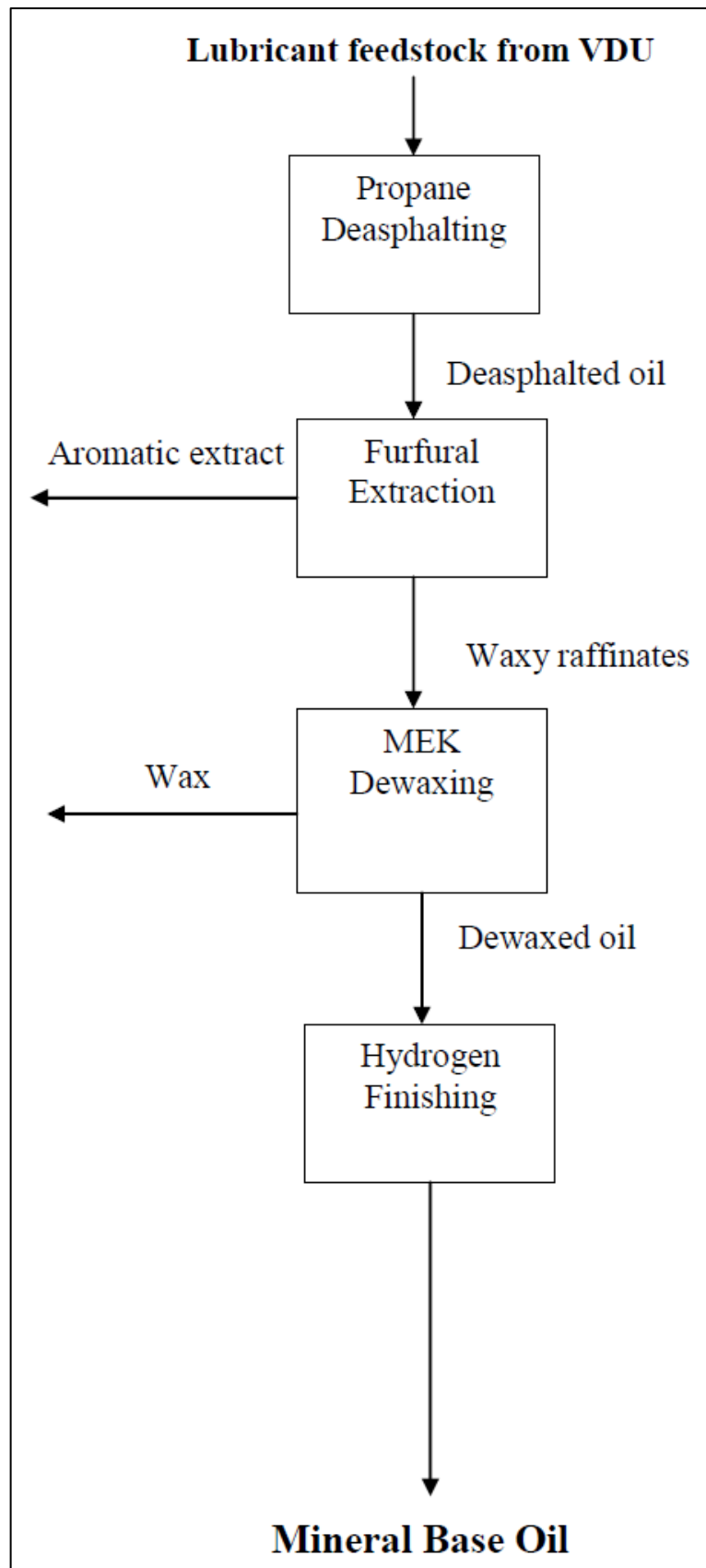


Fig. 6 Diagrama de flujo simplificado del sistema de separación

- **Tecnología de conversión**

Los procesos de la tecnología de conversión incluyen hidrocrqueo, hidrodesparafinado e hidroacabado. El concepto de método de conversión es totalmente diferente del proceso de separación. En lugar de extraer hidrocarburos aromáticos de la materia prima, la unidad de hidrocrqueo (hidrocrqueador) craquea catalíticamente los hidrocarburos aromáticos y los convierte en hidrocarburos parafínicos saturados en presencia de hidrógeno y alta presión (3000 psi).

A la hidrodesparafinación le sigue el hidrocrqueo para convertir catalíticamente las n-parafinas cerosas en isoparafinas en presencia de hidrógeno. El último proceso del método de conversión es el hidroacabado, que implica la saturación de los hidrocarburos insaturados restantes y la recuperación de hidrógeno de los dos primeros procesados.

La figura 7 muestra el diagrama de flujo simplificado de la tecnología de conversión de hidrógeno.

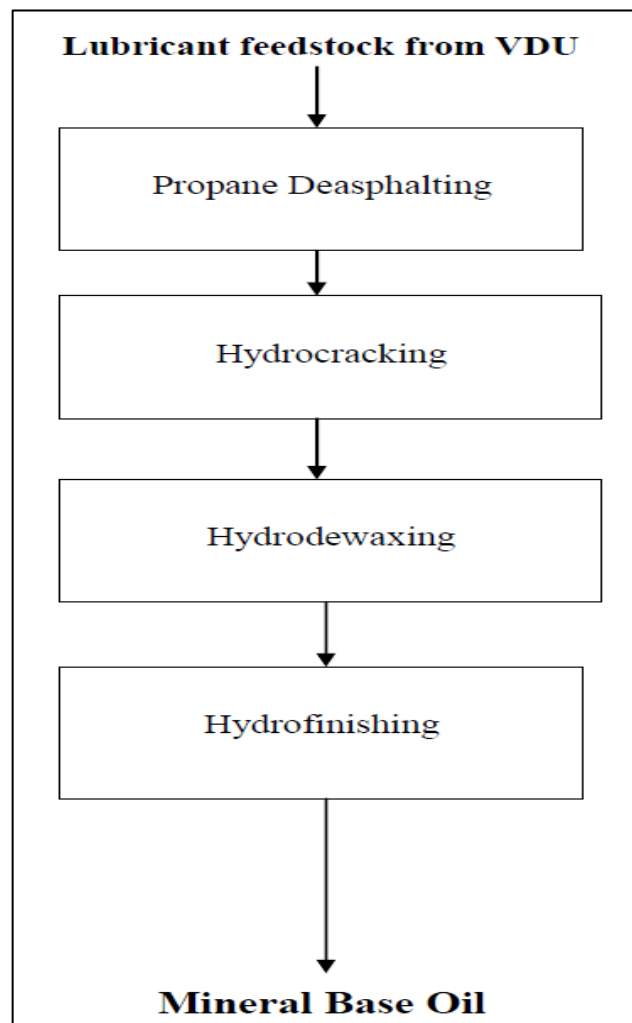


Fig. 7 Diagrama de flujo simplificado del sistema de conversión

2.6. Lubricantes usados

Muchas investigaciones han confirmado que los lubricantes usados a base de petróleo se degradan lentamente, son peligrosos para el medio ambiente y altamente tóxicos para la salud humana, la fauna y la flora.

El estudio de los posibles impactos de los lubricantes usados a base de petróleo para la salud humana, los animales, las plantas y el medio ambiente es importante para aumentar la conciencia pública sobre la manipulación adecuada de los lubricantes usados a fin de evitar que se liberen al medio ambiente.

Se presenta el análisis de la composición general de la mayoría de los lubricantes usados, la evaluación de la biodegradabilidad y toxicidad de los lubricantes usados y la evaluación del riesgo relativo de los lubricantes usados para la salud humana y los ecosistemas.

Como la escasez de petróleo se está convirtiendo en un problema mundial en la actualidad, la regeneración de productos usados a base de petróleo se está volviendo cada vez más importante a lo largo de la historia de la humanidad.

Lo más importante es que la regeneración de lubricantes usados tiene enormes beneficios, que incluyen la minimización de los peligros, la reducción de los desechos, la protección del medio ambiente y la conservación de la energía y los recursos naturales.

2.6.1. Composición de los lubricantes usados

La composición de los lubricantes usados que se recogen de los motores y las máquinas varía considerablemente de un lugar a otro.

Además de los compuestos de hidrocarburos (C4 a C50) de los aceites base y los combustibles no quemados, los lubricantes usados también contienen diversos aditivos de la fórmula original, como se mencionó en el capítulo anterior, y diversas cantidades de contaminantes, como fragmentos de metal, redes de gel de hollín, agregados de hollín, suciedad, compuestos orgánicos (p. ej., benceno, tolueno, xileno, HAP) y metales pesados (p. ej., cadmio, cromo, arsénico, bario, zinc, plomo).

Es muy difícil caracterizar los lubricantes usados porque su composición varía ampliamente según el tipo y la antigüedad de los vehículos y las máquinas, la vida útil del lubricante, los lugares de recogida y las condiciones de funcionamiento.

2.6.2. Compuestos de hidrocarburos

Según el estudio realizado por Elliot en 1986, aproximadamente el 50% del lubricante utilizado en los motores se quemaría y se liberaría como emisión de escape durante el funcionamiento del motor [23].

La posible combustión incompleta de combustibles, como la gasolina y el diésel, ha sido una situación común en los motores de combustión interna. Por lo tanto, los principales compuestos de hidrocarburos que se encuentran en los lubricantes usados son los lubricantes y combustibles no quemados restantes.

Los combustibles no quemados que se encuentran normalmente en los lubricantes usados son los combustibles de gasolina y los diésel. Los diésel son diferentes de la gasolina en muchos aspectos.

La Tabla 5 muestra las características generales de la gasolina y el diésel [24].

