



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**“ESTUDIO CUALITATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS PARA EL
RECICLAJE DEL ACEITE LUBRICANTE GASTADO, PARA PROPONER
UNA INDUSTRIA MÁS SOSTENIBLE CON BASE EN LOS PRINCIPIOS DE
LA QUÍMICA E INGENIERÍA VERDE”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

JOSÉ CARLOS SANTAMARÍA VÁZQUEZ

ASESORES: **M. en C. BERNARDO FRANCISCO TORRES**

Dr. JOEL OMAR MARTÍNEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: **VOTO APROBATORIO**

M. en C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Estudio cualitativo de las tecnologías para el reciclaje del aceite lubricante gastado, para proponer una industria más sostenible en base a los principios de la Química e Ingeniería Verde

Que presenta la pasante: José Carlos Santamaría Vázquez
Con número de cuenta: 408024440 para obtener el Título de: Ingeniero Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de enero de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Rene Miranda Ruvalcaba	
VOCAL	Dr. Adolfo Eduardo Obaya Valdivia	
SECRETARIO	M. en C. Bernardo Francisco Torres	
1er. SUPLENTE	Dra. Yolanda Marina Vargas Rodríguez	
2do. SUPLENTE	Dr. Gabriel Arturo Arroyo Razo	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HMI/iac

Dedicatoria

Sin duda alguna este largo camino no hubiese podido ser concluido sin el gran amor de una sola persona, la cual me ha enseñado como caminar sobre la tierra y sobresalir en ella. Que día a día lucha por mi bienestar y que ante todo siempre he sido su prioridad, porque las palabras lo hacen ver sencillo, pero solo pocas personas conocen de la complejidad que conlleva y una de esas eres tú. Gracias Mamá, siempre te llevo en mi mente y corazón.

Agradecimientos

A la UNAM en su Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por permitirme ser parte de su comunidad y enriquecerme con las cátedras impartidas por cada uno de los profesores que encontré en el transcurso de la carrera y que forman parte de esta gran universidad. Sin el apoyo de todos ellos no existiría la pasión de un Ingeniero Químico.

Agradezco a ti por haber llegado a mi camino y haber transformado mi entorno en alegría, por ser tan única, especial y divertida, por compartir días buenos y malos, por aprender como amar y saber escuchar. Si bien encontramos en la química nuestra pasión, pues fue la sustancia química la que nos unió. Gracias JessMae.

Agradeceré hoy y siempre a mis asesores Joel Omar y Bernardo Francisco, por haberme guiado en el desarrollo de esta tesis y haber despertado en mí un gran interés por la química verde. Porque tuve la oportunidad de haber concluido esta etapa de mi vida por diferentes caminos, pero esta fue la única que causo una atracción en mí. Y fue gracias a ti JessMae, el conocer tan grandes personas que me apoyaron de principio a fin. Les agradezco infinitamente.

Agradezco a todos y a cada uno de mis compañeros con los que compartí el salón de clases, pues de todos aprendí y en los momentos difíciles nunca paramos de reír. En cada uno de mis amigos encontré una inspiración, pues sus deseos de triunfar y seguir adelante es algo que pocas personas poseen, pero ustedes lo hicieron ver tan simple que les agradezco el poder haber sido su amigo. Que gratos momentos viví a su lado: Marlene, Andrea, Jorge, Ulises, Julio, Enrique, Raúl, Manuel, Jesús, Octavio, Kevin, Víctor, Carlos, Gustavo, Ángel y Ramsés. Gracias por su amistad.

"El tiempo pasa sin notar que envejecemos, el ser humano mide el tiempo y cuenta los días, estableciendo cotidianamente un pasado y un futuro. Pero es en el presente, donde ambos eventos se encuentran simultáneamente y es en este instante donde el ser humano zarpó o naufragó."

José Carlos Santamaría

INDICE GENERAL	
OBJETIVOS	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO I. ACEITE LUBRICANTE DE MOTOR	10
1.1 Generalidades	10
1.2 Definición de aceite lubricante	10
1.2.1 Tipos de aceites lubricantes	10
1.2.2 Clasificación de aceites lubricantes de acuerdo a su base	11
1.2.3 Clasificación de aceites lubricantes de acuerdo a su viscosidad	12
1.2.4 Clasificación de aceites lubricantes de acuerdo al servicio	14
1.2.5 Aditivos en los aceites lubricantes, función y clasificación.	15
1.3 Propiedades de los aceites lubricantes	23
1.4 Fuente de producción de aceite lubricante en una refinería	29
CAPÍTULO II. REUTILIZACIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE	42
2.1 Generalidades	42
2.2.1 Composición química de los aceites lubricantes usados	43
2.2.2 Reacciones de los aceites lubricantes	47
2.2.3 Impacto sobre el ambiente	49
2.2.4 Efectos sobre la salud humana	50
2.2.5 Reutilización del aceite de motor	52
2.3 Principales países reutilizadores del aceite de motor	53
2.4 Especificaciones a cumplir en el re-refinamiento del aceite lubricante	55
2.5 Aceites lubricantes usados en México	56
CAPÍTULO III. MERCADO	59
3.1 Generalidades	59
3.2 Mercado nacional	59
3.3 Mercado Internacional	63
3.4 Aceites lubricantes regenerados	66
CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE RE-REFINAMIENTO	71
4.1 Generalidades	71
4.2 Tecnologías de reprocesamiento	71
4.3 Tecnologías de re-refinamiento	72
4.4 Proceso de la tecnología ácido-arcilla	73

4.5 Proceso de la tecnología PROP	77
4.6 Proceso de la tecnología KTI	82
4.7 Proceso de la tecnología BERC.....	85
4.8 Proceso de la Resource Technology.....	88
4.9 Proceso de filtración, destilación-arcilla	90
4.10 Proceso de la tecnología Recyclon	93
4.11 Chemical Engineering Partners (CEP), proceso de la tecnología Mohawk	95
4.12 Proceso de la tecnología Revivoil	101
4.13 Proceso de la tecnología Sotulub.....	108
CAPÍTULO V. PROPUESTA DE INGENIERÍA.....	115
5.1 Generalidades	115
5.2 Comparación de las tecnologías de re-refinamiento.....	115
5.3 Interpretación de resultados de los procesos de re-refinamiento.....	118
5.4 Bases de diseño.....	121
5.5 Otros	133
CAPÍTULO VI. PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE RE-REFINAMIENTO	139
6.1 Generalidades	139
6.2 Química verde.....	139
6.3 Propuesta de una Industria más sostenible con base en los principios de la Química verde	142
6.4 Ingeniería verde	153
6.5 Propuesta de una Industria más sostenible con base en los principios de la Ingeniería verde	156
Conclusiones.....	164
Apéndice A. Propiedades de los hidrocarburos.....	166
Apéndice B. Normas de referencia, datos de recolección de aceites lubricantes usados e identificación de residuos peligrosos	167
Apéndice C. Importaciones y exportaciones	170
Abreviaturas	172
Referencias	173

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1.1 Diagrama de bloques general del procesamiento de aceites lubricantes.	31
Figura 1.2 Unidad desasfaltadora.	33
Figura 1.3 Unidad desaromatizadora.	35
Figura 1.4 Unidad hidrosulfuradora.	38
Figura 1.5 Unidad desparafinadora.	39
Figura 1.6 Unidad de tierras o arcillas.	41
Figura 2.1 Reacciones de hidrocarburos parafínicos y nafténicos.	49
Figura 2.2 Comparación de aceite lubricante usado.	54
Figura 2.3 Tipos de residuos peligrosos.	58
Figura 4.1a. Diagrama de proceso de la tecnología Ácido-Arcilla.	74
Figura 4.1b. Diagrama de proceso de la tecnología Ácido-Arcilla.	75
Figura 4.2a. Diagrama de proceso de la tecnología PROP, sección de desmetalización.	78
Figura 4.2b. Diagrama de proceso de la tecnología PROP, sección de hidrotatamiento.	80
Figura 4.3. Diagrama de proceso de la tecnología KTI.	83
Figura 4.4. Diagrama de proceso de la tecnología BERC.	86
Figura 4.5. Diagrama de proceso de la Resource Technology.	89
Figura 4.6. Diagrama de proceso de filtración, destilación-arcilla.	92
Figura 4.7. Diagrama de proceso de la tecnología Recyclon.	94
Figura 4.8. Diagrama de proceso de la tecnología Mohawk.	96
Figura 4.9. Diagrama de proceso mejorado de la tecnología Mohawk.	98
Figura 4.10a. Diagrama de proceso de la tecnología Revivoil.	103
Figura 4.10b. Diagrama de proceso de la tecnología Revivoil.	104
Figura 4.10c. Diagrama de proceso de la tecnología Revivoil, sección de desasfaltado.	105
Figura 4.10d. Tres etapas de desasfaltado, sección de extracción líquido-líquido.	106
Figura 4.11. Diagrama de proceso de la tecnología Sotulub.	109
Figura 6.1. Contenido de asfalteno % peso contra condensado estabilizado a diferentes relaciones disolvente-aceite.	145
Figura 6.2. Residuo de carbón % peso contra condensado estabilizado a diferentes relaciones disolvente-aceite.	145

Figura 6.3. Contenido de cenizas % peso contra condensado estabilizado a diferentes relaciones disolvente-aceite.	146
Figura 6.4. Diagrama de proceso señalizando modificaciones a la tecnología Mohawk	152
Figura 6.5. Diagrama de proceso señalizando modificaciones a la tecnología Mohawk	163
Gráfico 3.1. Comportamiento del aceite lubricante.	61
Gráfico 3.2. Perfil del mercado nacional.	62
Gráfico 3.3. Importación de aceites lubricantes.	64
Gráfico 3.4. Exportación de aceites lubricantes.	65
Gráfico 3.5. Comportamiento del aceite lubricante regenerado.	68
Gráfico 3.6. Proyección en miles de litros de aceite regenerado.	69
Gráfico 5.1. Comportamiento del reactor DC-101.	134
Gráfico 5.2. Comportamiento del reactor DC-102.	134
Gráfico 5.3. Comportamiento del reactor DC-103.	135
Gráfico 5.4. Costos requeridos para varias capacidades de planta, usando la tecnología CEP.	136
Gráfico 5.5. Re-refinería Grassroots 40,000 T anuales, tasa interna de retorno contra precios de la base del aceite.	137
Gráfico 5.6. Re-refinería Grassroots 165,000 T anuales, tasa interna de retorno contra precios de la base del aceite.	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Viscosidad del aceite lubricante de acuerdo al grado SAE.	13
Tabla 1.2. Aceites para motor a gasolina.	14
Tabla 1.3. Aceites para motores a diesel.	15
Tabla 2.1. Datos analíticos de muestras de aceite lubricante usado, recolectadas en los años 2000 y 2011.	44
Tabla 2.2. Concentraciones máximas de componentes en los lubricantes usados.	44
Tabla 2.3. Concentración de metales pesados, y halógenos en aceites usados como combustible en 1980 y 1990 en los Estados Unidos.	45
Tabla 2.4. Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT.	47
Tabla 2.5. Producción de aceite lubricante, recolección y pérdidas.	54
Tabla 2.6. Especificaciones del aceite base renovable.	55
Tabla 3.1. Volumen y valor de producción de aceite lubricante de motor automotriz.	60
Tabla 3.2. Volumen y valor de producción de aceite lubricante para diesel.	60
Tabla 3.3. Volumen y valor de producción de aceite lubricante de uso industrial.	60
Tabla 3.4. Volumen y valor de producción de los aceites lubricantes.	61
Tabla 3.5. Datos referentes para la realización del gráfico 3.2.	62
Tabla 3.6. Cantidades de aceites lubricantes importados terminados.	63
Tabla 3.7. Cantidades de aceites lubricantes exportados terminados.	63
Tabla 3.8. Producción y ventas netas año 1999.	67
Tabla 3.9. Producción y ventas netas año 2004.	67
Tabla 3.10. Aceites lubricantes utilizados anualmente.	69
Tabla 3.11. Aceites lubricantes sin regenerar anualmente.	70
Tabla 4.1. Efecto del reprocesamiento sobre las propiedades del aceite usado, % volumen.	72
Tabla 4.2. Análisis de la base del aceite PROP.	82
Tabla 4.3. Análisis de la base del aceite KTI.	85
Tabla 4.4. Análisis de las diferentes bases del aceite Recyclon.	95
Tabla 4.5. Análisis de la base del aceite CEP-Mohawk.	101
Tabla 4.6. Análisis de las diferentes bases del aceite Revivoil.	108
Tabla 4.7. Análisis de las diferentes bases del aceite Sotulub.	111
Tabla 4.8. Comparación de las propiedades del aceite virgen y re-refinado.	111
Tabla 4.9. Resumen de las tecnologías de re-refinamiento.	114
Tabla 5.1. Aspectos de selección del proceso de la tecnología.	116

Tabla 5.2. Escala de calificación de atributos.	116
Tabla 5.3. Criterios para definir la calificación en cada aspecto.	117
Tabla 5.4. Comparación de las tecnologías de reciclaje.	118
Tabla 5.5. Análisis de la base del aceite.	120
Tabla 5.6. Características de la corriente de alimentación.	123
Tabla 5.7. Composiciones del hidrógeno de planta.	124
Tabla 5.8. Características del producto.	125
Tabla 5.9. Especificaciones de los subproductos.	126
Tabla 5.10. Especificaciones de los agentes químicos y catalizadores.	126
Tabla 5.11. Condiciones del vapor.	127
Tabla 5.12. Condiciones de condensado de vapor.	127
Tabla 5.13. Condiciones de agua de enfriamiento.	127
Tabla 5.14. Parámetros del agua de enfriamiento.	128
Tabla 5.15. Condiciones de agua de servicios.	129
Tabla 5.16. Condiciones de agua potable.	129
Tabla 5.17. Condiciones de agua contra incendio.	130
Tabla 5.18. Condiciones de aire de instrumentos.	130
Tabla 5.19. Condiciones de aire de planta.	131
Tabla 5.20. Características eléctricas.	131
Tabla 5.21. Características eléctricas de iluminación e instrumentos.	132
Tabla 5.22. Condiciones de temperatura ambiente.	132
Tabla 5.23. Condiciones de humedad relativa.	132
Tabla 5.24. Condiciones de precipitación pluvial.	133
Tabla 6.1. Propiedades físicas del disolvente.	144
Tabla 6.2. Propiedades físicas del agente desémulsificante.	147
Tabla 6.3 Resúmen de los servicios auxiliares de las tecnologías.	147
Tabla 6.4. Clasificación API de la base del aceite.	148
Tabla 6.5. Contenido energético del combustible biodiesel.	161
Tabla 6.6. Comparación de las especificaciones de los combustibles fósiles y renovables.	161

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Llevar a cabo la selección de una tecnología de proceso para la regeneración de aceites lubricantes usados, mediante una comparación cualitativa entre tecnologías existentes en el mercado, para poder suministrar las bases de ingeniería, de esta forma contribuir al cuidado, tanto del ambiente como del ser humano, mediante la propuesta de una tecnología más verde.

Objetivos particulares:

- Comprender la importancia del reciclado de los aceites lubricantes de motor, con base a los beneficios que conlleva su regeneración, para minimizar la contaminación del medio ambiente.
- Proponer modificaciones a la tecnología seleccionada de re-refinado de aceites, a través de los principios de la química e ingeniería verde, para llevar a cabo el re-refinado de los aceites lubricantes.
- Comprobar la necesidad de regeneración de aceites lubricantes usados, a partir de un estudio de mercado, para poder proponer una solución de re-refinamiento.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el medio ambiente se encuentra en desequilibrio debido a la alta explotación de los recursos naturales, esta gran demanda es debida principalmente a la gran explosión demográfica lo cual acelera el consumo. Al respecto, el agotamiento acelerado de hidrocarburos se ha visto afectado y seguirá en aumento si no se establecen programas de estudio sobre métodos y procesos para recuperar productos usados. La regeneración de aceites lubricantes es de gran importancia, debido a que volúmenes grandes de aceite lubricante, principalmente de motor, son generados cada año por los automóviles, camiones, motocicletas, botes, cortadoras de césped, entre otros.¹ Al final, después de cualesquiera que sea su uso, estos aceites son considerados como un desecho peligroso, debido al gran contenido de contaminantes como: los hidrocarburos aromáticos policíclicos (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), bifenilos policlorados (polychlorinated biphenyls, PCBs) y usualmente (azufre, bromo, plomo, arsénico, etc.).

En algunos casos el aceite de motor es utilizado como combustible en hornos de fundición o en plantas generadoras de electricidad; sin embargo, los productos de la combustión aparecen y participan como fuertes contaminantes de la atmósfera, además de que generan emisiones gaseosas altamente tóxicas. Debido a esto, las exigencias en el aspecto ambiental cada vez son más rigurosas, por lo que el uso del aceite lubricante en estos procesos se vuelve inadecuado.²

También, el aceite usado contiene una gran proporción de componentes valiosos (base del aceite), los cuales lo vuelven apto para poder volver a ser usado o para formular nuevos lubricantes.³ Así, el re-refinamiento de los aceites lubricantes permite recuperar la base del aceite, con lo que se estaría generando lubricante limpio sin tener que procesar un barril de crudo de 159 litros, donde la base del aceite representa solamente 1.9 litros.⁴ De esta manera, actualmente, la regeneración de aceites lubricantes usados es de gran importancia, debido a que el aceite regenerado puede ser empleado no solo una vez, sino varias veces como aceite automotriz, sin disminuir su calidad.^{3,4}

Por otro lado, indudablemente la Química ha generado beneficios muy importantes; en lo general, es difícil no encontrar en la vida el realce de la Industria Química. Sin embargo, “la Química” ha recorrido un camino complejo que la ha llevado a ser vista

como una de las responsables de contaminar el planeta; como consecuencia de lo anterior, ha surgido un nuevo enfoque de la Química que tiene por objetivo prevenir o minimizar el daño al ambiente, tanto a escala industrial como en los laboratorios de la academia. Esta nueva filosofía se conoce como Química Verde.^{5,6}

Además, la Ingeniería Verde al igual que la Química Verde surge con el propósito de disminuir los impactos negativos al ambiente ocasionados por el ser humano; en donde, la Ingeniería Verde se concentra en cómo lograr la sostenibilidad a través de la ciencia y la tecnología, haciendo más amigables los procesos con el medio ambiente.^{7,8} De esta manera, provee a científicos e ingenieros de un marco en el que se diseñen nuevos materiales, productos, procesos y sistemas que son favorables tanto para la salud humana como el ambiente.⁷

Debido a lo anterior, el presente trabajo va encaminado a conocer las diferentes tecnologías disponibles para realizar el re-refinamiento del aceite lubricante usado (principalmente de motor), para poder escoger una tecnología que más se adecue en el re-refinamiento “Verde”, para así, poder evaluar la metodología para determinar que tan verde es el proceso, con fundamento en los doce principios de la Química e Ingeniería Verde. Con el propósito de implementar una industria más sostenible en la obtención de aceites lubricantes, además de disminuir las importaciones de aceites lubricantes básicos en México, la contaminación ambiental, el agotamiento acelerado de los hidrocarburos, y satisfacer por una parte la creciente demanda actual de aceite lubricante.

CAPÍTULO I. ACEITE LUBRICANTE DE MOTOR

1.1 Generalidades

En éste capítulo se da a conocer la importancia del aceite lubricante de motor y del proceso de obtención en una refinería. Además, se describen conceptos, términos, tipos, clasificaciones y las características que deben de poseer los aceites lubricantes, para poder ser considerados como un producto terminado.

1.2 Definición de aceite lubricante

El aceite lubricante es un producto del petróleo o de la destilación primaria de éste, se caracteriza principalmente por ser un líquido viscoso, que tiene como función fundamental la separación de dos superficies sólidas en contacto, formando entre estas una película, reduciendo la fricción, desgaste, herrumbre, corrosión, calentamiento (disipación de temperatura) y arrastre de contaminantes, asegurando el buen funcionamiento del motor.⁹

1.2.1 Tipos de aceites lubricantes

➤ **Lubricantes líquidos.**

Son aquellos que permanecen en el estado líquido. Son muy utilizados debido a la facilidad de su empleo, por su capacidad de eliminar el calor desarrollado por el rozamiento y por su bajo costo de producción en comparación con otros lubricantes. Estos lubricantes se subdividen en los siguientes:

- **Lubricantes minerales o petrolíferos.**

Estos aceites lubricantes son los que se obtienen por medio de técnicas modernas de refinación. Provenientes de una gran variedad de crudos que varían de acuerdo a su base química (parafínicos, nafténicos o mixtos). Sus propiedades físicas dependen de la distribución relativa de los componentes parafínicos, aromáticos y alicíclicos (generalmente nafténicos).

- Lubricantes sintéticos.

Son aquellos que se obtienen haciendo reaccionar monóxido de carbono, a través del gas de síntesis. Este proceso lleva el nombre de Fischer-Tropsch, en el cual se producen una serie de hidrocarburos de acuerdo a la fórmula C_nH_{2n+2} que se obtienen por medio de una serie de reacciones químicas. Los hidrocarburos más utilizados son los polímeros de etileno, propileno, butileno y en ocasiones miembros más altos de la serie de masa molecular comprendida entre 250 y 50,000 g/mol. Otros lubricantes sintéticos son: polialfaolefina, polialquilen glicol, silicón, poliéster, etc.

- Lubricantes sólidos.

Son grasas o aceites espesados con un agente solidificante, por ejemplo el jabón. Al ser sólidos permanecen en el lugar de aplicación por largos periodos; se necesitan en menor cantidad para el mantenimiento del equipo, ya que solo se aplican en la superficie en contacto. Generalmente usados en aplicaciones con desplazamiento lento: cojinetes de rodillos en motores eléctricos, cojinetes de las llantas de los automóviles, accesorios de aviones y herramientas de maquinaria. Ejemplos de éstos son el disulfuro de molibdeno, grafito, trióxido de amonio, bismuto metálico, etc.

- Lubricantes gaseosos.

El más usado es el aire, aplicado en equipos que operen a altas velocidades y bajas cargas o a bajas velocidades y altas cargas.^{4,9}

1.2.2 Clasificación de aceites lubricantes de acuerdo a su base

- Aceites lubricantes de base parafínica.

Están constituidos en su mayoría por hidrocarburos de cadena abierta y saturada, poseen índices de viscosidad altos, tienen temperaturas de ignición y de inflamación altas (ver apéndice A, Tabla A1 y A2). Son apropiados para trabajar en motores de combustión interna, ya que no se espesan tanto a bajas temperaturas, ideales para motores que efectúan un arranque en frío.

Los hidrocarburos parafínicos con cuatro o menos átomos de carbono son gaseosos a temperatura ambiente, los que poseen entre cinco y quince átomos de carbono son

líquidos y por arriba de dieciséis átomos de carbono son sólidos con apariencia cerosa y constituyen el componente principal de las llamadas parafinas sólidas del petróleo.

Los hidrocarburos parafínicos lineales poseen excelentes propiedades de combustión y elevado índice de cetano, por lo que se les prefiere en la elaboración de gasóleo, queroseno y combustóleo. Las isoparafinas presentan altos índices de octano y son preferidas en las gasolinas especialmente las de aviación.

➤ Aceites lubricantes de base nafténica

Poseen un alto porcentaje de moléculas de hidrocarburos de cadena cerrada, tienen índices de viscosidad bajos, sus temperaturas de ignición y de inflamación son bajas. (ver apéndice A, Tabla A1 y A2). Los naftenos son compuestos cíclicos o en anillos, por lo que solo pueden reaccionar por remplazo del hidrógeno con otro elemento. En las fracciones pesadas para componentes lubricantes son preferidos para ciertas aplicaciones concretas, debido a sus bajos puntos de congelación.⁹

➤ Aceites lubricantes de base aromática

Procedente de crudos asfálticos, tienen un bajo índice de viscosidad (ver apéndice A, Tabla A1), usualmente no se emplean en aceites para motores, sino para transmisión, caja de velocidad, etc. Los hidrocarburos aromáticos son muy susceptibles a la oxidación con formación de ácidos orgánicos. Esta serie aromática es muy activa y se denomina como la serie del benceno.¹⁰

1.2.3 Clasificación de aceites lubricantes de acuerdo a su viscosidad

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers, SAE) ha clasificado a los aceites lubricantes de acuerdo a lo siguiente:¹¹

Aceites de invierno: Empleados a bajas condiciones de temperatura ambiental de trabajo. Caracterizados con la letra “W” de Winter en inglés, Tabla 1.1.

Aceites de verano: Son utilizados en climas cálidos, Tabla 1.1.

Aceites monogrado: Estos aceites tienen la característica de que solo cumplen con un solo grado SAE, puede ser un grado de verano o bien de invierno, por ejemplo: SAE30, SAE40, SAE60, entre otros.

Aceites multigrado: Tienen la particularidad de garantizar una viscosidad baja durante el funcionamiento del motor en invierno y una viscosidad adecuada para operar cuando el motor se haya calentado.¹¹ Ejemplo: 10W40, 5W50, 5W40, etc. Por lo que el primer número nos indica la viscosidad en frío y el segundo número la viscosidad en caliente.

Tabla 1.1 Viscosidad del aceite lubricante de acuerdo al grado SAE.

Grado SAE	Viscosidad Cinemática a 100°C (10 ⁻⁶ m ² /s)
0W	3,8
5W	3,8
10W	4,1
15W	5,6
20W	5,6
25W	9,3
20	5,6 - 9,3
30	9,3 - 12,5
40	12,5 - 16,3
50	16,3 - 21,9
60	21,9 - 26,1

Al respecto, un aceite SAE 10W50, indica la viscosidad del aceite medida a -18° y a 100° C, indicando que el aceite se comporta en frío como un SAE 10 y en caliente como un SAE 50. En este sentido, para una mayor protección en frío, se deberá recurrir a un aceite que tenga el primer número lo más bajo posible y para obtener un mayor grado de protección en caliente, se deberá incorporar un aceite que posea un segundo número elevado.

1.2.4 Clasificación de aceites lubricantes de acuerdo al servicio

El Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute, API) clasifica a los aceites lubricantes en dos grandes grupos: aceites para motores a gasolina, Tabla 1.2 y aceites para motores a diesel, Tabla 1.3.³

Tabla 1.2 Aceites para motor a gasolina.

SA	Aceites minerales puros sin ningún tipo de aditivo. Recomendados para motores desgastados que queman gran cantidad de aceite
SB	Aceites con mínimo control al desgaste para vehículos fabricados antes de 1963.
SC	Aceites que controlan depósitos, desgaste, corrosión y herrumbre, para vehículos fabricados antes de 1967.
SD	Aceites con características SC mejoradas, para vehículos fabricados antes de 1971.
SE	Aceites con características SD mejoradas y particular control de oxidación y depósitos, con capacidad de drenado prolongado. Indicado para vehículos fabricados antes de 1979.
SF	Aceites con características SE mejoradas y particular control de oxidación, desgaste y depósitos, con capacidad de drenado prolongado.
SG	Aceites con características SF mejoradas y particular control de lodos, depósitos y economía de combustible. Recomendado para vehículos fabricados antes de 1994.
SH	Aceites con características SG mejoradas gracias a criterios más estrictos de clasificación. Para vehículos a partir de 1994.
SJ	Mejor control de la formación de depósitos, mejor fluidez a bajas temperaturas, mayor protección del motor a alto número de vueltas, menor consumo de combustible.
SL	Desarrollada para aceites con economía de combustibles, provee superior resistencia antioxidante a las altas temperaturas y al desgaste.

Tabla 1.3 Aceites para motores a diesel.

CA	Aceites para tipo de servicio liviano con combustible de alta calidad. Recomendados en las décadas de los 40 y 50.
CB	Aceites para tipo de servicio liviano/moderado y uso de combustible de baja calidad. Introducidos en el mercado en 1949.
CC	Aceites para tipo de servicio moderado a severo. Introducidos en 1961.
CD	Aceites indicados para controlar desgaste y depósitos, y cuando se use combustible con alto contenido de azufre. Introducidos en 1965.
CDII	Servicio típico para motores diesel de dos tiempos cuando se requiere controlar desgaste y depósitos.
CE	Aceites para servicio de baja velocidad alta carga y alta velocidad alta carga. Recomendados para ciertos motores diesel turbocargados o sobre alimentados fabricados desde 1983.
CF-4	Servicio típico para motores de cuatro tiempos de alta velocidad. Excede los requerimientos del API CE, particularmente en lo referente a consumo de aceite y formación de depósitos en el pistón. Recomendados para motores fabricados a partir de 1990.
CG-4	Vigente desde 1995, tuvo su origen en las regulaciones impuestas por la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA). Su fin es relacionar la calidad del lubricante/combustible con el nivel de emisiones a la atmósfera.
CH-4	Diseñada para superar las limitaciones de normas de emisión para motores de alta velocidad. Estos aceites están preparados para ser utilizados con carburantes diesel con un contenido de azufre no superior a 0.5%.

1.2.5 Aditivos en los aceites lubricantes, función y clasificación.

Un aditivo es todo compuesto químico destinado a mejorar las propiedades naturales de un lubricante, agregando otras que no posee y que son necesarias para cumplir sus funciones. Generalmente los aditivos se incorporan en los aceites lubricantes en muy diversas proporciones, desde partes por millón hasta un 15 al 20 % en masa de algunos aceites de motor, dependiendo de las características requeridas para el uso final.

Las funciones fundamentales de los aditivos son:

- Limitar el deterioro del lubricante a causa de fenómenos químicos ocasionados por razón de su entorno o actividad.
- Proteger la superficie lubricada de ciertos contaminantes.
- Mejorar las propiedades físico-químicas del lubricante o proporcionarle otras nuevas.

La clasificación de los aditivos se realiza considerando las propiedades sobre las que actúa, es decir si mejora las propiedades físicas, químicas o fisicoquímicas del aceite lubricante.¹²

Aditivos que mejoran las propiedades físicas.

- Mejorador del índice de viscosidad: Estos aditivos tienen como función un espesamiento general del aceite más pronunciado a temperaturas elevadas y un menor espesamiento a temperaturas bajas. Estos aditivos no modifican las propiedades intrínsecas del aceite, tales como la estabilidad térmica y química.

Por lo que los mejoradores del índice de viscosidad son productos químicos que se agregan a los aceites con la finalidad de obtener un producto cercano al aceite ideal, es decir un aceite el cual permanezca inalterable durante los cambios de temperatura.