Tabla 5 Características generales de la gasolina y el diésel

Características Generales	Combustible	
	Gasolina	Diésel
Densidad (15°C)	0.72-0.77	0.82-0.86
Relación atómica H/C	1.7-1.9	1.9-2.1
Parafinas ^a	40-65	50-65
Naftenos ^a	0-5	20-30
Olefinas	0-20	0
Aromáticos	15 a 45	10 a 30

a. Composición de la familia orgánica (volumen %)

Los compuestos de hidrocarburos generales que se encuentran en los diésel se muestran en la Tabla 6 [24].

La Tabla 7 muestra los compuestos de hidrocarburos generales que se encuentran en los combustibles de gasolina [24].

Tabla 6 Principales compuestos de carbono e hidrocarburos en los motores diésel

Compuestos de hidrocarburos	Nº de Carbonos
Benceno	6
Tolueno	7
Etilbenceno	8
o-xileno	8
m-xileno	8
p-xileno	8
n-Undecano	11
n-Dodecano	12
n-Tridecano	13
n-Tetradecano	14
n-Pentadecano	15
n-Hexadecano	16
n-Heptadecano	17
n-Octadecano	18
n-Nonadecano	19
n-Eicosano	20

Tabla 7 Principales compuestos de hidrocarburos en la gasolina

Compuestos de hidrocarburos	Nº de Carbonos
n-Butano	4
Isopentano	5
n-Hexano	6
2,3-Dimetilbutano	6
2-Metilpentano	6
3-Metilpentano	6
Benceno	6
n-Heptano	7
2,4-Dimetilpentano	7
Tolueno	7
n-Octano	8
Etilbenceno	8
o-xileno	8
m-xileno	8
p-xileno	8
1-Metil-4-etil-benceno	9
1-Metil-3-etil-benceno	9
1,2,4-Trimetil-benceno	9
1,3,5-Trimetil-benceno	9
1,2,3,5-Tetrametil-benceno	10

2.6.3. Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)

Los HAP se forman normalmente en los motores de gasolina debido a la ciclización de compuestos aromáticos no quemados de bajo peso molecular en las gasolinas [16].

Los motores diésel tienen un alto contenido de parafinas y es poco probable que formen HAP en los motores diésel. La concentración de HAP en los aceites de motor usados varía ampliamente de 0 a 4210 $\mu\text{g/g}$ dependiendo del tipo de vehículo, la antigüedad de los vehículos, la vida útil del lubricante y las condiciones de conducción [7].

En general, cuanto más prolongado es el uso del lubricante, mayor es la concentración de HAP en los lubricantes usados [7].

Numerosos estudios han confirmado que los HAP son tóxicos para todos los organismos. La toxicidad de los HAP se ve muy afectada por su estructura. Los HAP con cuatro o más anillos se consideran carcinógenos para los seres humanos [20].

La Tabla 8 muestra los HAP típicos que se encuentran en los lubricantes usados [24].

Tabla 8 HAP típicos encontrados en lubricantes usados

PAH	Estructura (Número de anillos)
Naftaleno	2
Acenaftileno	3
Acenafteno	3
Fluoreno	3
Fenantreno	3
Antraceno	3
Fluoranteno	4
Pireno	4
Benzo(a) antraceno	4
Criseno	4
Benzo(b) fluoranteno	5
Benzo(f) fluoranteno	5
Benzo(a) pireno	5
Dibenzo(a,h) pireno	5
Indeno(1,2,3-cd) pireno	6
Benzo(g,h,i) perileno	6

2.6.4. Aditivos de lubricantes y combustibles

Los aditivos que se encuentran en los lubricantes usados normalmente provienen de la fórmula original del lubricante o de los combustibles no quemados. Los aditivos utilizados en la fórmula de los lubricantes ya se han analizado anteriormente.

La Tabla 9 muestra los aditivos comunes que se utilizan para la gasolina [24].

Tabla 9 Aditivos generales utilizados para combustibles de gasolina

Aditivos para combustible de gasolina	
Antioxidantes	Alquil-p-fenilendiaminas Alquil-p-aminofenoles Alquilfenoles
Desactivadores de metales	N,N'-disalicilideno-1,2-propanodiamina
Mejorador del índice de octano	Metilciclopentadienilmanganeso tricarbonilo (MMT) Dibromuro de etileno Pentacarbaborbonilo de hierro Alquilos de plomo Diciclopentadienilirión Carbonilo de níquel Tetraetilo de estaño Yodo Anilina N-metilanilina MTBE
Detergentes	Amidas de propilendiamina Derivados del anhídrido poliisobutenilsuccínico Derivados del polipropilfenol

A diferencia de la gasolina, los diésel necesitan distintos tipos de aditivos, ya que los microorganismos, como bacterias, levaduras y hongos, pueden crecer en el tanque de almacenamiento de diésel en caso de que el tanque se contamine con agua o humedad del aire [24].

Los biocidas o bacteriostáticos se añaden comúnmente a los diésel para controlar el crecimiento de microbios. La Tabla 10 muestra los aditivos comunes utilizados para la gasolina [24].

Tabla 10 Aditivos generales utilizados para motores diésel

Aditivos para combustible diésel	
Biocidas	Quinolina
	Aminas cíclicas
	N-alkilpropanodiamina
	Imidazolinias
Antioxidantes	N,N-dimetilciclohexilamina
Antideformantes	Polisiloxanos
Desmulsionantes	Alquioxipoliglicol
	Alrilsulfonatos
Mejoradores de cetano	Nitrato de 2-etilhexilo
	Dinitratos de trietilenglicol

2.6.5. Redes de gel de hollín

El lubricante usado es un sistema coloidal único con una cantidad significativa de partículas de hollín suspendidas. Las partículas de hollín generadas a partir de la combustión de combustibles se liberan como emisiones de escape al aire o quedan retenidas en el lubricante.

Según los estudios realizados por el grupo de David Weiltz en la Universidad de Harvard, las partículas de hollín retenidas en lubricantes usados tendían a transformarse irreversiblemente en agregados grandes, así como en una serie de redes de gel de hollín a alta temperatura como resultado de las interacciones entre los agregados de hollín y los aditivos dispersantes en lubricantes usados [20].

La formación de redes de gel de hollín de alta viscosidad puede degradar significativamente el rendimiento de los lubricantes.

La formación de agregados de hollín y redes de gel aumenta proporcionalmente con el contenido de partículas de hollín en el aceite a alta temperatura [20].

2.6.6. Agua

El contenido de agua en los lubricantes usados es de aproximadamente 10 a 30%. El agua y la humedad pueden introducirse en los lubricantes usados por los vapores que se escapan del aire, las fugas del sistema de refrigeración de los vehículos y la combustión de combustibles [23].

2.6.7. Metales traza y fragmentos metálicos

Los metales traza que se encuentran en los lubricantes usados posiblemente provengan de petróleo crudo. Los fragmentos metálicos provienen del desgaste de las piezas móviles de los motores o las máquinas [8].

2.6.8. Arena y suciedad

Es posible que la arena y la suciedad se introduzcan en los lubricantes usados mientras están en tránsito o esperando en las refinerías o en los sitios de recolección [17].

2.7. Efectos de los lubricantes usados sobre la salud humana y el medio ambiente

“Los aceites usados representan una amenaza grave para la salud humana y el medio ambiente debido a su capacidad de ingresar a las cuencas hidrográficas, contaminar las aguas subterráneas y el agua potable”.

EPA de EE. UU.

La toxicidad es una de las características más importantes de los lubricantes usados que se deben tener en cuenta en la evaluación del riesgo relativo para la salud humana, los animales y las plantas.

2.7.1. Efectos tóxicos sobre la salud humana

Los lubricantes usados contienen cantidades considerables de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Los HAP con cuatro o más anillos se consideran carcinógenos para los humanos [25].

Los factores de riesgo de los HAP se resumen en la bibliografía, que incluye la vía de exposición, la dosis de ingesta y la duración de la exposición.

2.7.2. Efectos tóxicos sobre los animales

Los lubricantes usados también son muy tóxicos para los animales, especialmente para los embriones y los animales recién nacidos. Los estudios de laboratorio han demostrado que la superficie de las cáscaras de los huevos de los patos silvestres y las codornices bobwhite eran muy vulnerables a los lubricantes usados. Incluso una concentración baja de lubricantes usados (0,003 ml y 0,015 ml) podría causar una mortalidad del 88% en embriones de codorniz bobwhite y del 84% en embriones de pato real [25].

Otros efectos nocivos incluyen un crecimiento reducido, defectos congénitos (por ejemplo, edema subcutáneo, osificación incompleta, defectos oculares y cerebrales) y una mayor mortalidad [8].

Muchos estudios han confirmado que las fracciones solubles en agua de los lubricantes usados son muy tóxicas para los organismos acuáticos [23].

La Tabla 11 muestra la toxicidad de las fracciones solubles en agua de los lubricantes usados. La CL50 se utiliza como medida estándar de toxicidad para indicar la concentración letal capaz de matar al 50% de la población de organismos experimentales en un tiempo determinado.

Tabla 11 Efectos tóxicos de los lubricantes usados en los organismos acuáticos

Especies acuáticas	Concentración (mg/L)	Tiempo (h) a LC50
Especies de agua dulce		
Pez bandera americano (<i>Jordanella floridae</i>)	1 - 9.5	96
Carpita cabezona (<i>Pimephales promelas</i>)	1 - 9.5	96
<i>Daphnia magna</i>	4.65	48
Especies marinas		
Embrión de almeja (<i>Mercenaria</i>)	0.04	48
Larvas de almeja (<i>Mercenaria</i>)	0.1	48

2.7.3. Efectos tóxicos en las plantas

Las plantas también son vulnerables a los lubricantes usados. Se han utilizado verduras como rábanos, nabos y frijoles para estudiar los efectos de los lubricantes usados en el crecimiento de las plantas. Las plantas se sembraron en diversos suelos (p. ej., franco arenoso y franco arcilloso) que estaban contaminados. Los resultados indicaron que ninguna de ellas sobrevivió en el franco limoso y franco arenoso después de nueve meses. Aunque algunas plantas sobrevivieron en el franco arcilloso contaminado, crecieron mal y presentaron diversas anomalías, como hojas y tallos amarillos [23].

Los lubricantes usados podrían afectar en gran medida el crecimiento del maíz y el sorgo. El crecimiento del maíz disminuyó en un 46% en el suelo contaminado (1300 ml/m²). El crecimiento del sorgo también se redujo al 76% al final de la temporada [24].

Se realizaron estudios similares para evaluar la toxicidad de los lubricantes usados para las comunidades de algas de agua dulce y las especies de fitoplancton marino. El estudio

demonstró que la abundancia de algas de agua dulce disminuyó significativamente y que también se inhibió la tasa fotosintética del fitoplancton [23].

2.7.4. Contaminación del agua

Los recursos hídricos (aguas superficiales y subterráneas) pueden contaminarse con lubricantes usados de las siguientes maneras:

- Disposición ilegal de lubricantes usados en alcantarillas;
- Vertido de lubricantes usados con otros desechos como basura; y
- Fugas o derrames de lubricantes usados que ingresan a cuerpos de agua por escorrentía de aguas pluviales.

Los lubricantes usados que se desechan ilegalmente en los sistemas de alcantarillado de aguas pluviales pueden contaminar significativamente las aguas superficiales y causar efectos nocivos para los ecosistemas acuáticos. La escorrentía de aguas pluviales lleva los derrames de lubricantes usados a las alcantarillas y es otra ruta posible para que los lubricantes usados ingresen a las aguas superficiales [23].

Cinco cuartos de galón de lubricante usado pueden contaminar un millón de galones de agua dulce [18]. Una pinta de lubricante usado puede formar una película de aceite en la superficie del agua que puede cubrir aproximadamente un acre de la superficie del agua [18].

La película de lubricante usado puede dañar el cuerpo de agua y los ecosistemas acuáticos al bloquear la luz solar para los procesos fotosintéticos en el agua e impedir el ciclo del oxígeno disuelto [18].

Además de la película de aceite, metales como el zinc, el cobre y el cadmio; y los HAP solubles en agua, como el benzo(a)pireno y el naftaleno, pueden disolverse en el agua y causar daños considerables a los organismos acuáticos [9].

En caso de que el lubricante usado se deseche en el alcantarillado sanitario, lo más probable es que se transporte a una planta de tratamiento de aguas residuales. Las sales metálicas presentes en el lubricante usado pueden dañar gravemente la planta de tratamiento [25].

2.7.5. Contaminación del suelo

Es muy probable que los lubricantes usados se adsorban en los desechos orgánicos de los vertederos cuando se desechan con otros desechos domésticos como basura y, finalmente, terminan en los vertederos [23].

En los vertederos con suelos permeables, los materiales solubles en agua de los lubricantes usados pueden penetrar fácilmente en los desechos y terminar contaminando las aguas subterráneas mediante la lixiviación y percolación de las aguas de escorrentía [23].

2.8. Biodegradación del lubricante usado

La biodegradabilidad es otra característica importante del lubricante usado que se debe tener en cuenta en la evaluación de los impactos del lubricante usado en el medio ambiente. La tasa de biodegradación del lubricante usado en el suelo varía ampliamente (30 a 410 días) dependiendo de la composición del lubricante usado, la estructura y el peso molecular de los materiales biodegradables en el lubricante usado y el tipo de lubricante. En general, los lubricantes sintéticos usados se pueden degradar más rápidamente en el suelo y el agua que los lubricantes usados a base de minerales [25]. Otros factores que afectan la tasa de degradación incluyen la temperatura y la disponibilidad de nitrógeno en el suelo [16].

La mayoría de los compuestos biodegradables en lubricantes usados son compuestos de hidrocarburos. Muchos estudios han confirmado que los hidrocarburos aromáticos y los alcanos cíclicos se degradan mucho más lentamente que los n-alcanos y los alcanos ramificados [23].

Los compuestos con alto peso molecular tienden a acumularse en el suelo, por lo que la tasa de degradación es mucho más lenta que los compuestos con bajo peso molecular [7]. El tipo de servicio también afecta en gran medida la tasa de degradación. Aproximadamente entre el 55 y el 82 % de los lubricantes usados recolectados de los automóviles de pasajeros podrían degradarse en un año. Los lubricantes usados recogidos de camiones diésel sólo se degradaron entre un 23 y un 53% en el mismo período de tiempo [23].

Los compuestos orgánicos ligeros (p. ej., tolueno, benceno) en las películas de aceite sobre la superficie del agua se volatilizaban gradualmente en el aire. Los hidrocarburos pesados restantes en el lubricante usado se convertían normalmente por fotooxidación o biodegradación, ya sea química o físicamente, en compuestos diferentes, como ácidos aromáticos, ésteres metílicos, polifenoles y peróxidos. Esos productos y metales pesados

originalmente suspendidos en la película de aceite permanecían en el agua y normalmente podían causar un daño significativo a los organismos acuáticos [4].

2.9. Beneficios de la regeneración de lubricantes usados

Los lubricantes usados se pueden regenerar para obtener aceites base lubricantes o una fuente de energía. Los beneficios de la regeneración de lubricantes usados se describen a continuación:

➤ **Conservación de recursos naturales**

Como se mencionó anteriormente, los lubricantes usados contienen cantidades considerables de compuestos de hidrocarburos derivados de recursos naturales, como el petróleo crudo. Por lo tanto, el reciclaje y la reutilización de lubricantes usados pueden reducir el consumo de recursos naturales.

➤ **Conservación de energía**

Los compuestos de hidrocarburos en lubricantes usados, ya sea de materiales base de lubricantes o combustibles no quemados, se consideran un valor calorífico y se pueden utilizar como fuente de energía después de que el lubricante usado se purifique.

➤ **Reducción de residuos peligrosos**

Como se mencionó anteriormente, los lubricantes usados son altamente tóxicos para los seres humanos, los animales y las plantas. La regeneración de lubricantes usados puede reducir una cantidad significativa de residuos peligrosos.

➤ **Protección del medio ambiente**

Los lubricantes usados son peligrosos para el medio ambiente, como se mencionó en la sección anterior. Por lo tanto, la regeneración de lubricantes usados para obtener material base de lubricantes o una fuente de energía puede minimizar los posibles peligros ambientales.

2.10. Tecnología de regeneración de lubricantes usados

Como se mencionó anteriormente, cada año se generan en todo el mundo más de dos mil millones de galones de lubricantes usados. La regeneración de lubricantes usados no solo ayuda al mundo a reducir los peligros y los desechos, sino que también conserva una cantidad significativa de energía. La mayoría de los procesos convencionales para la regeneración de lubricantes usados implican tratamientos físicos y químicos para eliminar los contaminantes e impurezas hasta alcanzar un nivel deseable que sea adecuado para su

reutilización como aceites base lubricantes o una fuente de energía, como el combustible para calefacción.

Algunas tecnologías pueden generar efluentes líquidos, desechos sólidos y emisiones atmosféricas durante el proceso de regeneración. Los tipos de desechos, efluentes y residuos varían según la tecnología y los procesos utilizados, y los métodos de control ambiental [23].

Las fuentes de efluentes líquidos incluyen 1) agua separada de lubricantes usados e intercambiadores de calor; 2) agua de refrigeración contaminada; 3) agua de vapor condensado; y 4) agua de depuradores de gases. Los efluentes líquidos requieren tratamientos adicionales antes de poder reutilizarse para refrigeración o descargarse a un sistema de alcantarillado [23].

Los desechos sólidos generados a partir del proceso de regeneración de lubricantes usados incluyen varios tipos de lodos (por ejemplo, lodos ácidos, lodos de hollín, arcillas usadas y otras impurezas en lubricantes usados) según el proceso aplicado. Los lodos de hollín se pueden mezclar con asfalto y utilizar como material de revestimiento y extensor en la pavimentación de carreteras para que ya no sean peligrosos para el medio ambiente [23].

Las tecnologías y procesos que se utilizan comúnmente en la actualidad para la regeneración de lubricantes usados se resumen a continuación:

2.10.1. Destilación atmosférica

La destilación atmosférica (160 a 180 °C) se utiliza principalmente para la destilación de compuestos de hidrocarburos ligeros en lubricantes usados, como gasolina, diésel, disolventes y agua en lubricantes usados. El agua separada del lubricante usado puede tratarse más y utilizarse para enfriar la planta o descargarse en aguas superficiales (CEPA, 1994).

2.10.2. Destilación al vacío

La destilación al vacío se utiliza comúnmente para fraccionar los compuestos de hidrocarburos que no se pueden separar mediante destilación atmosférica. Estos hidrocarburos suelen tener un peso molecular de medio a alto y requieren una temperatura más alta para la destilación.

La presión típica utilizada en la destilación al vacío es de 10 a 50 mm Hg. Los compuestos de hidrocarburos destilados de este proceso se pueden vender como combustibles o usarse como combustibles para calefacción en las refinerías [17].

2.10.3. Proceso de ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico se ha utilizado para refinar aceites (petróleo crudo y aceites animales) desde la década de 1950. En el caso de los lubricantes usados, se utiliza ácido sulfúrico concentrado (del 6 % al 98 %) para oxidar las impurezas en los lubricantes usados.