La teoría más aceptable del mejoramiento del índice de viscosidad, explica que estos polímeros, a bajas temperaturas se comportan como una suspensión coloidal, siendo muy baja su solubilidad en el aceite. Se considera que estas moléculas de gran tamaño se enroscan y con ello permiten muy poco aumento en la solubilidad y, cuando se desenroscan aumenta la viscosidad del aceite.^{10,12}

Los mejoradores del índice de viscosidad son polímeros de los siguientes tipos:

- Poliisobutenos
- Copolímeros de alquil metacrilato
- Copolímeros de alquil acrilato
- Copolímeros de vinil acetato-alquil fumaratos
- Poliestireno alquilatado

Los polímeros más utilizados son los poliisobutenos y los copolímeros de alquil metacrilato. Los poliisobutenos se obtienen mediante la polimerización del isobuteno a bajas temperaturas en presencia del catalizador de Friedel-Crafts.

- Depresores del punto de congelación: Los depresores del punto de congelación son productos químicos que modifican el proceso de cristalización de la parafina, de tal modo que el aceite puede escurrir o fluir a bajas temperaturas.

Sin los depresores del punto de congelación el aceite proveniente de crudos parafínicos, sometido a bajas temperaturas, experimentaría un cambio en su estado físico, una congelación total. Esto es debido al alineamiento natural de los hidrocarburos que componen el aceite, provocando la cristalización a bajas temperaturas de la parafina presente en las fracciones de estos tipos de aceites. Al ocurrir la cristalización, la parafina tiende a formar redes internas que absorben aceite formando masas gelatinosas de gran volumen, las cuales restringen el flujo o escurrimiento del mismo.¹²

Las sustancias depresoras del punto de congelación son los siguientes polímeros:

- Polímeros y copolímeros de alquil metacrilato
- Poliacrilamidas
- Copolímeros de vinil carboxilato-dialquil fumaratos
- Poliestireno alquilatado
- Polímeros y copolímeros de alfa-olefinas

El intervalo de masa molecular de los polímeros, es generalmente menor que el de los polímeros usados como mejoradores del índice de viscosidad y normalmente varía de 500 a 10,000 g/mol.

Aditivos que mejoran las propiedades químicas.

- Antioxidantes: Los antioxidantes o inhibidores de la oxidación, son aditivos que se emplean para reducir efectos nocivos de la oxidación del aceite. Estas son sustancias capaces de retardar o impedir la fijación del oxígeno libre sobre los compuestos auto-oxidables y por consiguiente la polimerización de éstos.

Ya que el aceite atraviesa por una serie compleja de reacciones de oxidación, existiendo varias teorías sobre este fenómeno, siendo la más aceptada el proceso vía radicales

libres, donde la auto-oxidación se caracteriza por la combinación de radicales libres de moléculas inertes y por la transformación de hidroperóxidos en aldehídos y ácidos, el aceite se enturbia, aumenta la viscosidad y se forman lodos.

Las primeras pruebas relacionadas con la incorporación de aditivos antioxidantes se realizaron en 1920, en donde se trataba de mejorar la estabilidad de los aceites de turbinas y transformadores; el éxito obtenido fue considerable y actualmente existen turbinas que llevan varios años utilizando el mismo aceite sin hacer cambios.

En el caso de los motores de combustión interna, las condiciones son completamente distintas a las de los turbogeneradores, ya que los cambios de temperatura, de carga y las impurezas en el ambiente no permiten que se prolongue el uso del lubricante más allá de los límites normales. Por esto, tienen tanta importancia los cambios de lubricantes, cambios que deben realizarse a su debido tiempo, a pesar de que los aditivos antioxidantes prolongan la vida del lubricante.¹³

Los principales compuestos antioxidantes usados actualmente son:

- Ditiofosfatos de zinc.
- Fenoles bloqueados (en los cuales el grupo hidróxilo está bloqueado estéricamente).
- Aminas (*n*-fenil- α -naftilamina, *n*-fenil- β -naftilamina y tetrametildiaminodifenilmetano).

En los aceites de motor donde se presentan las oxidaciones a altas temperaturas, se emplean los antioxidantes de ditiofosfato de zinc y para los procesos que se presentan a temperaturas normales en los aceites para turbinas, compresores, transmisiones automáticas, engranajes hidráulicos, etc., los antioxidantes más utilizados son los fenoles bloqueados.

- Anticorrosivos: El término de inhibidor de corrosión, se aplica a los productos que protegen los metales no ferrosos, susceptibles a la corrosión, presentes en un motor o mecanismo susceptible a los ataques de contaminantes ácidos presentes en el aceite.

Los fosfitos orgánicos fueron los primeros inhibidores de corrosión usados en aceites de motor. La mayoría no eran productos puros, sino mezclas de mono, di y triorganofosfitos, obtenidos mediante la reacción de alcoholes o hidroxieésteres con tricloruro de fósforo. Una gran cantidad de inhibidores a base de fosfitos se sustituyeron por compuestos de azufre y fósforo, los cuales se siguen utilizando.¹⁴

Los principales tipos de inhibidores de corrosión son:

- Ditioposfatos de zinc: Este tipo de inhibidor involucra el calentamiento de alcohol con pentasulfuro de fósforo para formar el ácido diorgano-ditioposfórico, el cual se neutraliza con la base metálica deseada.
- Ditiocarbonatos metálicos: Principalmente zinc, para su obtención se parte de aminas orgánicas, disulfuro de carbono y la base metálica.
- Terpenos sulfurizados: su obtención es mediante el calentamiento de azufre en presencia de terpenos, lavando posteriormente con una solución acuosa alcalina con objeto de eliminar al azufre corrosivo residual.
- Terpenos fosfosulfurizados: Estos inhibidores de la corrosión se obtienen mediante el calentamiento de pentasulfuro de fósforo con un terpeno.

De los inhibidores de corrosión mencionados, el ditioposfato de zinc, desde su comercialización, ha sido el más utilizado en la formulación de aceites lubricantes.^{13,14}

- Antiherrumbre: Este término es utilizado para designar a los productos que protegen a las superficies ferrosas contra la formación de óxido.

Estos aditivos son compuestos polares que forman una película protectora, desplazando la humedad que puede estar presente sobre las superficies metálicas, esto debido a fenómenos de adsorción que hace que sus moléculas queden fuertemente ligadas al metal, separándose del aceite.

Los principales inhibidores de la herrumbre suelen ser:

- Aminas.
- Ácidos grasos.
- Fosfatos y ésteres.

Aditivos que actúan sobre las propiedades físico-químicas.

- Detergentes: Son aquellos productos capaces de evitar o reducir la formación de depósitos carbonosos en las ranuras de los motores de combustión interna, así como la acumulación de depósitos en faldas del pistón, guías y vástagos de válvula. Ya que generalmente, los aceites de motor se ven expuestos a operar bajo la acción de elevadas temperaturas, que tienden a originar cambios en la naturaleza química del aceite, dando lugar a productos de oxidación. Estos productos insolubles en el aceite, aparecen como diminutas partículas y llegan a aglomerarse o depositarse en las partes internas del motor.¹⁴

Los aditivos detergentes se han ido innovando con el paso del tiempo, desde el año de 1925 se realizaron algunos estudios de investigación que demostraron que ciertos jabones metálicos, como por ejemplo el oleato de sodio, al incorporarse a los aceites convencionales para motores de combustión interna eran lo suficientemente eficaces como para contrarrestar en gran parte los depósitos de carbón, cenizas y lacas en el interior de los motores. La desventaja fue que estos compuestos aceleraban la oxidación del aceite, por lo que se abandonó su empleo. Así en 1940, se introdujo en el mercado un aditivo que brindó grandes resultados, ya que aparte de sus características detergentes, no aceleraba la oxidación del lubricante, no corroía y no acidificaba los metales o aleaciones de metales, que se empleaban en la construcción de los cojinetes de los motores diesel de alta velocidad.

Entre los aditivos más utilizados se encuentran:

- Jabones de ácidos grasos superiores: Como los palmitatos, estearatos, etc. Estos productos dejaron de utilizarse debido a la promoción de oxidación del propio aceite.
- Sulfonatos (naturales y sintéticos). Los naturales proceden de la neutralización de los ácidos procedentes de la fabricación de aceites blancos. Los sintéticos proceden de la sulfonación y posterior neutralización de los fondos de alcoholización producidos durante la fabricación de jabones en polvo, a partir de los alcoholbencenos (detergentes domésticos e industriales).
- Fosfatos y tiofosfatos: Obtenidos a partir del pentasulfuro de fósforo y una poli-olefina de alta masa molecular. El producto de la condensación se hidroliza y se neutraliza con la base del metal polivalente, calcio o bario.

- Fenatos: Los fenatos son los más utilizados actualmente, por ser los que dan mejores resultados a temperaturas elevadas (motores diesel sobrealimentados). Los de mayor aceptación son los sulfofenatos de calcio y bario del octilfenol.
- Alquilsalicilatos: El más conocido es el octilsalicilato básico de calcio. Tanto los fenatos como los alquilsalicilatos poseen muy buenas propiedades antioxidantes, por lo que se les puede considerar como aditivos multifuncionales.
- Dispersantes: Son aquellos aditivos capaces de dispersar los lodos húmedos originados en el funcionamiento frío del motor. Los lodos están constituidos por una mezcla compleja de productos no quemados de la combustión, carbón, óxidos de plomo y agua. Por lo que el aditivo dispersante recubre a cada partícula de una película por medio de fuerzas polares, que repelen eléctricamente a las otras partículas, evitando se aglomeren, es decir que actúen como acción complementaria de los detergentes que ejercen cierta acción dispersante sobre los lodos del cartér, pero solamente operan cuando las temperaturas del motor son las normales.

Entre los dispersantes más utilizados se encuentran:

- Copolímeros, que contienen el grupo éster y uno o más de los grupos polares siguientes: Amida epóxica, hidroxil anhídrido, etc. Estos productos se obtienen mediante la copolimerización de alcohol acrilatos o metacrilatos de cadenas largas con monómeros insaturados.
- Polímeros hidrocarbonados, que han sido tratados a fin de incorporar funciones polares. Tal es el caso de los poliisobutilenos.
- Amidas y poliamidas de alta masa molecular. Los productos de esta familia son separados normalmente por la reacción de ácidos grasos de alta masa molecular.
- Ésteres y poliésteres de alta masa molecular, como dibenzonato de polietilenglicol, poliestearato de polivinilo y boratos de polisacáridos.
- Sales amínicas de alta masa molecular de ácidos orgánicos, tales como ácido sulfónico de petróleo, ácidos organofosforados y mezclas de ambos.¹⁵
- Aditivos de alta presión: Se denominan aditivos de alta o extrema presión a aquellos productos químicos capaces de evitar el contacto destructivo de metal-metal, una vez que ha desaparecido la película clásica de lubricante de un

régimen de lubricación hidrodinámica. Cuando esto ocurre se llega a una lubricación de capa límite.

Todos los aditivos de extrema presión deberán contener uno o más elementos, tales como azufre, cloro, fósforo o sales carboxílicas, capaces de reaccionar químicamente con la superficie del metal bajo condiciones de lubricación límite. Estos productos actúan localmente en los puntos de máxima fricción para dar lugar a sulfuros, cloruros, etc., con una tensión de corte baja que les hace comportarse como un lubricante.

Ejemplos de aditivos de alta presión:

- Cicloparafinas.
- Mezcla de mono y di-alcoholfosfitos.
- Ditiófosfato de zinc.

Estos aditivos producen corrosión, debido a la acción química que ejercen. Para eliminar este efecto se combinan con compuestos orgánicos y antimonio, molibdeno, azufre, fósforo o arsénico. Sin embargo, donde las condiciones de operación no son tan severas, como en los aceites de motor, el aditivo de alta o extrema presión más utilizado es el ditiófosfato de zinc, ya que su propiedad de extrema presión se une a las antioxidantes y anticorrosivas.¹⁴

- De untuosidad o aceitosidad: En el proceso de refinación del aceite se eliminan los componentes de menor resistencia a la oxidación y con ello es inevitable la desaparición de las moléculas polares que son precisamente las que proporcionan untuosidad a los aceites. Debido a esto, es necesario la adición de estos aditivos en los aceites.

Los aditivos de untuosidad o aceitosidad son compuestos que, siendo solubles con el aceite, presentan una fuerte polaridad. Tal es el caso de los aceites animales y vegetales, los cuales permiten en condiciones de lubricación límite, disponer sus moléculas adheridas a la superficie metálica mediante fuerzas de tipo electrostático e incluso químicas, protegiéndolas cuando existen fuertes cargas o presiones en superficies metálicas que se deslizan entre sí.¹⁵

Los aditivos de este tipo son:

- Filantina.
- Filosix.
- Antiespumantes: La presencia de espuma es siempre perjudicial en los sistemas de lubricación, ya que puede crear problemas de reboses en recipientes y cajas de engranajes e interferencias en la formación de la cuña hidrodinámica en los cojinetes, con el consiguiente riesgo de daños mecánicos.

La tendencia a la formación de espumas viene incrementada por: temperaturas bajas, viscosidad alta, presencia de agua, velocidad de agitación elevada y tensión superficial alta. Los problemas que crea la espuma pueden eliminarse al adicionar aditivos antiespumantes que disminuyen el valor de la tensión superficial del aceite. El agente antiespumante más utilizado y de uso más generalizado es el aceite de silicona, constituido por polímeros de silicona, que se adiciona en proporciones inferiores al 0.001 %.¹⁵

- Emulsificantes: Son utilizados para emulsionar dos líquidos no miscibles, en este caso, aceite y agua. Por lo que el agente emulsificante se introduce en la interfase agua y aceite, produciendo una película que previene la coalescencia.

Los emulsificantes mas utilizados son:

- Detergentes derivados de hidrocarburos.
- Sulfonatos de petróleo.
- Jabones alcalinos y alcalinotérreos.

1.3 Propiedades de los aceites lubricantes

- Color y fluorescencia: Estas características carecen de valor como criterio de evaluación de los aceites elaborados, ya que pueden ser modificados por los aditivos.

Sin embargo, la fluorescencia azulada caracteriza a los aceites nafténicos y la verde a los parafínicos. Actualmente, el procedimiento más usual para determinar el color se basa en lo establecido por la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (American Society of Testing Materials, ASTM) D1500-98, con el que se comparan vidrios patrón de distintos colores con el aceite a medir y se establece una numeración que va de 0 a 8 en sentido creciente. Pero en los productos muy claros, como los aceites aislantes, aceites blancos, etc., la escala ASTM es incapaz de matizar diferencias por lo que se emplea el colorímetro Saybolt, con una escala que comprende desde -16 o blanco amarillento hasta +30 o blanco no diferenciable del agua. En aceites usados el cambio de color es indicativo de degradación o contaminación del lubricante. En aceites nuevos, el color extremadamente oscuro o turbio indica una defectuosa purificación.¹⁴

- Densidad: La densidad es la razón entre la masa de un volumen dado del aceite y la masa de un volumen igual de agua. En cambio según la bibliografía inglesa la define como la masa en el vacío de una unidad de volumen de una sustancia dada. Esta propiedad tiene cierta importancia en el campo comercial, ya que permite convertir el volumen en masa y es indicativa del tipo de crudo del que procede el aceite. Se determina por el procedimiento de la norma ASTM D4052-96.

La densidad de los aceites lubricantes está relacionada con la naturaleza del crudo y el punto de destilación de la fracción, para fracciones equivalentes los aceites parafínicos son de menor densidad y los aromáticos los de mayor densidad, correspondiendo a los tipos nafténicos las densidades intermedias (ver apéndice A, Tabla A3). En los aceites, la densidad es inferior a la unidad.

La determinación de la densidad es de gran utilidad, ya que todos los productos líquidos del petróleo son manejados y vendidos en base volumétrica, por galón, por barril, etc., permitiendo conocer la masa del producto o muestra.^{13,14}

- Viscosidad: La viscosidad de un líquido puede definirse como su resistencia a fluir y como una medida de rozamiento entre sus moléculas.

Un líquido tan complejo como un aceite, puede verse modificado considerablemente, por las variaciones internas de su composición y estructura, determinadas por el origen del petróleo crudo y su proceso de refinación.

La temperatura y presión influye en la viscosidad de un aceite lubricante de tal modo que la totalidad de ellos fluyen ante un efecto térmico y se espesan o solidifican ante un aumento de presión o un descenso de temperatura. La viscosidad de un aceite lubricante, depende de su naturaleza o base ya sea nafténico, parafínico o mixto (ver apéndice A, Tabla A3). Los crudos que menos varían su viscosidad con la temperatura son los parafínicos y, los nafténicos mediante refinación con disolventes se asemejan mucho a los parafínicos, pero no llegan a igualarlos.

Para la elección de un aceite lubricante, la viscosidad cinemática es la propiedad más importante, ya que un aceite con viscosidad adecuada de acuerdo a sus condiciones de utilización garantiza la correcta lubricación de las partes móviles del motor.¹⁰

Métodos para la determinación de la viscosidad:

- Mediante el tiempo de escurrimiento del aceite a través de un pequeño tubo u orificio. Principio empleado por los viscosímetros de Saybolt, Redwood y Engler. Estos se diferencian en cuanto al volumen de la muestra que se emplea y temperatura de la prueba.
- Por medio del tiempo de desplazamiento de un objeto sólido a través del aceite. Principio que utilizan los viscosímetros de bolas. Estos constan de un tubo transparente y diversas bolas que se usan para diferentes intervalos de medición. Para medir la viscosidad de un aceite se toma el tiempo que tarda una bola en caer desde su extremo hasta el final del tubo lleno de aceite.
- Mediante el cizallamiento que se produce en el aceite contenido entre dos superficies, sometidas a un movimiento relativo (viscosímetros de Mac Michel).

En un aceite automotriz se determina la viscosidad a 313 (40 °C) y 373 K (100 °C) de acuerdo a la metodología de la norma ASTM D445-97. Con la determinación de la viscosidad del aceite a las temperaturas de 313 K y 373 K se realiza el cálculo del índice de viscosidad. De acuerdo a la SAE, está relacionada con la viscosidad de estos a la

temperatura de 373 K. Por ejemplo un aceite grado SAE 40, significa que posee una viscosidad entre 12.5-16.3 cSt (10^{-6} m/s).

- Índice de viscosidad: El índice de viscosidad es el valor que indica la variación de la viscosidad de un aceite con la temperatura.

Para determinar este índice, se consulta la norma ASTM D 2270-98, donde se compara la variación de viscosidad que ha sufrido un aceite a dos temperaturas distintas y fijas, casi siempre 100 °F (38 °C) y 210 °F (99 °C).

Actualmente, para determinar el índice de viscosidad se compara la variación del valor de la viscosidad de un aceite a dos temperaturas, 104 °F (40 °C) y 212 °F (100 °C). Los cambios de temperatura a los cuales se determina el índice de viscosidad fueron establecidos por la Organización Internacional de Normalización (International Standards Organization, ISO).¹³

Los índices elevados de viscosidad (superiores a 85) tienen notable influencia en la lubricación del cárter de motores de combustión interna, permitiendo un arranque más fácil, en especial a bajas temperaturas ambientales. Por lo anterior, se deduce que las temperaturas a las que puede estar sujeto un lubricante oscilen en amplios intervalos, el aceite debe poseer un elevado índice de viscosidad.

Índice de viscosidad según su procedencia:

- Aceites crudos nafténicos: De 40 a 80.
 - Aceites crudos nafténicos refinados con disolventes: 90.
 - Aceites crudos parafínicos: De 95 a 100.
 - Aceites de crudos aromáticos: 40.
- Porcentaje de azufre: Una cantidad elevada de azufre es indeseable en los aceites. En la mayor parte de los casos, procede de los álcalis utilizados en la refinación y que no han sido después completamente eliminados, o bien provienen de desprendimientos de impurezas y costras de las tuberías por las que atraviesa después del ciclo.

La determinación del porcentaje de azufre se basa en la norma ASTM D 4294-95. El azufre es considerado como el elemento más perjudicial de la industria petrolera, ya que los crudos de donde proceden contienen este elemento en forma libre o en combinación con grandes moléculas. Actualmente, los aceites comerciales tienen un bajo porcentaje de azufre.

- Temperatura de escurrimiento: Es aquella que indica cual es la mínima temperatura a la que fluye el aceite por los circuitos de lubricación, para su determinación se emplea el procedimiento establecido en la norma ASTM D 97-96.

La temperatura más baja de escurrimiento la presentan los aceites nafténicos, después los aromáticos y por último los parafínicos (ver apéndice A, Tabla A1). Por lo que los aceites nafténicos en comparación con los demás, permanecerán fluyendo con una temperatura de escurrimiento estable, puesto que es la temperatura más baja en la cual un aceite permanecerá en movimiento después de estar sujeto a variaciones de temperaturas.¹⁰

- Residuo de carbón: Es el porcentaje de depósitos carbonosos que se obtienen al someter una muestra de aceite a evaporación y pirólisis a las condiciones normalizadas de ensayo.

Existen dos procedimientos para determinar el porcentaje de carbón, conocidos por los nombres de índice de Conradson e índice de Ramsbottom. El de mayor empleo es el primero y se realiza consultando la norma ASTM D 189-97. El ensayo se realiza en un crisol abierto finamente pulido en el que se coloca una cantidad de aceite y se somete a la temperatura de ebullición hasta que por evaporación se consume todo el líquido, quedando un residuo, el cual pesándolo nos dará la proporción de carbón en el aceite que se estudia, siendo los porcentajes de carbón admisibles entre 0.1 a 0.9 %.

La tendencia a la carbonización de los aceites es de gran interés en el caso de la lubricación de motores de combustión interna, compresores y mecanismos sometidos a muy altas temperaturas, así como en el caso de aceites termofluidos.^{10,13}

- Índice de basicidad total: El grado de alcalinidad de un aceite se expresa como el índice de basicidad total (total base number, TBN), definido como la cantidad de ácido expresado en miligramos de hidróxido de potasio que se requiere para neutralizar el contenido básico de un gramo de muestra, en condiciones normales.

Esta determinación se realiza mediante el procedimiento de la norma ASTM D 2896-92. La alcalinidad de un aceite nuevo proporciona información sobre su capacidad para neutralizar productos ácidos procedentes de la combustión y de la oxidación del aceite a temperaturas elevadas, mientras que la de uno usado brinda información sobre su degradación y contenido alcalino.¹⁴

- Temperatura de inflamación: La temperatura de inflamación determina la temperatura mínima a la cual los vapores desprendidos se inflaman en la presencia de una fuente de ignición.

Para la determinación, se puede operar en vaso abierto para el caso de puntos de inflamación elevados, de acuerdo a la norma ASTM D 93 o en vaso cerrado para aceites más ligeros o de más baja inflamabilidad, de acuerdo a la norma ASTM D 92. Por lo que la inflamabilidad de un aceite da una orientación sobre la volatilidad del mismo, posibles contaminaciones, riesgos de incendios, entre otros.

Para un producto del petróleo o material combustible, el punto de inflamación es importante como una indicación entre los límites de peligrosidad y explosividad relacionados con su utilización, además la determinación de esta propiedad sirve para su identificación y clasificación, este punto nos indica si el aceite es una mezcla de aceite ligero o pesado, un destilado simple o un residuo. Por ejemplo, la disminución de la temperatura de inflamación de un aceite usado con relación a uno nuevo indica la presencia de la contaminación con combustible (diesel o gasolina). Cuando en un aceite usado existe dilución con combustible la disminución del punto de inflamación viene acompañada de la disminución de su viscosidad.^{12,13}

1.4 Fuente de producción de aceite lubricante en una refinería

Para la obtención del aceite lubricante en una refinería, el crudo debe de pasar por diferentes procesos o etapas. En los procesos actuales de recuperación de aceites lubricantes de base parafínica, el crudo reducido que se obtiene de la destilación del petróleo a presión atmosférica, constituye la carga para el tren de procesamiento. Este residuo atmosférico se destila a vacío para obtener fracciones de diferente viscosidad de las cuales, por tratamiento posterior, se recuperan los lubricantes básicos.

De la unidad de destilación a vacío se obtiene gasóleo, destilados laterales y un residuo o fondo. Los productos laterales de la columna de fraccionamiento sirven como materia prima para la elaboración de lubricantes ligeros. El residuo contiene gran cantidad de aceites de alta viscosidad mezclados con asfalto que puede alcanzar elevadas concentraciones, esta impureza puede ser eliminada por medio de tratamiento con agentes extrayentes como el propano en una unidad desasfaltadora. El residuo desasfaltado y los cortes laterales aun contienen sustancias perjudiciales como compuestos nafténicos y aromáticos que tienden a reducir el índice de viscosidad y que por lo tanto deben ser eliminados. Esta separación se logra mediante extracción con disolventes selectivos durante el proceso conocido como extracción con disolventes o desaromatizado, posteriormente el producto de la unidad desaromatizadora se hace pasar a través de una unidad hidrosulfuradora, para controlar la concentración de azufre presente en el aceite.

El producto de esta unidad contiene una cantidad importante de ceras parafínicas que impiden un adecuado comportamiento de los aceites a baja temperatura, estos constituyentes indeseables, son retirados por medio de procesos que emplean disolventes con el fin de disminuir el punto de congelación de los lubricantes en la operación conocida como desparafinado.

El aceite desencerado y las parafinas se decoloran en una unidad de tierras o arcillas adsorbentes, el cual nos ayuda a adquirir estabilidad ante la oxidación.

Los aceites lubricantes básicos producidos de esta manera se mezclan entre sí en distintas proporciones, para agregarles aditivos para la obtención de las especificaciones comerciales de los productos terminados.

Así, para la obtención del aceite lubricante, los procesos involucrados son: destilación atmosférica y de vacío, unidad de desasfaltado, extracción con disolventes o desaromatizado, unidad de hidrotreatmento, unidad de desparafinado y unidad de tierras o arcillas, Figura 1.1.¹⁶

➤ Destilación atmosférica y de vacío

En las refinerías modernas, la alimentación que entra al tren de recuperación y tratamiento de aceites lubricantes ha pasado, previamente, por dos etapas de destilación. En la primera de ellas, destilación a presión, se obtienen gasolinas ligeras del petróleo crudo y gases ligeros; la segunda etapa, es efectuada a presión atmosférica, para remover compuestos ligeros. Debido a la diferencia de densidades entre la fase vapor y la líquida, el líquido se desplaza hacia la parte inferior de la columna cayendo en cascada de plato a plato mientras que el vapor asciende, para entrar en contacto con el líquido en cada uno de los platos. Sin embargo, se utilizan diferentes tipos de dispositivos, como por ejemplo empaques y/o platos para que las dos fases entren en contacto íntimo y se lleve a cabo la transferencia de masa.

La materia prima resultante de esta destilación atmosférica son naftas, querosina, gasóleo atmosférico (ligero y pesado) y residuo atmosférico. El residuo que sale del fondo de la columna es enviado como carga a la columna de vacío, en esta columna se evita la descomposición de los hidrocarburos de peso molecular elevado, que son los componentes esenciales de los aceites lubricantes, los productos que normalmente se obtienen en esta columna son: gasóleo, tres cortes laterales denominados corte ligero, medio y pesado, y un residuo de vacío por el fondo. Estos cortes laterales y el residuo de vacío constituyen la materia prima de los aceites lubricantes.^{16,17}

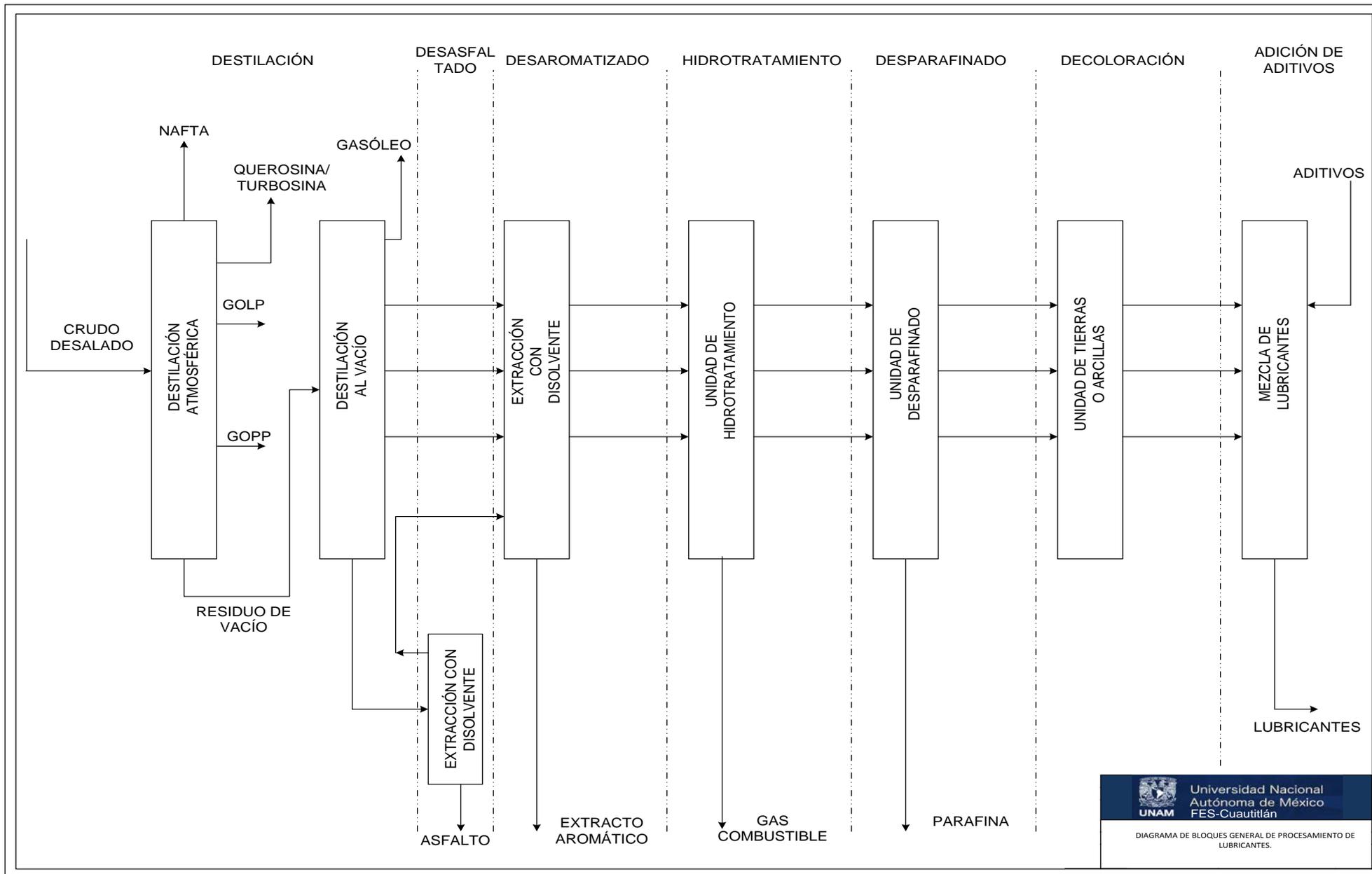


Figura 1.1 Diagrama de bloques general del procesamiento de aceites lubricantes.