Para evitar la oxidación de los compuestos de hidrocarburos en los lubricantes usados, los parámetros operativos del tratamiento con ácido, como la temperatura y el tiempo de residencia, deben controlarse cuidadosamente. La temperatura de funcionamiento típica para el tratamiento con ácido es de entre 30 y 40 °C. El tiempo de residencia se controla entre 15 y 30 minutos.

En comparación con otras tecnologías, el costo de la infraestructura y la operación de la planta de tratamiento ácido es bajo. El rendimiento de producción de las plantas de tratamiento ácido es moderado. Sin embargo, el lodo ácido y la emisión de gases ácidos generados durante el proceso de tratamiento ácido son extremadamente peligrosos para el medio ambiente.

El CaO o la cal se utilizan comúnmente para neutralizar el lodo ácido. Sin embargo, el lodo generalmente no se puede neutralizar por completo y aún se considera un residuo peligroso después de la neutralización [25].

Otros problemas asociados con este proceso incluyen:

- El costo de la eliminación del lodo ácido es alto.
- Las ubicaciones para el almacenamiento del lodo ácido son difíciles de encontrar.

Estos problemas hacen que esta tecnología sea menos favorable para las industrias [14].

2.10.4. Proceso de adsorción

Los adsorbentes, como la bauxita, el gel de sílice y la arcilla activada, se utilizan comúnmente para separar los compuestos de hidrocarburos o las impurezas de los lubricantes usados, según las aplicaciones. La arcilla activada se utiliza normalmente para eliminar el color y el olor que quedan en los lubricantes usados tratados después de la destilación al vacío o el tratamiento con ácido.

El tiempo de residencia varía con el grado de contaminación de los lubricantes usados. La arcilla usada se puede reciclar bajo el control de la temperatura en el rango de 150 a 330°C [26].

La calidad y el rendimiento del lubricante usado tratado pueden variar ampliamente según la cantidad de contaminantes en los lubricantes usados. La eficiencia de adsorción puede disminuir cuando el adsorbente está saturado con impurezas.

2.10.5. Hidrotratamiento

La combinación de hidrógeno y catalizadores sólidos bajo el control de la presión (5 a 160 bar) es una práctica común que se utiliza para eliminar H_2S , NH_3 , H_2O y metales en la refinación de petróleo [26].

El hidrotratamiento también se puede aplicar a la regeneración de lubricantes usados. El hidrotratamiento generalmente consta de dos etapas: 1) eliminación de metales y metaloides y 2) eliminación de compuestos de azufre y nitrógeno. La primera etapa del hidrotratamiento utiliza un concepto similar al de la refinación de petróleo. Las impurezas se eliminan mezclando lubricantes usados con catalizadores sólidos (CO-MO con alúmina) en presencia de hidrógeno.

Para minimizar la saturación del catalizador, generalmente se requiere un pretratamiento en la primera etapa para reducir las impurezas en los lubricantes usados a un nivel aceptable (30-50 ppm). Sin embargo, la reciente mejora en la estructura del catalizador (estructura de castaño) ha hecho que la tasa de eliminación de metal sea mucho más alta (hasta un 60%) que el diseño anterior (hasta un 20%) [26].

La segunda etapa se utiliza para eliminar los compuestos de azufre y nitrógeno en lubricantes usados mediante un catalizador de alúmina y Ni-Mo en forma esférica o extruida.

2.10.6. Extracción de propano

El propano se utiliza comúnmente para purificar lubricantes usados mediante la precipitación de impurezas de la fase de aceite a alta presión (10 atm). En comparación con otras tecnologías, la extracción de propano es económica porque el propano se puede reciclar y reutilizar indefinidamente.

La calidad de los lubricantes tratados es relativamente constante. Por lo general, se requiere un pretratamiento para este proceso para eliminar grandes impurezas en los lubricantes usados con el fin de proteger la planta de obstrucciones [26].

La centrifugación se combina comúnmente con este proceso para sedimentar las impurezas grandes.

2.10.7. Evaporación de película fina

En el evaporador de película fina, los lubricantes usados se extienden como una capa de solución sobre la superficie caliente. La fase oleosa de los lubricantes usados se evapora instantáneamente de la superficie caliente y se recoge en el condensador junto al evaporador o dentro del evaporador, según el diseño del sistema.

2.10.8. Centrifugación

El agua y las impurezas suspendidas en los lubricantes usados son difíciles de sedimentar por gravedad regular debido a la acción dispersiva de los aditivos. El uso de la fuerza centrífuga, que es equivalente a mil veces la fuerza gravitacional, es una de las soluciones para sedimentar el agua y las impurezas suspendidas de los lubricantes usados [26].

Sin embargo, la centrifugación aún no puede eliminar todas las impurezas de los lubricantes usados. Por lo tanto, la centrifugación se utiliza comúnmente como un pretratamiento para eliminar impurezas grandes y pesadas en los lubricantes usados, como fragmentos de metal provenientes del desgaste de las piezas móviles y arenas.

La centrifugación también se emplea para separar lodos ácidos en el proceso de tratamiento ácido. La arcilla utilizada en el tratamiento ácido puede absorber una cantidad considerable de lubricantes tratados que se pueden extraer mediante centrifugación en el proceso de acabado.

2.11. Sistemas de regeneración de lubricantes usados

El lubricante usado es una mezcla compleja de diversos materiales incompatibles, como la fase líquida de hidrocarburos y la fase sólida de impurezas. Por lo tanto, no existe un único proceso o tecnología que pueda lograr todos los requisitos necesarios para la regeneración de lubricantes usados. Los sistemas convencionales suelen combinar dos o más procesos, como se explicó en la sección anterior, para regenerar lubricantes usados hasta obtener una calidad aceptable.

La Tabla 12 resume los sistemas más populares que se utilizan hoy en día para la regeneración de lubricantes usados.

Tabla 12 Sistemas de regeneración de lubricantes usados

Nombre del Proceso	Tecnología
Blanqueo de arcilla	Destilación Atmosférica + Proceso de Adsorción (Arcilla) + Centrifugación
Sistema ácido	Destilación atmosférica + Proceso de ácido sulfúrico + Proceso de adsorción (arcilla o carbón activado) + Cal o CaO + Filtración o centrifugación
Sistema de propano	Destilación Atmosférica + Extracción de Propano + Destilación al Vacío + Proceso de Adsorción o Hidroproceso
Sistema térmico	Destilación Atmosférica + Proceso Térmico + Proceso de Adsorción (Arcilla) o Hidroproceso
Sistema hidroeléctrico	Destilación Atmosférica + Hidroproceso
Sistema de película fina	Destilación Atmosférica + Evaporador de Película Delgada (TFE) + Hidroproceso

III. RESULTADOS

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una tecnología sostenible que sea capaz de purificar eficazmente los lubricantes usados y recuperar compuestos de hidrocarburos de los lubricantes usados.

“Respetuoso con el medio ambiente y rentable” son dos factores importantes en el desarrollo de la nueva tecnología. Los criterios necesarios para este proceso recientemente desarrollado se describen a continuación:

- Las impurezas deben eliminarse de los lubricantes usados de forma rápida y económica.
- Los compuestos de hidrocarburos deseables deben recuperarse de los lubricantes usados de forma rápida y económica.
- Los reactivos utilizados para la purificación de lubricantes usados deben ser reciclables y reutilizables.
- Los reactivos utilizados para la recuperación de compuestos de hidrocarburos deben ser reciclables y reutilizables.
- El consumo de energía utilizado para este sistema debe ser mínimo.

3.1. Teoría y enfoque científicos

Este novedoso proceso de tratamiento se desarrolló mediante un enfoque sistemático basado en la experiencia, los resultados experimentales y las revisiones de la literatura.

El siguiente diagrama de bloques, Figura 5-1, ilustra las fases involucradas en el proceso.