➤ Unidad de desasfaltado

En esta unidad se carga el residuo de vacío, que es de donde se obtienen las fracciones de lubricantes de mayor viscosidad y de mayor valor comercial. El porcentaje de residuos pesados y asfálticos que contiene esta fracción de petróleo es variable y depende fundamentalmente de la procedencia del crudo.

Por lo que esta unidad es la encargada de eliminar los componentes asfálticos y metálicos, los cuales son perjudiciales en la preparación de aceites. La eliminación de estos componentes se hace con propano dentro de una torre a contracorriente y según la proporción propano-residuo de vacío y temperatura de extracción, varía la precipitación o arrastre de las corrientes asfálticas.

El propano es el disolvente más empleado por excelencia para el desasfaltizado, pero puede también usarse etano o butano para ajustar las propiedades del disolvente. El propano tiene propiedades como disolvente inusuales; así, entre 40 y 60 °C, disuelve muy bien las parafinas, pero esta solubilidad disminuye con el aumento de la temperatura hasta la temperatura crítica del propano (96.8 °C), donde todos los hidrocarburos se vuelven insolubles.

Como se puede observar en la Figura 1.2, la carga residuo de vacío se divide y se introduce a dos torres de contacto colocadas en paralelo, se hace circular propano a contracorriente el cual arrastra los hidrocarburos parafínicos y los separa de los cuerpos asfálticos, posteriormente se recupera el propano del extracto. El producto libre de disolvente de esta primera etapa constituye la carga para aceite neutro pesado básico a los posteriores procesos de refinación. El control de calidad se realiza atendiendo a las características de viscosidad, color, carbón Ramsbottom y temperatura de inflamación.

El refinado de la primera extracción pasa a otra etapa de desasfaltado, esta vez con una mezcla de propano, butano e hidrocarburos pesados, en donde se recupera aceite neutro pesado o aceite de cilindros, según las condiciones de operación.¹⁶

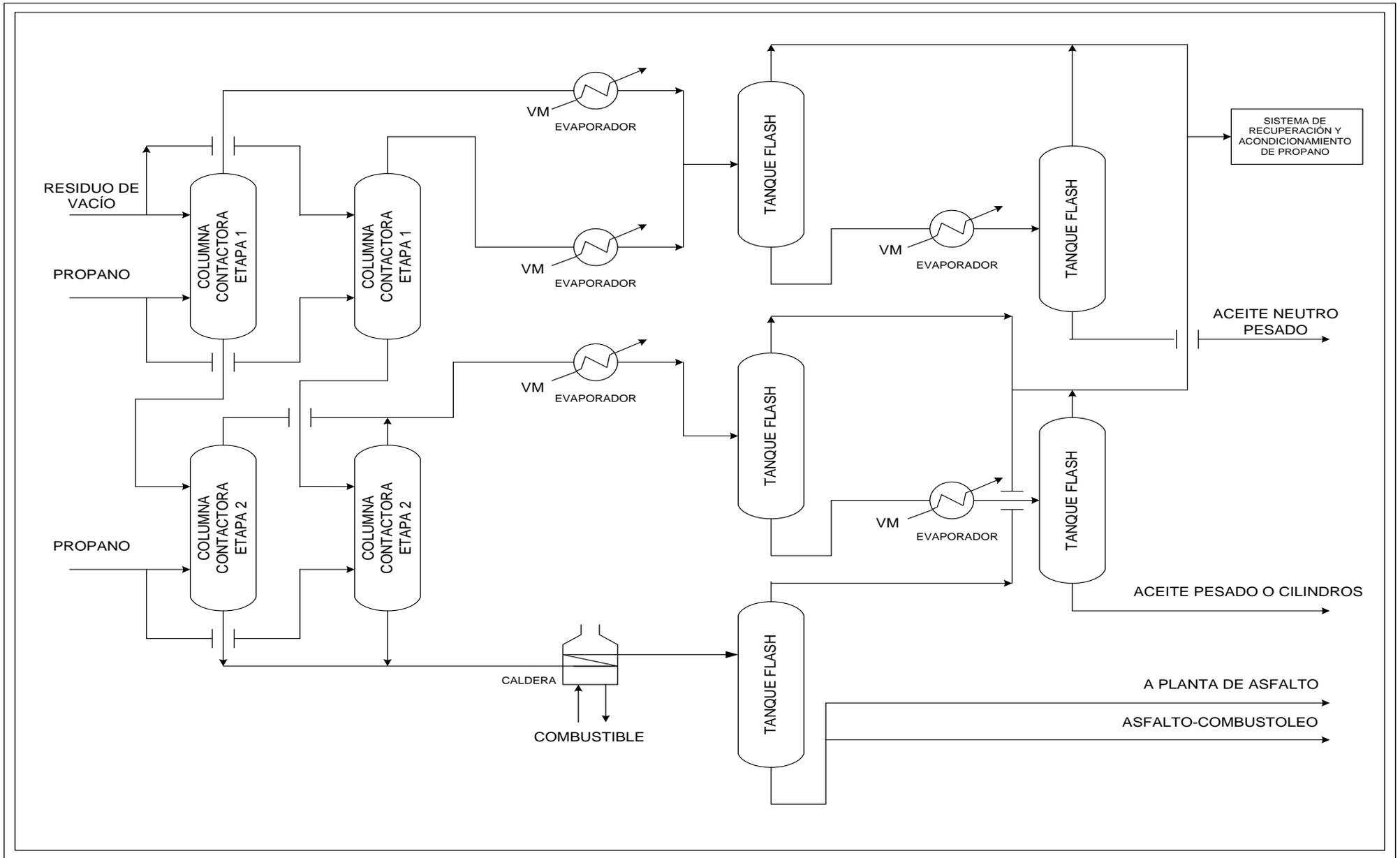


Figura 1.2 Unidad desasfaltadora.

➤ **Extracción con disolventes o desaromatizado**

Existen cuatro disolventes utilizados en la extracción de aromáticos de las materias primas para aceites lubricantes: el furfural, el fenol, el anhídrido sulfuroso y la *N*-metil-2-pirrolidona (NMP). El propósito de la extracción con disolventes es mejorar el índice de viscosidad, la resistencia a la oxidación, el color del corte y reducir las tendencias de formar carbón y lodos mediante la separación de hidrocarburos aromáticos y nafténicos. El disolvente más utilizado es el furfural ya que permite reducir el contenido de aromáticos en un 75%.

En esta unidad se cargan los cortes ligero, mediano, pesado y la carga proveniente de la unidad desasfaltadora. La alimentación entra a la unidad desaromatizadora, donde primeramente es tratada en un desaereador (Figura 1.3), posteriormente, se elimina el aire que durante la última etapa de separación del propano pudiera haber arrastrado. Este proceso de desaereación es necesario, debido a que el furfural que se utiliza como agente desaromatizante presenta muy baja estabilidad a la oxidación y puede degradarse por la presencia de aire.

Una vez desaereado, el aceite se introduce generalmente a una torre empacada con anillos rasching o un contactor de discos rotatorios, donde a contracorriente circula furfural el cual extrae la mayor parte de las sustancias aromáticas y otras impurezas tales como compuestos ácidos, hidrocarburos no saturados y azufre. La temperatura y presión de operación, el tiempo de residencia y la relación furfural/aceite deben ser las adecuadas para dar los mejores rendimientos y productos dentro de las especificaciones fijadas para esta fase de tratamiento.¹⁸

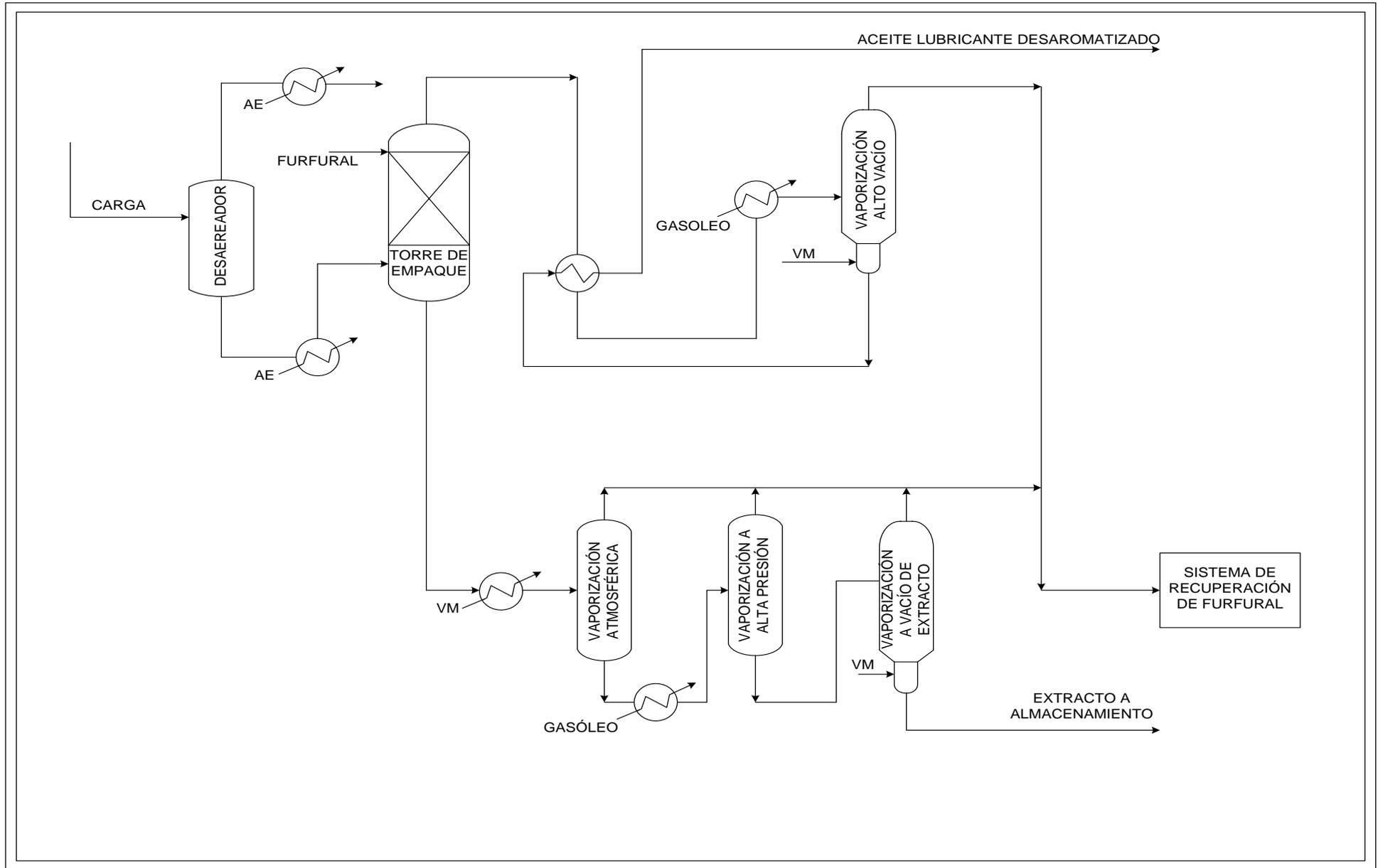


Figura 1.3 Unidad desaromatizadora.

➤ **Unidad de hidrotratamiento**

En general, la presencia de azufre en los derivados del petróleo disminuye la calidad de los productos terminados. En el caso de los aceites lubricantes, un alto contenido de azufre significa un deterioro en su apariencia al impartirle un color opaco y además una menor estabilidad ante la oxidación.

Los aceites tratados en la sección de extracción con furfural o desaromatizado, reduce el contenido de azufre presente como mercaptano y sulfuros metálicos; sin embargo, para tener controlada la concentración de azufre en los productos finales, se introduce una unidad hidrosulfuradora de aceites lubricantes, Figura 1.4.

En esta unidad, el azufre es eliminado como gas amargo, después de haber sido hidrotratado en un reactor de lecho catalítico. Los lubricantes tratados, aun con el ácido sulfhídrico producido durante la reacción y materiales sulfonables como impurezas, pasan por tres etapas de depuración, la primera consiste de una evaporación instantánea a alta presión, en la segunda se destila el aceite en un agotador intermedio a baja presión y finalmente se rectifica en un agotador a alto vacío. De esta manera, se obtiene la carga para las unidades desparafinadoras.

➤ **Unidad desparafinadora**

Los lubricantes refinados contienen parafinas que cristalizan, relativamente, a altas temperaturas por lo que su remoción es necesaria para bajar el punto de escurrimiento del aceite terminado. El desparafinado se lleva a cabo por precipitación de la cera empleando disolventes selectivos. El agente desparafinante es una mezcla de metiletilcetona y tolueno en distintas proporciones según el aceite en tratamiento, Figura 1.5.

La carga de aceite parafinoso proveniente de la unidad hidrosulfuradora, es mezclada en una primera dilución con el agente desparafinante, posteriormente se calienta y después se enfría en un intercambiador de calor en el que se aprovecha la baja temperatura del aceite desparafinado del filtro primario (filtro A).

En el intercambiador de calor se realizan otras diluciones y la temperatura final es de alrededor de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se efectúa una dilución más y se enfría en otro intercambiador que utiliza propano como medio de absorción de calor, el aceite al final de esta etapa de criogenización debe alcanzar la temperatura de filtración adecuada, la cual debe ser menor en unos cuantos grados al punto de escurrimiento del aceite terminado.

La mezcla enfriada en su punto de filtración se introduce al filtro A donde se separa el aceite, mientras lo que se denomina parafina primaria (parafina dura + parafina suave) queda atrapada en las mallas del equipo. El aceite desparafinado aun en mezcla con el agente desparafinante se envía a la sección de recuperación donde el lubricante libre de disolventes es obtenido, al eliminársele este último por destilación.

Después de ser lavada la parafina primaria con disolvente frío, es retirada del mismo y entonces, puede ser enfriada para cargarse a un segundo filtro (filtro B), donde se separa la parafina suave o blanda al colarse entre las mallas. Esta parafina suave se manda a la sección de recuperación para la eliminación del disolvente, empleando destilación en columna y rectificándola con vapor vivo.

La parafina dura que queda en el filtro es retirada después de un lavado con disolvente frío y es alimentada a un tercer filtro donde, nuevamente se lava con agente desparafinante frío y limpio, lográndose la solubilización en este último de las pequeñas cantidades de parafina suave que traiga consigo, rectificando, así, la parafina dura. La mezcla de parafina suave y disolvente se reintegra a la corriente que alimenta a la sección de recuperación. En tanto que la parafina dura repasada se manda a la sección de recuperación que le corresponde para eliminación de disolvente y que presenta características similares a la de la parafina suave.^{17,18}

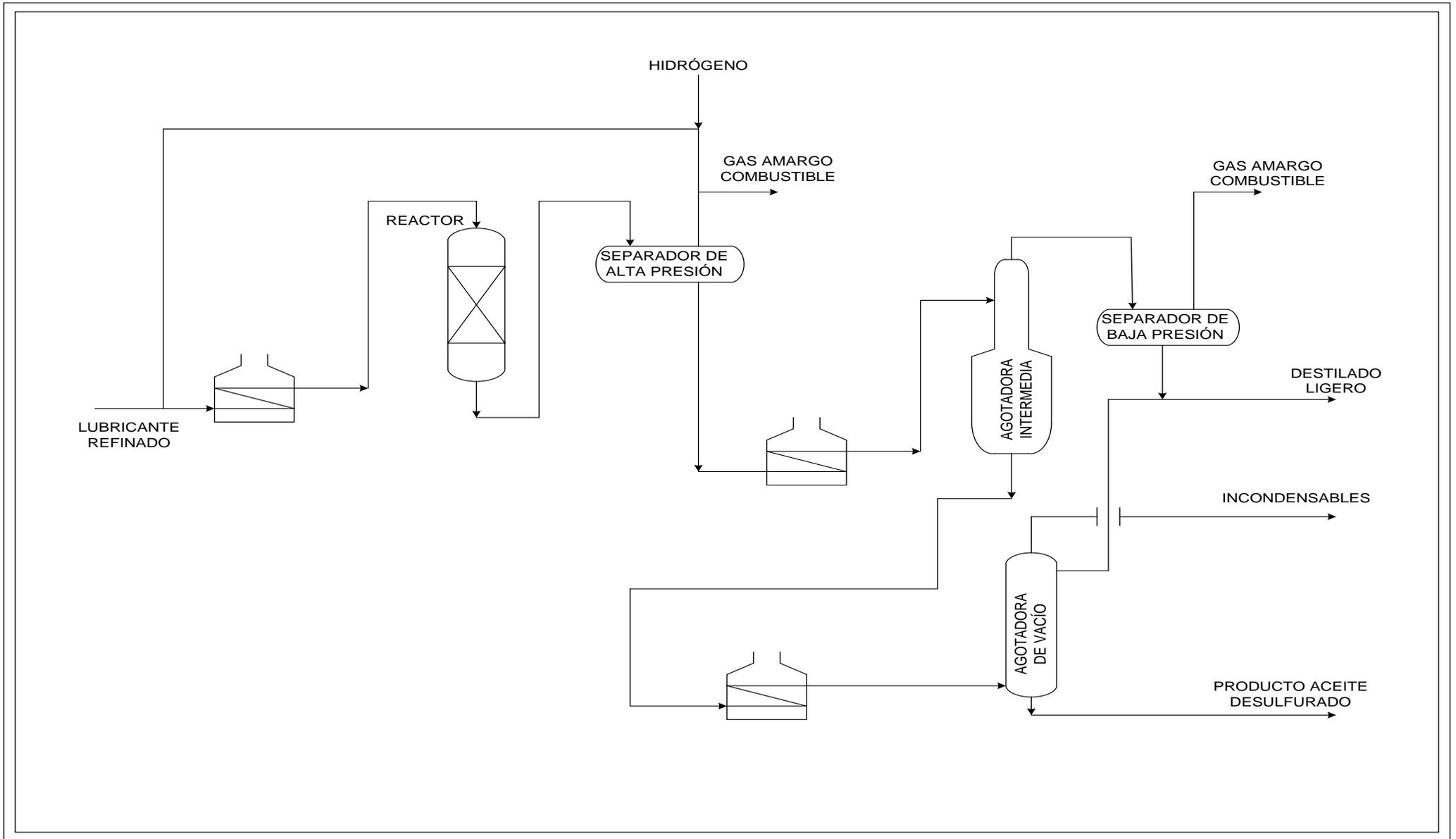


Figura 1.4 Unidad hidrodesulfuradora.

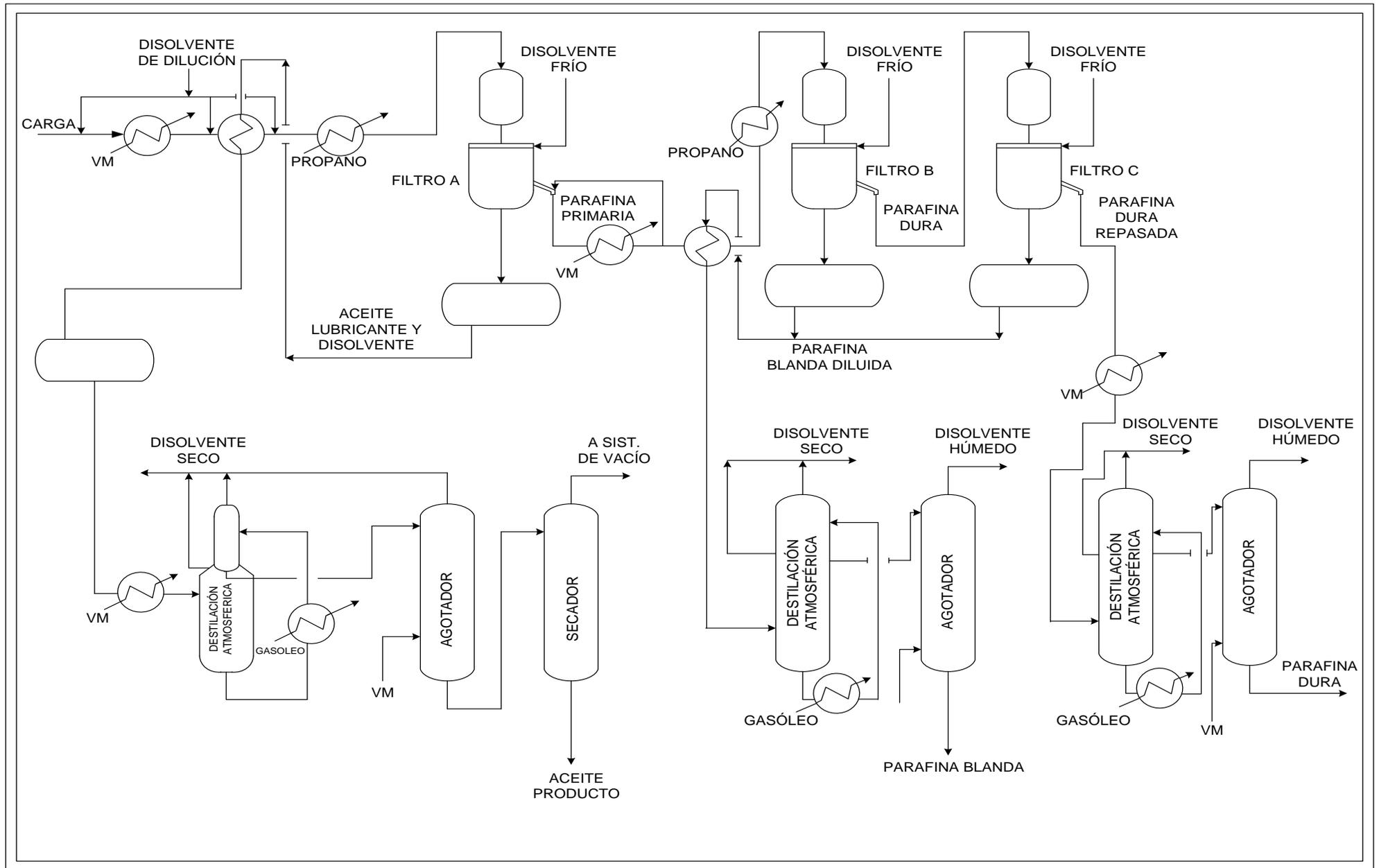


Figura 1.5 Unidad desparafinadora.

➤ **Unidad de tierras o arcillas**

El acabado de lubricantes básicos se efectúa en la planta de tratamiento con tierras colorantes. Aquí, utilizando arcillas naturales y activas, se mejora la estabilidad del aceite y se separan materiales asfálticos y resinosos que imparten coloración, obteniéndose finalmente los aceites lubricantes básicos dentro de las especificaciones comerciales. El procedimiento consiste en contacto a temperatura controlada con arcilla finamente dividida, Figura 1.6.

La alimentación a esta unidad es dividida, el 20 % de esta corriente se precalienta y se combina en un recipiente agitado con arcilla pulverizada proveniente de alimentadores especiales, una vez homogeneizada la mezcla se combina con el 80 % del aceite restante y la temperatura de la corriente resultante se eleva entre los 105 y 120 °C, pasando posteriormente al interior de un tanque de contacto que trabaja a presión reducida, acto seguido, se filtra en tres etapas para la eliminación de arcilla en forma de lodo combinada con los materiales coloridos que ha absorbido. Finalmente, se enfría el aceite hasta la temperatura ambiente y se almacena en tanques.¹⁸

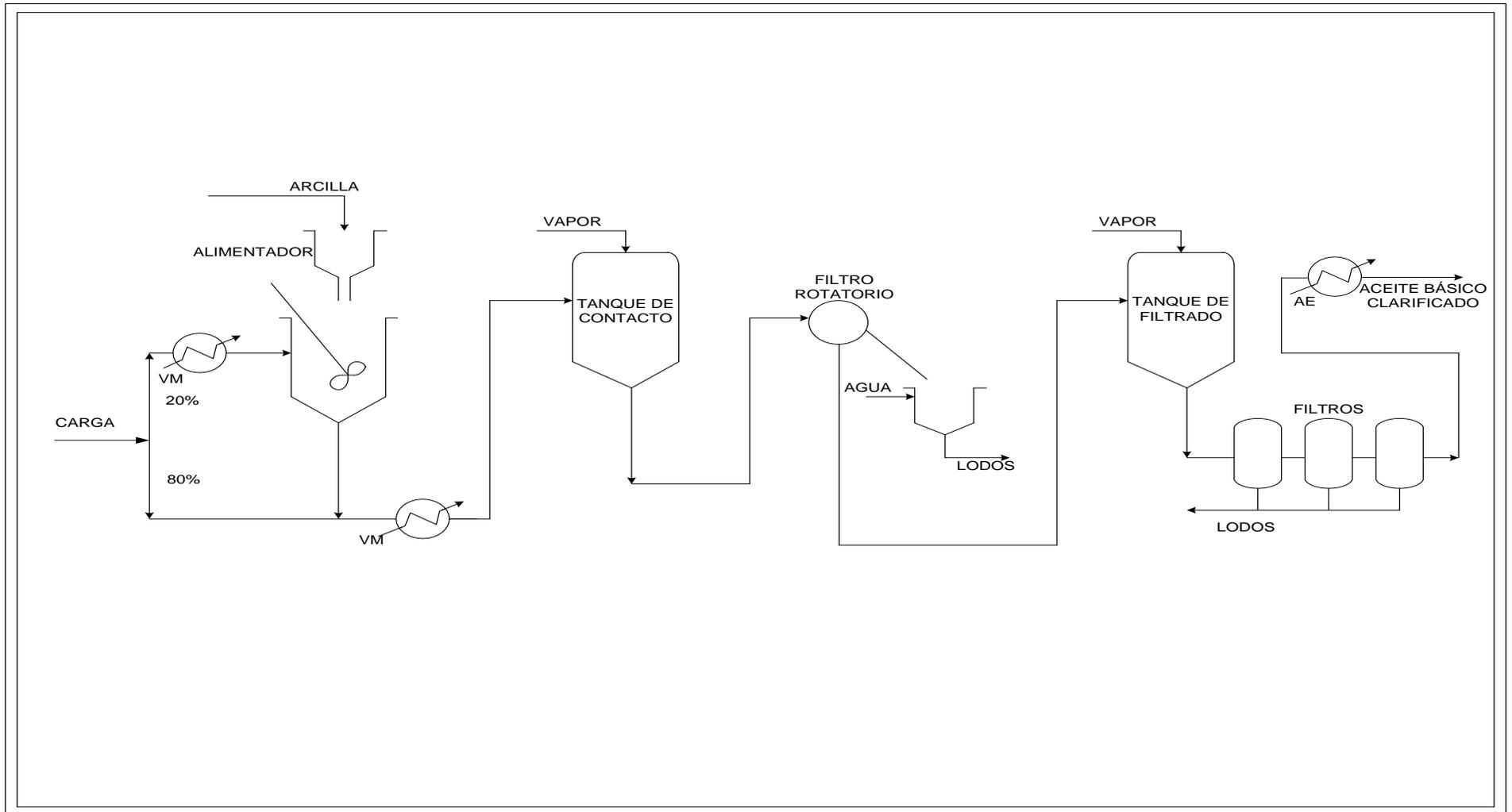


Figura 1.6 Unidad de tierras o arcillas.

CAPÍTULO II. REUTILIZACIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE

2.1 Generalidades

En este capítulo se muestra un panorama actual de la reutilización del aceite de motor, además se describe la definición de un aceite lubricante usado, también se describen los contaminantes que afectan a las propiedades de los aceites lubricantes y las reacciones más frecuentes que se efectúan en el mismo. Por otra parte, se enuncian los beneficios del reuso del aceite lubricante, así como los principales países encargados de esta labor. Por último, se describen las composiciones químicas después de su uso en motores de combustión interna y las especificaciones que deben cumplir después de su refinamiento.

2.2 Aceite lubricante usado

Se define como aceite lubricante usado, aquél que ha perdido todas sus propiedades para lubricar y proteger las dos superficies en contacto, debido a la degradación o agotamiento de sus aditivos.

El aceite lubricante usado de motor, debe cambiarse en intervalos regulares a condiciones de operación adecuadas. Esto se debe a que el aceite en servicio cambia durante la operación del motor de combustión interna y sus aditivos pierden efectividad, acumulándose los contaminantes del aceite (agua, polvo, partículas de metal, entre otros), los cuales aumentan el desgaste del motor, reduciendo su eficiencia e incrementando los costos de combustible y reparación.¹³

De esta manera, el aceite lubricante empleado en los motores sufre un proceso de degradación y contaminación, entendiéndose por degradación; el proceso por el que se va reduciendo la capacidad del aceite para cumplir sus funciones de lubricar, proteger, limpiar, refrigerar y sellar, originado por la alteración de sus propiedades físicas y químicas. Por otra parte, la contaminación, es la presencia de materias extrañas en el aceite sin importar su origen, las principales son: partículas metálicas, óxidos metálicos, polvo atmosférico, ácidos provenientes de los gases de combustión y de la oxidación del lubricante. Por ejemplo, se resalta el sulfuro, el cual puede convertirse en un ácido

fuerte, se puede condensar en las paredes del cilindro llegando al aceite, el cual transporta el ácido a las paredes de los cilindros, desgastando así las piezas metálicas.

Las variaciones de las propiedades físicas y químicas del aceite se deben a las diferentes condiciones (altas temperaturas, grandes velocidades de cizallamiento, ambientes corrosivos, etc.) a las que se ve sometido el aceite dentro del motor.

La velocidad de degradación de un aceite es la rapidez con que el aceite pierde sus propiedades físico-químicas iniciales. Depende principalmente del estado y mantenimiento del motor, de la composición química del aceite, del tipo de combustible usado y las condiciones de trabajo. La degradación que presenta un aceite lubricante es de dos tipos:

➤ Degradación externa, causas:

- La contaminación por partículas metálicas procedentes del desgaste y de la formación de herrumbre, que se encuentran en suspensión.
- Dilución por combustible: Compuestos ligeros presentes de la combustión incompleta de la gasolina y agua.
- Metal carbonoso, procedente de la combustión (hollín y carbón duro).
- Polvo, fibras y toda clase de basura introducida del medio externo.