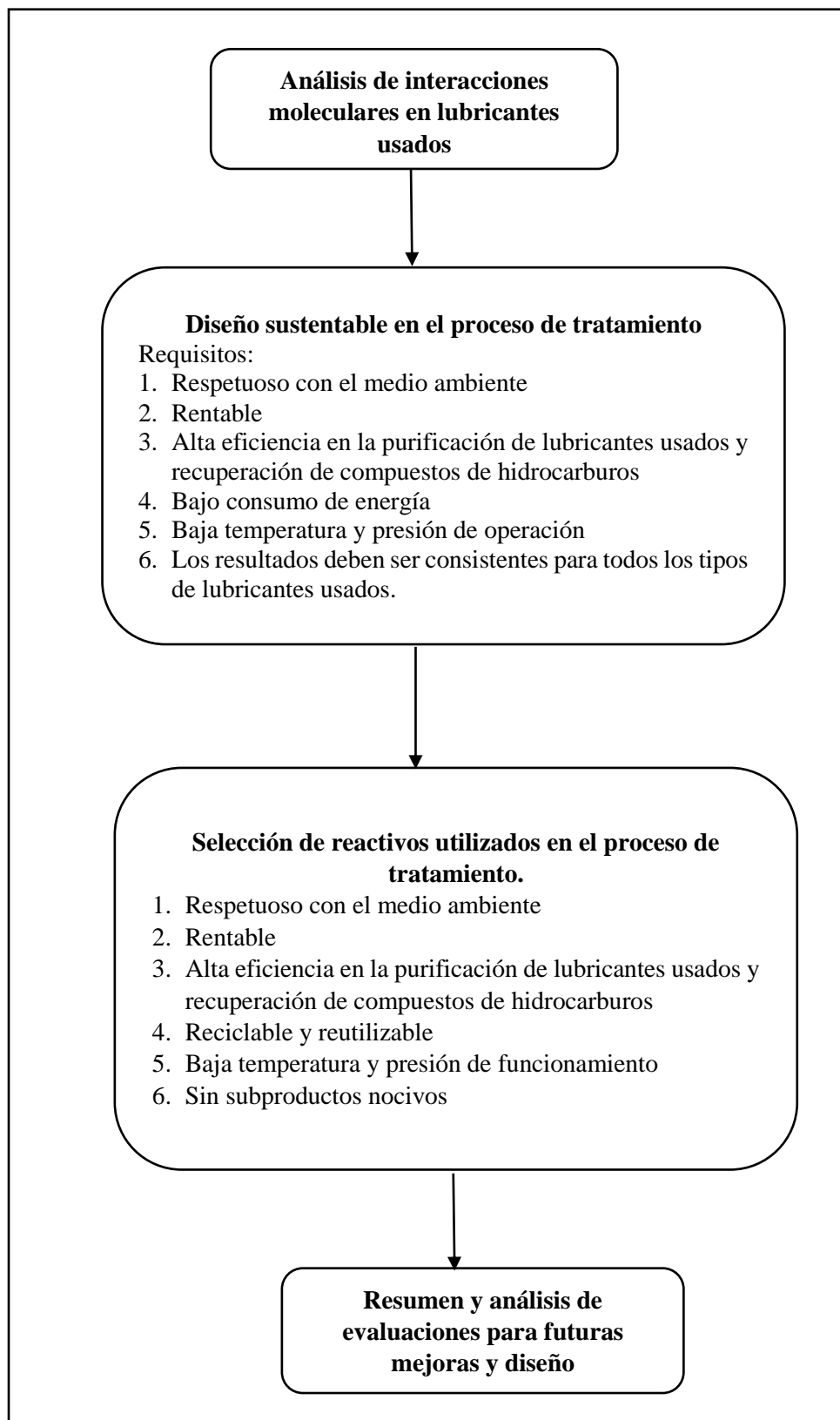


Fig. 8 Enfoque científico en el desarrollo de procesos de regeneración de lubricantes usados

3.1.1. Interacciones moleculares en lubricantes usados

El análisis de las interacciones moleculares entre los distintos componentes de los lubricantes usados es un paso esencial para determinar el método de tratamiento, así como la selección de reactivos en el nuevo proceso de tratamiento desarrollado. Como se explicó anteriormente, el lubricante usado es un sistema coloidal único que consta de una variedad de impurezas y diversas cantidades de compuestos de hidrocarburos.

Las impurezas deben eliminarse antes de que los lubricantes usados puedan regenerarse en materiales de base lubricantes o fuentes de energía. Dado que el lubricante usado es un sistema coloidal, la desestabilización de las impurezas suspendidas es el primer paso lógico para la purificación.

Sin embargo, las experiencias han indicado que las partículas coloidales de los lubricantes usados son diferentes de las que se encuentran en la fase acuosa. Por lo tanto, los coagulantes utilizados para el tratamiento del agua no funcionaron para los lubricantes usados.

Dado que las partículas de hollín inorgánico y las moléculas de hidrocarburos orgánicos son dos materiales incompatibles, en teoría deberían colocarse en categorías diferentes en función de sus diferencias. Las experiencias y los resultados experimentales indican que utilizar las diferencias de solubilidad de los disolventes orgánicos es un método eficaz para separarlos entre sí. Además, este método sigue los principios de diseño sostenible mencionados en la sección anterior, ya que los disolventes orgánicos se pueden reciclar y reutilizar indefinidamente.

3.1.2. Interacción intermolecular y solubilidad

La solubilidad del soluto en el disolvente está determinada por la interacción intermolecular entre el disolvente y el soluto. Los compuestos polares normalmente tienen una fuerza intermolecular diferente a la de los compuestos no polares.

La solubilidad del soluto en el disolvente se ve muy afectada por la polaridad de los disolventes y los solutos, como se muestra en la Tabla 5-1 [27].

Tabla 13 Solubilidad y polaridad del disolvente y el soluto [28]

Solutos	Solventes	Interacción			Solubilidad del Solutos en el Solvente
		Solutos/Solutos	Solventes/Solventes	Solutos/Solventes	
No polar	No polar	Débil	Débil	Débil	Alta
No polar	Polar	Débil	Fuerte	Débil	Baja
Polar	No polar	Fuerte	Débil	Débil	Baja
Polar	Polar	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Alta

3.2. Disolvente para la recuperación de compuestos de hidrocarburos

De acuerdo con el principio que se muestra en la Tabla 14, utilizar el disolvente orgánico no polar para disolver compuestos de hidrocarburos no polares en lubricantes usados se considera un enfoque lógico y factible para la recuperación de hidrocarburos.

Sin embargo, dado que los HAP en lubricantes usados no son los compuestos objetivo para la recuperación en el estudio, los disolventes aromáticos no se han seleccionado para este proceso.

Los resultados experimentales han confirmado que el hexano (C_6H_{14}), como se ilustra en la Figura 9, es el disolvente más eficaz utilizado para la recuperación de hidrocarburos porque: Es inerte a la condición de disolución. Es relativamente económico. Lo más importante es que su punto de ebullición, 156,2 °F (69 °C), es relativamente bajo en comparación con otros disolventes no polares, por lo que se puede reciclar a una temperatura más baja. Se puede reciclar y reutilizar indefinidamente.

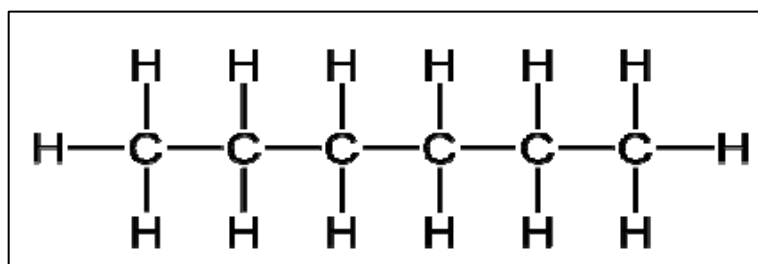


Fig. 9 Estructura molecular del hexano

3.3. Diseño de la tecnología

3.3.1. Tanques de sedimentación

Tabla 14 Composición del AU en los tanques de sedimentación

Componente	% peso/peso	Valor, kg
Agua	3,00	1.687,5
Hidrocarburos Ligeros	1,00	562,5
Aceite	72,00	40.500
Aditivos	20,00	11.250
Sedimentos	4,00	2.250
TOTAL	100,00	56.250

Tabla 15 Parámetros de los tanques sedimentadores

Parámetro	Variable	Valor
Velocidad terminal, m/s	V_T	$1,27 \cdot 10^{-3}$
Reynolds	Re	$6,95 \cdot 10^{-3}$
Parámetro para la selección del separador, m/s	Q/Σ	$2,54 \cdot 10^{-3}$
Presión manométrica, kg/cm^2	P_m	0,31
Presión absoluta, kg/cm^2	P	1,34

Tabla 16 Dimensiones de los tanques sedimentadores

Volumen, m^3	68,75
Altura, m	3,39
Diámetro, m	5,09
Tiempo de residencia, días	1
Espesor calculado, mm	0,52
Espesor recomendado, mm	4,76
Material	A283
Presión interna calculada, kg/cm^2	0,31
Presión interna máxima, kg/cm^2	1

Tabla 17 Masa de sedimentos separados en los tanques sedimentadores

Parámetro	Variable	Valor	unidad
Masa de sedimentos	$m_{\text{sedimentos}}$	12.515,68	kg

3.3.2. Evaporador flash

Tabla 18 Flujo volumétrico de alimentación

Corriente	Variable	Valor	Unidad
Alimentación	F	3,75	m^3/h

Tabla 19 Composición másica de la alimentación

Componente	Valor
H ₂ O	0,0313
n-C ₅ H ₁₂	0,0104
n-C ₂₀ H ₄₂	0,9583
Total	1,0000

Tabla 20 Flujos molares de la alimentación

Variable	Valor	Unidad
nC ₂₀ H ₄₂	11,47	kgmol/h
H ₂ O	5,86	kgmol/h
nC ₅ H ₁₂	0,49	kgmol/h
Total	17,786	kgmol/h

Tabla 21 Fracciones molares de la alimentación

Variable	Valor
nC ₂₀ H ₄₂	0.645
H ₂ O	0.329
nC ₅ H ₁₂	0.028
Total	1.000

Tabla 22 Peso molecular medio de las corrientes del evaporador flash

Corriente	Valor	Unidad
Alimentación	189,796	kg/kgmol
Destilado	38,951	kg/kgmol
Fondo	281,350	kg/kgmol

Tabla 23 Temperaturas en el tanque de evaporación flash

Temperatura	Valor	Unidad
Burbuja	83,00	°C
Rocío	290,60	°C
Operación	210,00	°C

Tabla 24 Simulación del evaporador flash

Corriente	Variable	Valor	Unidad
Alimentación	F	17,786	kgmol/h
Destilado	D	6,769	kgmol/h
Fondo	W	11,0713	kgmol/h

Tabla 25 Simulación de las corrientes del evaporador flash

Componente	Alimentación	Fondo	Destilado
	zi	xi	yi
H2O	0,3199	0	0,8659
n-C5H12	0,266	0	0,0697
*C20H42	0,6535	1	0,065
	1	1	1

Tabla 26 Simulación del calor entregado a la alimentación del evaporador flash

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Calor	Q	0,909*10 ⁵	kJ/kgmol

Tabla 27 Diseño de la cámara del evaporador flash

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Velocidad del vapor	μ_g	0,2209	m/s
Área transversal	Ac	0,4560	m ²
Diámetro	d	0,7620	m
Altura	h _{total}	3,1675	m