➤ Degradación interna, causas:

- Principalmente a los procesos de oxidación que sufre el aceite, ocasionados por altas temperaturas producidas por la fricción, difícil desplazamiento entre las superficies lubricadas, efecto catalítico de los metales y compuestos producidos por la combustión incompleta de la gasolina.¹⁵

2.2.1 Composición química de los aceites lubricantes usados

Las características químicas de un aceite lubricante usado poseen composiciones muy variables, dependiendo generalmente del tiempo total en que fue usado. Algunos contaminantes que se pueden presentar son agua, azufre, compuestos clorados y metales

pesados que determinan sus características tóxicas y peligrosas.¹ En la Tabla 2.1, se muestran algunas propiedades de los contaminantes que posee el aceite lubricante usado y, en la Tabla 2.2, se confinan los valores máximos que un aceite puede tener para ser usado como combustible, no así para la reutilización del mismo,^{1,19}. Datos regulados por la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR).

Tabla 2.1. Datos analíticos de muestras de aceite lubricante usado, recolectadas entre los años 2000 y 2011.

pH	Halógenos [ppm]	Zn [ppm]	Cd [ppm]	Cr [ppm]	Pb [ppm]	Punto Flash[°C]
8.6	520	1040	2.8	3.9	102	46
7.3	370	1110	3.0	4.2	70	53
8.5	480	1140	3.3	5.8	140	59
7.9	470	980	4.2	3.4	105	52
8.1	390	1230	5.9	6.9	93	49
8.2	370	820	2.1	2.7	53	43
8.4	343	677	2.8	2.9	33	49
7.8	370	690	2.7	3.1	47	47

Tabla 2.2. Concentraciones máximas de componentes en los lubricantes usados.

Componente	Nivel máximo permisible [ppm]
Arsénico	5.0
Cadmio	2.0
Cromo	10
Plomo	100
Azufre	Variable, principalmente 1.0%
PCB's ^a	Variable, principalmente 2.0
Total de halógenos orgánicos como el cloro ^b	1000 a 4000
Punto de Flasheo	38°C

^a“Bifenilos Policlorados” formula molecular C₁₂H_{10-n}Cl_n, en el cual n es mayor de 2.

^b“Compuestos orgánicos halogenados” en los cuales uno o más halógenos son incorporados al compuesto orgánico.

En las Tablas 2.1 y 2.2, se puede observar que la concentración de cadmio, en muestras recolectadas de aceite usado en los Estados Unidos, sobrepasan los límites reguladores, el cual es de 2.0 ppm. En cambio, en el caso del cromo los resultados fueron satisfactorios, ya que ninguna muestra sobrepaso el límite de 10 ppm. A pesar de esto, las concentraciones de plomo son mucho menores que aquellas que se muestran en los estudios reportados en los años 80's y 90's, Tabla 2.3, debido al cambio que surgió en las gasolinas sin plomo. El plomo ha sido mezclado con las gasolinas desde inicios de 1920. Pero no fue hasta 1973, que la EPA empezó a trabajar reduciendo estas emisiones gradualmente, agregando de 2-3 gramos por galón de gasolina a cerca de 200,000 toneladas de plomo por año, y para finales de 1986 solo permitía una decima parte de un gramo por galón.^{1,15}. Además, la Tabla 2.3, muestra un importante decremento en la concentración de los metales pesados en las últimas dos décadas.

Tabla 2.3. Concentración de metales pesados, y halógenos en aceites usados como combustible entre 1980 y 1990 en los Estados Unidos.

Componente	Concentración [ppm] en los 80	Concentración [ppm] en los 90
Arsénico	20	No analizado
Bario	137	1-7
Cadmio	4	0.3-7
Cromo	38	2-7
Plomo	555	100-146
Zinc	707	570-2370
Halógenos	5500	100-440

Por otra parte, el aceite usado en México, debe presentar alguna característica como inflamabilidad, corrosividad, toxicidad o reactividad, para que sea considerado un desperdicio peligroso (apéndice B, Figura B1); asimismo, no debe contener bifenilos policlorados en concentraciones mayores a 5 ppm o halógenos con concentraciones mayores a 1000 ppm (NOM-133-SEMARNAT-2000, *protección ambiental bifenilos policlorados*).^{1,20} Además, la NOM-052-SEMARNAT-2005, establece las características en el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos, donde menciona que los residuos peligrosos presentan alguna de las características siguientes:

- Corrosivo.
 - Es un líquido acuoso y presenta un pH menor o igual a 2.0; o mayor o igual a 12.5.
 - Es un líquido no acuoso capaz de corroer al acero, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año a una temperatura de 328 K (55 °C).

- Reactivo.
 - Es un líquido o sólido que después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor a cinco minutos sin que exista una fuente externa de ignición.
 - Cuando se adiciona agua, reacciona espontáneamente produciendo gases inflamables en una cantidad mayor a un litro por kilogramo del residuo por hora.

- Explosivo.
 - Cuando es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva solo o en presencia de una fuente de energía.

- Tóxico ambiental.
 - Obtenida mediante la NOM-053-SEMARNAT-1993, la cual contiene cualquiera de los constituyentes tóxicos, entre otros, confinados en la Tabla 2.4.

- Inflamable.
 - Es un líquido o mezcla de líquidos que contienen sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60.5 °C.²¹

Tabla 2.4. Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT.

Constituyentes inorgánicos (metales)	ppm(mg/L)
Arsénico	5.0
Bario	100
Cadmio	1.0
Cromo	5.0
Mercurio	0.2
Plata	5.0
Plomo	5.0
Selenio	1.0

2.2.2 Reacciones de los aceites lubricantes

El aceite lubricante, como se mencionó en los apartados 2.2 y 2.2.1, una vez usado presenta concentraciones elevadas de metales pesados, generados por el desgaste del motor o la maquinaria que lubricó y por contacto con combustibles. También, se encuentran, con frecuencia, disolventes clorados, los cuales provienen de las reacciones del aceite con compuestos halogenados de los aditivos. Estos dos factores constituyen la principal preocupación de los aceites usados.

La descomposición de los aceites de motor se debe principalmente a una reacción de oxidación. Así, el tiempo que tarda un aceite en comenzar a oxidarse a unas condiciones dadas, depende tanto de la naturaleza del aceite base como del tipo y concentración de los antioxidantes. Al respecto, la degradación de un aceite involucra tres etapas:

- En la etapa inicial de la degradación, se observa la pérdida o consumo de antioxidantes.
- En la segunda etapa, se identifican sales metálicas, sulfóxidos y peróxidos, productos procedentes de los aditivos y de la oxidación del aceite.
- En la última etapa, se forman hidroperóxidos, los cuales inducen reacciones secundarias de oxidación. Se pueden identificar sales metálicas, sulfatos metálicos y ácidos carboxílicos.¹⁵

Además, los aceites lubricantes, se ven afectados por los siguientes mecanismos:

1. Oxidación: Los dobles enlaces son atacados por el oxígeno, dando lugar a la formación de ácidos, alcoholes y/o aldehídos.
2. Hidrólisis: El agua convierte los aceites en ácidos grasos y alcoholes, en donde se ve disminuido el pH.
3. Degradación térmica: Se presenta una polimerización debida a la alta presión y temperatura.
4. Evaporación: Se genera una disminución en la concentración de compuestos volátiles debido a la alta temperatura.

Por consiguiente, si un aceite se encuentra protegido por los antioxidantes, la degradación oxidativa y los cambios en las propiedades del lubricante serán mínimos. Sin embargo, el gasto del antioxidante puede eventualmente permitir el rápido deterioro del aceite.

Dependiendo de la formulación de los aditivos y del aceite base, éste se degrada de manera diferente. Las reacciones de condensación, del tipo aldólico, genera materiales poliméricos primarios, los cuales son solubles en el aceite y, mediante otras reacciones, se pueden producir polímeros secundarios, los que son insolubles y dan lugar a productos que constituyen los depósitos o sedimentos. Los polímeros primarios pueden actuar como “degradadores” de cadenas en la etapa de oxidación del aceite envejecido. Como consecuencia, en la última etapa de oxidación del aceite, la cantidad de hidroperóxidos y ácidos carboxílicos formados disminuyen drásticamente al formarse los polímeros secundarios.^{15,22}

En la Figura 2.1, se presentan las reacciones de los hidrocarburos parafínicos y nafténicos. Los primeros se oxidan por los extremos de la cadena formando ácidos o cetoácidos corrosivos. En los hidrocarburos nafténicos se rompe la cadena y ocurre un proceso análogo al de los hidrocarburos parafínicos.

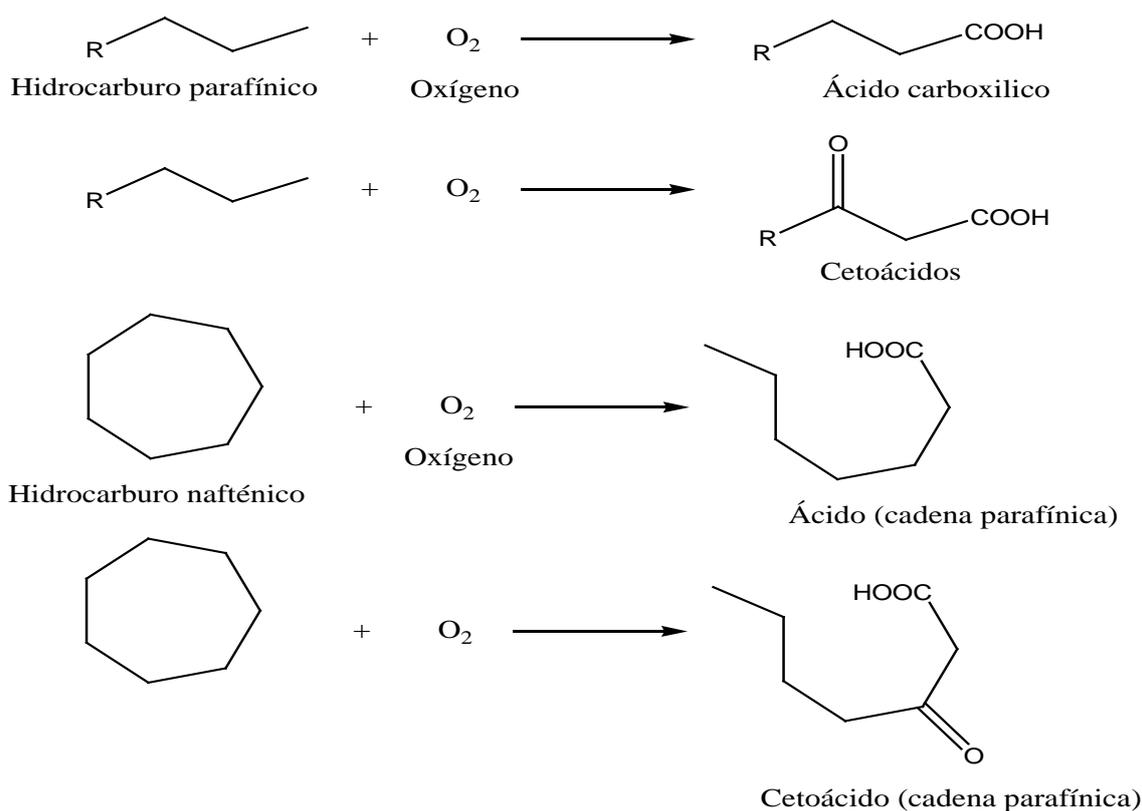


Figura 2.1. Reacciones de hidrocarburos parafínicos y nafténicos.

2.2.3 Impacto sobre el ambiente

Un mal manejo del aceite lubricante usado, de acuerdo a lo establecido en el Convenio de Basilea (anexo I numerales 8 y 9), ocasiona contaminación en el agua, en el suelo o en el aire:

Agua:

- Un galón de aceite usado, proveniente por su cambio en un vehículo, puede estropear la calidad de un millón de galones de agua potable.
- Concentraciones de 50 a 100 ppm de aceite usado pueden afectar el sistema de alcantarillado en sus procesos de tratamiento.
- Las películas de aceite usado en las superficies de agua impiden el paso del oxígeno, deterioran los procesos de fotosíntesis de las plantas acuáticas y bloquean el paso de la luz solar.
- Estudios de derrames de aceite en ecosistemas acuáticos, indican que lleva más de veinte años al ecosistema para regenerar sus condiciones óptimas.
- El aceite usado puede tener efectos tóxicos en organismos de agua dulce y salada. Se han descubierto efectos significativos a largo plazo a

concentraciones de 310 ppm en peces de agua dulce y a concentraciones tan bajas como 1 ppm en formas de vida de agua salada.

- La disminución de oxígeno disuelto en agua, estresa a los animales que viven en ella, ya que el aceite obstruye los mecanismos respiratorios e incluso es incorporado en los tejidos de estos organismos, lo que conlleva a no ser aptos para el consumo humano; sin embargo, pueden integrarse a la cadena alimenticia.

Suelo:

- El aceite vertido en el suelo reduce su productividad, tiende a migrar al subsuelo, causando estrés fisiológico a bacterias, plantas, invertebrados y vertebrados.

Aire:

- Los productos de la combustión de los aceites lubricantes usados pueden contener plomo, zinc, cromo, aluminio, níquel y otros metales, dióxido de azufre, compuestos nitrogenados, fósforo, calcio y ácido clorhídrico.
- Los compuestos aromáticos policíclicos de los aceites lubricantes usados, se evaporan y pueden sufrir reacciones fotoquímicas que los descomponen en gases y partículas.
- El aceite lubricante usado que se quema bajo condiciones no controladas puede emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente industrial.^{1,23,24}

Debido a estos problemas, la NOM-058-SEMARNAT-1993, establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Con el fin de garantizar la protección a la población y el equilibrio ecológico (ver anexo B, Tabla B1 para las referencias usadas en la NOM-058).

2.2.4 Efectos sobre la salud humana

Los efectos de los aceites lubricantes usados, dependen de la composición de sus aditivos, del tipo y calidad de combustible utilizado, de las condiciones mecánicas del motor y de cuánto tiempo se utilizó el lubricante. De igual manera; el tiempo, la ruta y

la vía de exposición a los lubricantes, además de la susceptibilidad del individuo son determinantes para identificar los daños a la salud.

La ATSDR, cuenta con un reporte vasto con relación a las vías, rutas y tipos de exposición a aceites usados. En términos generales en cuanto a afectaciones a la salud la ASTDR, menciona que:

1. Los mecánicos y otras personas que trabajan con automóviles (quienes realizan sus cambios de aceite) que están expuestos a cantidades altas de aceite lubricante usado, pueden presentar efectos en la piel (salpullido), sangre (anemia) y el sistema nervioso (dolores de cabeza y temblores). Sin embargo, estos trabajadores también están expuestos a muchas otras sustancias químicas en el trabajo. Se sabe que la exposición a otras sustancias produce los mismos síntomas. Por lo tanto, es posible que los efectos observados en estas personas no sean causados por el aceite lubricante usado sino por sustancias químicas provenientes de otras fuentes.
2. Las personas que respiran voluntariamente aerosoles de aceite lubricante usado, durante unos minutos sufren irritación ligera de nariz y garganta y algunas veces irritación en los ojos.
3. Los animales que ingieren cantidades altas de aceite lubricante usado sufren diarrea, por lo tanto, personas que ingieren aceite lubricante usado también la pueden experimentar. Animales de granja, como las vacas, que se alimentan de pasto contaminado con aceite que contiene metales tales como molibdeno y plomo sufren anemia y temblores y algunas veces causa la muerte. Lo que sugiere la posibilidad de que personas expuestas al aceite lubricante usado presenten efectos similares.
4. Es incierta la teoría de que el aceite lubricante usado afecta el sistema reproductivo en hombres y mujeres o si causa defectos de nacimiento.
5. La aplicación prolongada de aceite lubricante usado sobre la piel de ratones genera cáncer de piel, lo que es causado por hidrocarburos aromáticos policíclicos. Sin embargo, el Departamento de Salud y Servicios Humanos, la Agencia de Protección al Ambiente y la Agencia Internacional para la Investigación del cáncer de los Estados Unidos, no han clasificado a los aceites lubricantes usados en cuanto a su carcinogenicidad en humanos.²⁵

2.2.5 Reutilización del aceite de motor

Todo residuo o desecho que pueda causar daño a la salud o al medio ambiente se considera como un residuo peligroso, fundamento por el cual los gobiernos de los países tienen la responsabilidad de tomar acciones preventivas para reducir al máximo la generación de estos desechos, así como establecer estrategias para su manejo y reducir sus propiedades nocivas mediante técnicas apropiadas.