3.3.3. Diseño del Horno

Tabla 28 Resultado de la selección del horno

Parámetro	Valor	Unidad
Exceso de aire	15	%
Calor	1'616.747	kJ/h
Flujo másico de GLP	54,46	kg/h

3.3.4. Simulación de los intercambiadores de calor

Tabla 29 Resultados de la simulación del intercambiador E-302

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Consumo de energía	Q	400.850,7	kJ/h
Temperatura de aproximación	-	30	°C
Flujo de agua de enfriamiento	m _{H2O}	3.092,2	kg/h
LMTD	ΔT_{ml}	31,33	°C
Área de transferencia de calor	As	7,01	m ²
Diámetro de los tubos	dt	0,02	m
Diámetro de la coraza	dc	0,96	m
Longitud de los tubos	L	2,44	m
Número de pasos en la coraza	-	1	-
Número de pasos por los tubos	-	1	-
Número de tubos	-	48	-

Tabla 30 Resultados de la simulación del intercambiador E-411

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Consumo de energía	Q	266.777,76	kJ/h
Temperatura de salida de los solventes	T2	36,47	°C
Flujo másico de solvente	m _{solv}	8.392,2	kg/h
LMTD	ΔT_{ml}	3,95	°C
Área de transferencia de calor	As	49,99	m ²
Diámetro de los tubos	D	0,02	M
Longitud de los tubos	L	2,44	M
Numero de pasos en la coraza	-	2	-
Numero de pasos por los tubos	-	4	-
Numero de tubos	-	78	-

3.3.5. Simulación de la Torre de destilación

Tabla 31 Flujos molares de la alimentación a la torre de destilación

Variable	Valor	unidad
Metanol	83,14	kgmol/h
Butanol	37,60	kgmol/h
Xileno	27,40	kgmol/h
Aceite	8,37	kgmol/h
Total	156,52	kgmol/h

Tabla 32 Fracciones molares de la torre de destilación

Variable	Valor
Metanol	0.531
Butanol	0.240
Xileno	0.175
Aceite	0.053
Total	1.000

Tabla 33 Flujos molares del destilado de la torre de destilación

Variable	Valor	Unidad
Metanol	83,14	kgmol/h
Butanol	37,60	kgmol/h
Xileno	27,40	kgmol/h
Aceite	0	kgmol/h
Total	148,15	kgmol/h

Tabla 34 Fracciones molares del destilado de la torre de destilación

Variable	Valor	Unidad
Metanol	0,561	kgmol/h
Butanol	0,254	kgmol/h
Xileno	0,185	kgmol/h
Aceite	0,00	kgmol/h
Total	1,000	kgmol/h

Tabla 35 Flujos molares de los fondos de la torre de destilación

Variable	Valor	Unidad
Metanol	0	kgmol/h
Butanol	0	kgmol/h
Xileno	0	kgmol/h
Aceite	8,37	kgmol/h
Total	8,37	kgmol/h

Tabla 36 Fracciones molares de los fondos de la torre de destilación

Variable	Valor	Unidad
Metanol	0	kgmol/h
Butanol	0	kgmol/h
Xileno	0	kgmol/h
Aceite	1,00	kgmol/h
Total	1,00	kgmol/h

Tabla 37 Simulación del punto de burbuja del destilado a 49°C

Componente	Presión de vapor (Pvi), mmHg	Pvi*xi, mmHg	ki	xi*ki
Metanol	397,02	222,73	1,679	0,942
Butanol	31,01	7,877	0,131	0,033
Xileno	31,01	5,737	0,131	0,024
Aceite	0,0001	0	$3,58 \cdot 10^{-7}$	0
Total	---	236,43	---	1,000

Tabla 38 Simulación del punto de burbuja de los fondos a 360°C

Componente	Presión de vapor (Pvi), mmHg	Pvi*xi, mmHg	ki	xi*ki
Metanol	48.136,65	0	36,071	0
Butanol	12.366,96	0	9,267	0
Xileno	1.676,63	0	1,256	0
Aceite	1.333,30	1050,52	0,999	1,000
Total	---	1050,52	---	1,000

Tabla 39 Simulación del punto de burbuja de los fondos a 340°C

Componente	Presión de vapor (Pvi), mmHg	Pvi*xi, mmHg	ki	xi*ki
Metanol	223.459,66	0	314,805	0
Butanol	88.754,20	0,50	125,035	0
Xileno	23.613,98	1.333,9	33,267	0
Aceite	702,36	1.334,50	1,000	1,00
Total	---	710,00	---	1,000

Tabla 40 Simulación del punto de burbuja del destilado a 68,85°C

Componente	Presión de vapor (P _{vi}), mmHg	P _{vi} *x _i , mmHg	k _i	x _i *k _i
Metanol	894,97	502,08	1,657	0,930
Butanol	93,88	23,85	0,131	0,044
Xileno	75,12	13,90	0,139	0,026
Aceite	0,0011	0	2,02*10 ⁻⁶	0
Total	---	236,43	---	1,000

Tabla 41 Volatilidades relativas en el punto de burbuja del destilado

Componente	Volatilidad relativa, $\alpha_{D,i}$
Metanol	821.974,59
Butanol	86.224,72
Xileno	68.990,79
Aceite	1

Tabla 42 Volatilidades relativas en el punto de burbuja de los fondos

Componente	Volatilidad relativa, $\alpha_{D,i}$
Metanol	54,60
Butanol	14,62
Xileno	2,13
Aceite	1

Tabla 43 Volatilidad relativa promedio de la torre de destilación

Parámetro	Variable	Valor
Volatilidad relativa media	α_m	1.523,03

Tabla 44 Número mínimo de etapas de la torre de destilación

Parámetro	Variable	Valor
Número mínimo de platos	N _{min}	2,09

Tabla 45 Reflujo mínimo de la torre de destilación

Parámetro	Variable	Valor
Reflujo mínimo	R_{min}	$1,4 \cdot 10^{-3}$

Tabla 46 Número de etapas teóricas de la torre

Parámetro	Variable	Valor
Número de platos	N	10,87

Tabla 47 Número de etapas en la rectificación

Parámetro	Variable	Valor
Número de platos en la rectificación	N_R	7,59

Tabla 48 Número de etapas de agotamiento

Parámetro	Variable	Valor
Número de platos en el agotamiento	N_S	3,28

3.3.6. Tanques de clarificación

Tabla 49 Masa y volumen de bentonita requerida en los tanques

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Volumen de bentonita	$V_{bentonita}$	0,523	m^3
Masa de bentonita	$m_{bentonita}$	1.322,5	kg

Tabla 50 Densidad de la mezcla

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Densidad de la mezcla	ρ_{mezcla}	1.036,59	kg/m^3

Tabla 51 Dimensiones de los tanques agitados

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Volumen	V	6,40	m ³
Volumen del liquido	V _l	5,82	m ³
Diámetro del tanque	D	2,01	m
Altura	H	2,01	m
Diámetro del agitador	D _a	0,67	m
Grosor de los deflectores	j	0,168	m
Altura de las paletas	W	0,134	m
Largo de las paletas	L	0,1675	m
Altura del agitador	E	0,67	m

Tabla 52 Condiciones de operación

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Velocidad de giro	n	31,41	rpm
Reynolds	Re	90.224,27	-
Potencia	P	0,1164	kW

3.3.7. Separador centrífugo

Tabla 53 Parámetros del separador centrífugo

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Velocidad terminal de sedimentación	V _T	1,85*10 ⁻⁴	m/s
Reynolds	Re	1,78*10 ⁻³	-
Sigma	Σ	1,71	m ²

Tabla 54 Diseño del separador centrífugo

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Diámetro	D	0,36	m
Longitud del cilindro	L	1,44	m
Longitud del cono	h	0,03	m
Radio del cilindro	R	0,72	m
Radio del cono	r	0,36	m

Tabla 55 Velocidad de giro

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Velocidad de giro	n	6.105,2	rpm

Tabla 56 Tiempo de sedimentación para la partícula

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Tiempo de sedimentación	ts	8,4	s

Tabla 57 Tiempo de residencia del flujo

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Tiempo de residencia	t _{resid}	2,99	min

Tabla 58 Flujo de aceite base regenerado

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Flujo de aceite regenerado	V _{aceite}	41,485	m ³ /día

Tabla 59 Eficiencia del proceso de regeneración

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Eficiencia	Eff.	91,17	%

Tabla 60 Producción de aceite regenerado por año

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Producción anual	V _{aceite, anual}	2'762.013,2	gal/año

3.4. Simulación de Procesos

Algunos cálculos de diseño requieren conocimiento de las propiedades termodinámicas y los equilibrios de fases. En la práctica, el diseñador suele utilizar un paquete de software de simulación para obtener dichos datos. Sin embargo, el diseñador debe comprender las

bases de los métodos para las propiedades termodinámicas y los equilibrios de fases para poder seleccionar los mejores métodos y comprender plenamente sus limitaciones [29].

3.4.1. Ecuación de Estado de Peng-Robinson

El modelo Peng-Robinson (PR) es ideal para los cálculos de VLE para sistemas de hidrocarburos. Se realizaron varias mejoras al modelo PR original para ampliar su rango de aplicabilidad y mejorar sus predicciones para algunos sistemas no ideales. Sin embargo, en situaciones en las que se encuentran sistemas altamente no ideales, se recomienda el uso de modelos de actividad o ecuaciones de estado avanzadas, como CPA o PC-SAFT.

El paquete de propiedades PR resuelve rigurosamente cualquier sistema monofásico, bifásico o trifásico con un alto grado de eficiencia y confiabilidad, y es aplicable en una amplia gama de condiciones:

- Rango de temperatura > -271 °C o -456 °F
- Rango de presión $< 100\,000$ kPa o $15\,000$ psia

El paquete de propiedades PR también contiene parámetros de interacción binaria mejorados para todos los pares hidrocarburo-hidrocarburo de la biblioteca (una combinación de parámetros de interacción ajustados y generados), así como para la mayoría de los binarios hidrocarburo-no hidrocarburo, como N₂, CO₂, H₂S, H₂ y H₂O. Para los hipocomponentes que no son de la biblioteca o de hidrocarburos, HYSYS genera automáticamente los parámetros de interacción HC-HC para mejorar las predicciones de propiedades de VLE.

Para aplicaciones de petróleo, gas o petroquímicas, el paquete de propiedades PR EOS es el paquete de propiedades generalmente recomendado. El paquete de propiedades PR se puede utilizar para las siguientes simulaciones:

- ✓ Procesamiento de gas criogénico
- ✓ Separación de aire
- ✓ Torres de crudo en atmósfera
- ✓ Torres de vacío
- ✓ Sistemas con alto contenido de H₂
- ✓ Sistemas de yacimiento
- ✓ Inhibición de hidratos
- ✓ Sistemas de crudo
- ✓ Rechazo de nitrógeno y helio
- ✓ Inyección de metanol
- ✓ Eliminación de mercurio

- ✓ GOSP
- ✓ Fraccionamiento
- ✓ Procesos de GNL
- ✓ Separación de fracciones ligeras

PR también se puede utilizar para la deshidratación de TEG con o sin aromáticos; sin embargo, se prefiere el paquete de propiedades de glicol [30].

Formulaciones utilizadas en HYSYS para las ecuaciones de estado PR:

$$Z = \frac{V}{V - b} - \frac{aV}{RT(V^2 + 2bV - b^2)}$$

Definiendo que:

$$Z = \frac{PV}{RT}$$

$$a = 0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \alpha$$

$$b = 0,0778 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$\alpha = \left(1 + k(1 - \sqrt{T_R})\right)^2$$

$$k = 0,37464 + 1,54266 \omega - 0,26992 \omega^2$$

$$\omega = \left[-\log \left(\frac{P^{SAT}}{P_c} \right)_{T_R=0,7} \right] - 1$$

$$T_R = \frac{T}{T_c}$$

Siendo:

V= Volumen molar

T_C= Temperatura critica

P_C= Presión critica

ω= Factor acéntrico

R= Constante de los gases

T_R= Temperatura reducida

T= Temperatura absoluta

Las EDE como la ecuación de PR son más confiables para la predictibilidad de la compresibilidad de la fase vapor que la compresibilidad de la fase líquida.

En sistemas multicomponente, se requieren reglas de mezcla para precisar los valores de a y b:

$$b = \sum_i^{NC} x_i b_i$$

$$a = \sum_i^{NC} \sum_j^{NC} x_i x_j \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij})$$

Donde:

k_{ij} = Parámetro de interacción binaria definido por datos experimentales:

- ✓ Para hidrocarburos es cercano a cero.
- ✓ Para gases toma valores pequeños y constantes.
- ✓ Para mezclas polares toma valores elevados y depende de la temperatura.

3.4.2. Análisis para la simulación del proceso

La siguiente tabla muestra las consideraciones de diseño para los principales equipos del proceso. Para tener en cuenta las propiedades de los compuestos que no están registradas en la base de datos del simulador, como el aceite usado, se creó un pseudocomponente con propiedades reportadas en la literatura, como viscosidad y densidad.

El paquete de fluidos elegido para esta simulación es el paquete de fluidos Peng-Robinson descrito anteriormente.

En el entorno de simulación, los flujos se ajustan a las condiciones de operación y a los parámetros de presión y temperatura descritos de las bases y criterios de diseño.

Tabla 61 Asunciones en la simulación de procesos

Equipo	Consideraciones
Hornos	Para el calentamiento en el horno se considera el uso de combustible GLP con un 15% de exceso de aire y una eficiencia térmica de 0,6.
Torre de destilación flash	Puesto que para la vaporización de la mezcla de alimentación se eligió el calentamiento, se debe establecer la temperatura para lograr la separación de los componentes requeridas en este caso la temperatura elegida es de 210°C a 0,7 atm.
Intercambiadores de calor	En los intercambiadores de calor se utilizó como criterios de diseño, la temperatura de aproximación de (10-30) °C y los coeficientes globales de transferencia calor recomendados y expuestos en el capítulo de bases y criterios de diseño y anexos.
Tanques de agitación con vapor de calentamiento	En vista de que el software comercial no cuenta con este equipo se mezcló las corrientes en un mixer a la temperatura que requiere el proceso en esta etapa, con el fin de poder estimar las propiedades físicas de la mezcla y continuar con los cálculos posteriores.

Sedimentadores	El software no cuenta con un sistema de simulación para sólidos, por lo que en esta etapa en la salida del mixer se restó la proporción correspondiente a los aditivos de la corriente de aceite usado a la temperatura ambiente, debido a que este se encuentra en reposo por un día, lo que ocasiona que la mezcla se enfríe hasta la temperatura ambiente.
Torre de destilación fraccionada multicomponente	Para poder utilizar este equipo se debe establecer los parámetros tales como: el grado de separación de los componentes clave, presión de operación del condensador y del rehervidor además del reflujo mínimo y estado físico de la alimentación, los mismos que se estimaron con cálculos externos al software, de manera que se pueda ingresar dichos parámetros y obtener el prediseño de la torre.

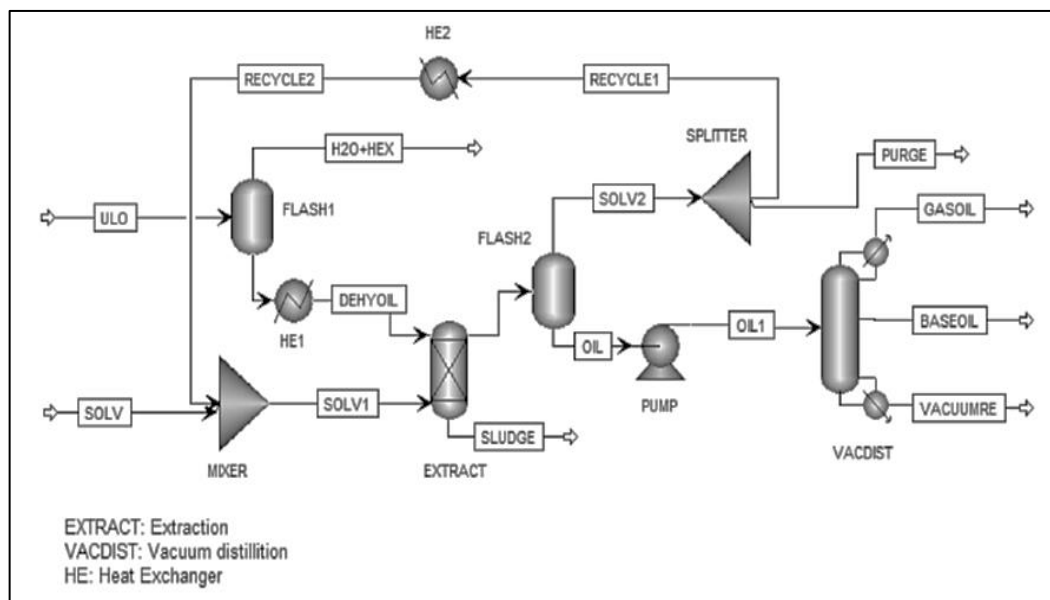


Fig. 10 PFD del proceso de simulación

IV. DISCUSIÓN

4.1. Tanques Agitadores

El diseño de los tanques de almacenamiento y distribución de materia prima se calculó de acuerdo a las recomendaciones de Ulrich (1992) para tanques con operación atmosférica, además se determinó el espesor mínimo recomendado de acuerdo a API 650, API 620, ANSI y AWWA que es estándar para presiones manométricas hasta 1kg/cm² donde se indica que para diámetros menores a 15.2 m el espesor utilizado debe ser de 4.76 mm, todos los tanques calculados tienen diámetros menores a los especificados por lo que el espesor utilizado es el indicado anteriormente.

Los tanques de sedimentación se midieron bajo el supuesto inicial de que la velocidad terminal de las partículas se encontraba dentro del rango de la ley de Stokes, la cual se utiliza para el cálculo del parámetro Q/Σ permitiendo la selección del equipo de sedimentación, el diseño adoptado en este estudio debido a que estas ecuaciones simplifican el cálculo al utilizar las propiedades físicas de la mezcla y no los datos experimentales.

El material utilizado para la mayoría de los equipos fue acero al carbono A283 (ASTM) grado C recomendado por Ulrich (1992), excepto que es el más utilizado en plantas industriales para el tratamiento de hidrocarburos. El espesor de este material en el dispositivo se calculó mediante las ecuaciones de Towler & Sinnott (2008), apoyado en las normas API 650 y API 620 con base en la presión de operación del dispositivo, que en el presente diseño es cercana a la presión atmosférica.

4.2. Separador flash

Para calcular las constantes de equilibrio, la composición de la mezcla se fijó a los componentes puros en el programa de simulación comercial como agua, hidrocarburos ligeros representados por pentano y aceite base con aditivos representados por el pseudocomponente de cadena de 20 carbonos, también se establecieron como propiedades representativas la densidad y la viscosidad.

La torre de destilación flash fue calibrada bajo el supuesto de que existió partición total de los hidrocarburos ligeros y agua presentes en la mezcla inicial, como lo demuestran diversos estudios experimentales encontrados en la literatura, dicha partición se logró a una temperatura de 210°C, la cual se encuentra en el rango recomendado en estudios realizados donde se estableció un rango de temperatura para esta parte del proceso de (150 – 260)°C.

A las temperaturas antes mencionadas se calculan las constantes de equilibrio que permiten calcular la composición de las corrientes ascendentes y descendentes requeridas. Las mediciones se calcularon con base en las ecuaciones establecidas en Wankat (1988), sustituyendo como parámetros más importantes el equilibrio y la fracción vaporizada de la mezcla.

Además de las relaciones recomendadas para las mediciones totales, también se utilizó la ecuación de Souders – Brown. demostrado por Ulrich (1992) para determinar el caudal máximo permisible de vapor en la cámara de destilación flash que en combinación con las ecuaciones de Wankat (2008) da una relación de $h_{total}/D= 4,2$; según los libros mencionados anteriormente, este valor debe estar entre 3 a 5.

4.3. Hornos

Para el cálculo del consumo energético se seleccionó al GLP como combustible debido a su poder calorífico superior y amplia aplicación en la industria. exceso de 15% de aire, lo que ayudó a estimar el consumo de combustible para el calentamiento de los procesos.

4.4. Intercambiador de calor

El diseño de los intercambiadores se realizó utilizando las ecuaciones para el cálculo de transferencia de calor de Cengel (2008) y asumiendo los coeficientes globales de transferencia disponibles en Perry (1999), Towler (2008) y Ulrich (1999), excepto por las temperaturas utilizadas del método. en el rango de (10 – 30) °C soportado por la Norma Británica BS 3274 y las normas TEMA. Por lo tanto, las carcasas calculadas no deberán exceder el diámetro indicado de 60 pulgadas.

4.5. Columna de Destilación Multicomponente

Para el cálculo de las constantes de equilibrio se utilizaron las ecuaciones establecidas por Gonzáles (1987) y para los parámetros relevantes se utilizaron los métodos abreviados de Henley y Seader (2000). Los resultados obtenidos con estos métodos se compararon con los resultados proporcionados por un simulador comercial; debido a que estos resultados fueron consistentes, permitió utilizar las propiedades simuladas en los cálculos para el balance energético y no realizar cálculos extensos que pudieran llevar a errores graves de cálculo.

4.6. Centrifuga Separadora

Al no contar con datos experimentales para la última parte del proceso, donde se separaba el lodo blanqueado, se utilizaron las propiedades físicas de la mezcla para calcular la velocidad de sedimentación y así calibrar el dispositivo con un caudal de proporcionar una operación continua en esta etapa, los resultados se comparan con dispositivos disponibles comercialmente para aceptar los resultados obtenidos.

V. CONCLUSIONES

- El trabajo realizado en este documento demuestra la ingeniería básica que permite ver la viabilidad del proyecto como una idea de negocio, representando no solo un atractivo económico sino también una opción para implementar la tecnología que sea amigable con el medio ambiente, de esta manera se podrán regenerar un total de 2,762,013.20 galones de aceite de motor al año, lo que sin un tratamiento de regeneración inevitablemente agravará los problemas ambientales que actualmente contaminan ríos, suelos y aire en nuestro país.
- La recuperación del volumen de aceite de motor reseñado en el párrafo anterior, cada año representa un aumento significativo en la recuperación de este residuo, alcanzando el 21% de la recuperación de este recurso en el país, ya que actualmente se estima que solo un 13% es renovable por otras vías, más costosas, insuficientes y dañinas para el medio ambiente.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio para calcular el margen de utilidad de entregar el producto terminado al mercado, es decir no el aceite base como materia prima sino, un aceite que contenga los aditivos requeridos y pueda ser vendido directamente a los distribuidores y al consumidor final, en vista de que en el mercado nacional se venden a precios muy superiores a los 10 USD el galón.
- Proponer un sistema de recuperación de calor a la salida de los gases de combustión, de esta manera se puede optimizar el consumo energético y los costos de operación de la planta, aumentando la rentabilidad del proceso.
- Realizar estudios económicos específicos sobre los ahorros que se generarían al no importar el producto final que se utiliza en el país, y los beneficios económicos, ambientales y sociales que traería si se implementara en la matriz productiva del país.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. D. Udonne, «A comparative study of recycling of used lubrication oils using distillation, acid and activated charcoal with clay methods,» *J. Petroleum Gas Eng.*, vol. 2, n° 12, p. 9, 2011.
- [2] L. G. M. Moura y et al., «Recovery of used lubricant oils through adsorption of residues on solid surfaces,» *Braz. J. Petroleum Gas*, n° 4, p. 91–102, 2010.
- [3] T. Mang y W. Dresel, *Lubricants and their Market*, Lubricants and Lubrication, 2007.
- [4] P. N. Josiah y S. S. Ikiensikimama, «Effect of desludging and adsorption ratios on recovery of low pour fuel oil (LPFO) from spent engine oil,» *Chem. Eng. Res. Bull.*, vol. 14, n° 25, p. 8, 2010.
- [5] A. N. Farhanah y M. Z. Bahak, «Engine oil wear resistance,» *J. Tribol.*, n° 4, p. 10–20, 2015.
- [6] N. A. Aljabiri, «A comparative study of recycling used lubricating oils using various methods,» *J. Sci. Eng.*, vol. 5, n° 168, p. 77, 2018.
- [7] D. I. Osman y et al., «Recycling of used engine oil by different solvent,» *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, n° 221, p. 5, 2018.
- [8] Y. L. Hsu y C. C. Liu, «Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology,» *Environ. Monit. Assess.*, n° 176, p. 197–212, 2011.
- [9] R. Shaikh y P. Mahanwar, «Reclamation of used engine oil using polymeric flocculants,» *Int. J. Chem. Sci.*, n° 16, p. 1–14, 2018.
- [10] M. M. Rahman y et al., «Effect of operating variables on regeneration of base-oil from waste oil by conventional acid-clay method,» *Chem. Eng. Res. Bull.*, p. 7, 2008.
- [11] E. A. Emam y A. M. Shoaib, «Re-refining of used lube oil , II- by solvent/clay and acid/clay-percolation processes ARPN,» *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 2, n° 1034, p. 41, 2012.
- [12] H. Singh, «Lubricants Technology – An Overview. Posted at:,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.scienceinAfrica.co.za/2002/november/lubes.htm>.

- [13] API, «Engine Oil Licensing and Certification System.» 2008. [En línea]. Available: <http://www.api.org/certifications/engineoil/pubs/upload/150916thAdd10308forprint-2.pdf>.
- [14] M. Schneider, «Plant-Oil-Based Lubricants and Hydraulic Fluids,» 2006. [En línea]. Available: <http://www3.interscience.wiley.com/journal/112736853/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>.
- [15] K. Randles y et al., «A Review of the Potential Human and Environmental Health Impacts of Synthetic Motor Oils,» *California Environmental Protection Agency*, 2007.
- [16] D. Kramer y et al., «The Evolution of Base Oil Technology Industry Focus,» *Machinery Lubrication Magazine*, 2003.
- [17] B. Bhushan, *Introduction to Tribology*, New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [18] M. LePera, «Synthetic Automotive Engine Oils – A brief History,» *Lubricants World Magazine*, 2000.
- [19] ASTM, «Contaminants in Used Oils and Their Behavior,» 2009. [En línea]. Available: http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/JAI/PAGES/1274.htm.
- [20] A. Sequeira, *Lubricant Base Oil and Wax Processing*, New York: Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [21] S. Zumdahl, *Chemistry*, Sixth ed., Boston, MA: Houghton Mifflin Company, 2003, pp. 1043-1097.
- [22] Optima Energy, «The Origin of Chemistry of Crude Oil,» 2009. [En línea]. Available: http://www.optimaenergygroup.com/content/abt_crude/about_crudeoil.html.
- [23] CEPA, «Waste Crankcase Oils,» *Act Priority Substances Kust Assessnebt Report*, 1994.
- [24] J. Guibet, *Fuels and Engines Technology*, Energy, Environment, vol. 1, Paris, France: Institut Francais du Petrole Publications, 1999, pp. 21-346.
- [25] R. Harvey, *Polycyclic Hydrocarbons and Carcinogenesis*, Washington. D.C.: American Chemical Society, 1985.

- [26] F. Audibert, Waste Engine Oils Re-refining and Energy Recovery, Amsterdam: Elsevier, 2006, pp. 10-11.
- [27] J. Burke, «Solubility Parameters: Theory and Application,» *The AIC Book and Paper Group Annual*, n° 3, pp. 13-58, 1984.
- [28] C. Reichardt, Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry, Third ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2003, pp. 5-139.
- [29] R. Smith, Chemical Process Design and Integration, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [30] Y. A. Cengel y M. A. Boles, Termodinámica, Sexta ed., México: The McGraw-Hill, 2009.
- [31] G. Ulrich, Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química, México: McGraw-Hill, 1992.
- [32] G. Towler y R. Sinnott, Chemical Engineering Desing. Principles, Practice and Economics of Plantand Precess Desing, San Diego: Elsevier, 2008.
- [33] P. C. Wankat, Equilibrium Staged Separations: Separations for Chemical Engineers, New Jersey: Prentice-Hall, 1988.
- [34] D. W. Perry, Perry's chemical engineers handbook, New York: McGraw-Hill, 2008.
- [35] J. D. Seader y E. J. Henley, Separation Process Principles, New York: Wiley, 2006.