Por otro lado, el aceite usado de motor es un desecho que se genera con bastante frecuencia en nuestro medio, el cual proviene de maquinaria o automóviles. Se sabe que el 50 % de todo el aceite usado es utilizado como combustible y que solo del 8 al 10 % es refinado para producir lubricantes y un 30 % es derramado o depositado en la tierra. Siendo más del 40 % del aceite usado desechado. Además, el API consideró el uso del aceite usado como combustible en hornos de fundición o en plantas generadoras de electricidad. Sin embargo, la EPA menciona que, con esta propuesta, se tendrían serios problemas de contaminación y altos costos de mantenimiento en los equipos de combustión. Ya que de ser utilizado como combustóleo produciría emisiones de metales pesados como el plomo, cobre, cadmio y zinc.²⁶

Un ejemplo de estrategia en el manejo del aceite usado, se lleva a cabo en Suiza donde el aceite usado es calentado a una temperatura de 1,713 K, hasta producir monóxido de carbono e hidrógeno. Este último se hace reaccionar con nitrógeno en presencia de un catalizador para producir amoníaco.

También, en la regeneración de aceites lubricantes, el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (National Institute of Standards and Technology, NIST) asegura que los aceites lubricantes regenerados son de calidad superior a los aceites lubricantes vírgenes, ya que proporcionan una mejor lubricación, son más resistentes a la oxidación y producen menos depósitos tanto de carbón como de lodos. Debido, en gran parte, a que los aceites regenerados han sido tratados tres veces: La primera durante la refinación del crudo, la segunda en los motores de los vehículos en donde se presenta la descomposición de las moléculas más débiles y por último durante la regeneración en la cual se eliminan los compuestos inestables junto con otras impurezas.

Por lo que la regeneración de aceites lubricantes se ha estado consolidando a nivel mundial, ya que genera algunos beneficios, como los siguientes:

- El re-refinamiento de los aceites lubricantes puede generar lubricante limpio sin tener que procesar un barril de crudo de 159 litros, donde la base del aceite representa solamente 1.9 litros.
- Se disminuyen las importaciones de aceites lubricantes básicos.
- Se puede satisfacer por una parte a la creciente demanda actual de aceite lubricante.
- Se reduciría tanto la contaminación ambiental como el agotamiento acelerado de los hidrocarburos.
- Los precios del aceite regenerado son equivalentes a los del aceite virgen.²⁷

2.3 Principales países reutilizadores del aceite de motor

En Estados Unidos, la reutilización del aceite lubricante usado está dado por cada estado; el cual se hace cargo del manejo y supervisión del mismo. Por ejemplo: En Utah el Departamento de Calidad del Ambiente (Department of Environmental Quality, DEQ), implementó un programa de recolección llamado “do-it-yourself” (hazlo tu mismo), el cual ha tenido mucho éxito en ese estado, ya que la cantidad total registrada por los transportadores de aceite usado en 2005 fue de 11, 515, 729 galones (49 millones de kg).³⁰ El estado de California, posee sus propios centros de acumulación de aceite lubricante usado, distribuidos de manera específica en el estado, de los cuales han llegado a generar más de 150 millones de galones (495 millones de kg) de aceite usado anualmente, reciclando un 59 % de todo este lubricante.²⁹

En Australia, el consumo anual de aceite lubricante virgen es alrededor de 465 millones de kg, de esta cantidad aproximadamente 180 millones de kg de aceite es recuperado y de 27 a 36 millones de kg de aceite usado es almacenado. Aquí, existen más de 400 puntos de recolección de aceite y más de 300 están bajo construcción. Alrededor del 75 % del aceite recolectado es reusado como combustible en hornos y quemadores industriales. Solo una compañía en el estado de Virginia llamada “Environmental Oil”, convierte alrededor del 20 % del aceite usado, en un producto que reúne las

especificaciones actuales para diesel y menos del 3 % del aceite recolectado es refinado para producir el aceite base, Tabla 2.5 y Figura 2.2.

Actualmente el gobierno de Australia ha gastado más de AU\$ 34.7 millones en el Programa de Aceite para Administración de Producto (Product Stewardship for Oil Program, PSOP), el cual puede incrementar el reciclaje del aceite lubricante.

En la Unión Europea, la Directiva de Aceite Gastado (Waste Oil Directive), fue diseñada para crear un manejo y tratamiento sostenible del manejo de residuos, además la directiva protege el medio ambiente evitando vertederos ilegales (ver anexo B, Tabla B2). Al respecto, la Unión Europea consumió en el año 2003 una cantidad de 5 billones de kg de aceite lubricante usado. La mitad de esa cantidad se convirtió en aceite de desperdicio, debido a fugas o pérdidas durante su uso. Por lo que, solo 2.5 billones de kg de aceite usado es manejado cada año en la Unión Europea, Tabla 2.5 y Figura 2.2.²⁸

Tabla 2.5. Producción de aceite lubricante, recolección y pérdidas.

País	Producción	Aceite usado recolectado	Pérdida al medio ambiente
USA	4.5 billones de kg	2.6 billones de kg	660 millones de kg
Australia	465 millones de kg	180 millones de kg	54-88 millones de kg
UE	5 billones de kg	2.5 billones de kg	100 millones de kg

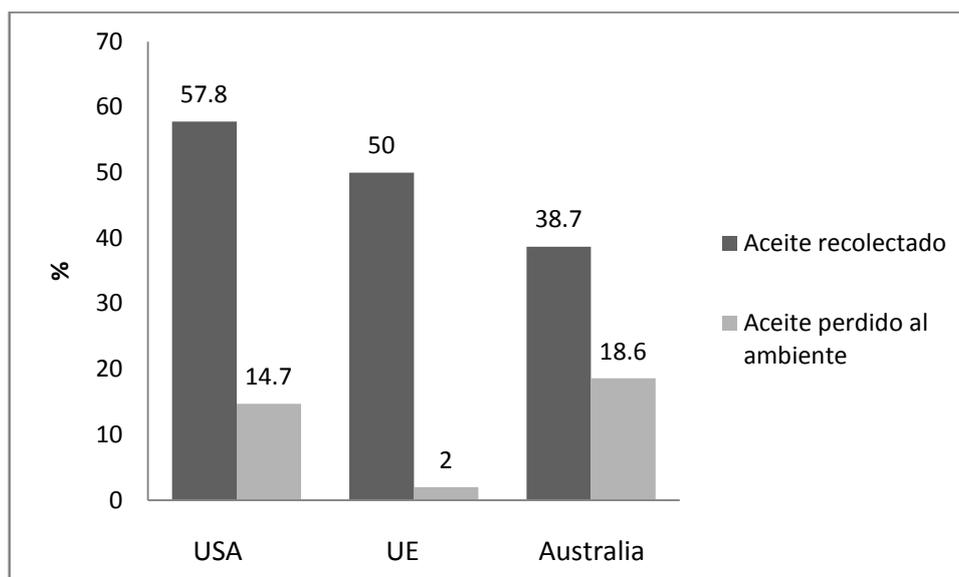


Figura 2.2. Comparación de aceite lubricante usado.

2.4 Especificaciones a cumplir en el re-refinamiento del aceite lubricante

El aceite usado de motor, al ser refinado debe de cumplir con una serie de normas o especificaciones, para ser vendido como aceite de motor de nueva cuenta. Por lo que el API, certifica a los vendedores de aceites lubricantes, contando con el Sistema de Certificación y Licencias de Aceite para Motor (Engine Oil Licensing and Certification System, EOLCS), el cual; es el programa que reúne los requerimientos para que el aceite cumpla con la calidad del aceite de motor y posteriormente sea autorizado para su venta.

Los requerimientos, así como ensayos de laboratorio son establecidos por sociedades técnicas y asociaciones comerciales tales como: la ASTM, el Consejo Americano de Química (American Chemistry Council, ACC) y la SAE. Al respecto, en la Tabla 2.6, se presentan las pruebas de laboratorio que se aplican al aceite lubricante, una vez que ha sido reciclado. Si el aceite lubricante cumple con estas pruebas, podrá utilizarse para su venta.^{31,32}

Tabla 2.6. Especificaciones del aceite base renovable.

Propiedad	Método	Características y valores
Apariencia	SM 360-99	Brillante y limpio
Color	ASTM D 1500	<0.5
Gravedad API, @ 60°F	ASTM D 287	34.4
Densidad, lb/gal @ 60°F	ASTM D 1298	7.1
Viscosidad, cSt @ 40°C	ASTM D 445	22
Viscosidad, cSt @ 100°C	ASTM D 445	4.3
Índice de viscosidad	ASTM D 2270	105
Azufre total, % peso	ASTM D 3120	0.02
Saturados, % peso	ASTM D 2887	92
Contenido total de cenizas	ASTM D 482	<.001
TAN mg KOH/g	ASTM D 664	<.01

2.5 Aceites lubricantes usados en México

En México, los aceites lubricantes usados son considerados como residuos peligrosos; con relación a esto, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), define en su artículo 5 fracción XXXII un residuo peligroso como: “Son aquellos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que tengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta ley”.

De esta manera, los aceites lubricantes usados son considerados como residuos peligrosos sujetos a un plan de manejo conforme a la LGPGIR, que en su artículo 31 establece que:

“Estarán sujetos a un plan de manejo los siguientes residuos peligrosos y los productos usados, caducos, retirados del comercio o que se desechen y que estén clasificados como tales en la Norma Oficial Mexicana (NOM) correspondiente: I. Aceites lubricantes usados”.³³

Durante diversas administraciones federales se ha tratado de llevar un control de los residuos peligrosos, lo que se refleja en los ordenamientos jurídicos vigentes, en las responsabilidades de las autoridades federales instituidas en su momento y en las políticas en la materia, si bien estas últimas en ocasiones no se llevan a cabo o quedan solo como propuestas de acciones a realizar. Algunas acciones tomadas en México, en relación a los residuos peligrosos de 1980 al 2012, son las mostradas a continuación:

- Se promulga el 28 de enero de 1988 la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su reglamento en materia de residuos peligrosos.
- Se publica la NOM-052-ECOL-93, que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos.
- El 4 de junio de 1992 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Reglamento Interior de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), que crea jurídicamente a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

- Se crea en 1992 el Instituto Nacional de Ecología (INE), actualmente Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
- Se publica la NOM-087-ECOL-1995, que establece los requisitos para la separación, envasado, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos biológico-infecciosos generados en establecimientos de asistencia médica.
- En diciembre de 1994 la autoridad competente en materia es la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) contando entre sus órganos desconcentrados con el INE y la PROFEPA.
- Se promulga el 8 de octubre de 2003 la LGPGIR de los residuos y su reglamento.
- Se publica la NOM-087-ECOL-SSA1-2002, protección ambiental, salud ambiental, residuos peligrosos biológico-infecciosos, clasificación y especificaciones de manejo, la cual abroga la anterior NOM-087-ECOL-1995.
- Se publica la NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos, que abroga a la NOM-052-ECOL-93.
- El 30 de noviembre de 2000, se cambió la Ley de la Administración Pública Federal dando origen a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), contando entre sus órganos desconcentrados con el INE y la PROFEPA.
- En el Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales se propone: Incrementar la capacidad instalada para el manejo de residuos peligrosos. Ampliar el padrón de registro de generadores y tener el inventario nacional de residuos y materiales peligrosos.

En la Figura 2.3, se confinan los principales residuos peligrosos generados, de acuerdo a las estadísticas ambientales generadas por la SEMARNAT, en donde se observa que uno de los giros en los que más se generan aceites usados son: Comunicaciones y transportes, electricidad y agua.

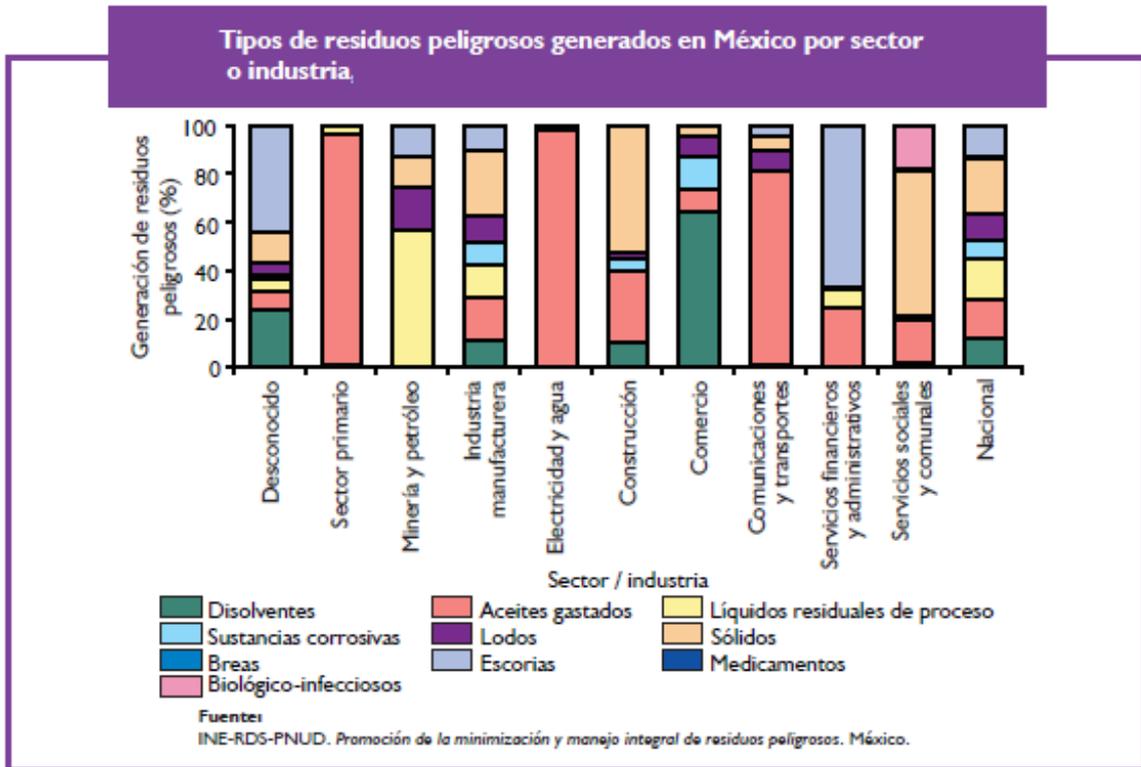


Figura 2.3. Tipos de residuos peligrosos.

CAPÍTULO III. MERCADO

3.1 Generalidades

En este capítulo se realiza un estudio de mercado, en el cual se señala el comportamiento que ha tenido el aceite lubricante virgen y usado en el país durante los últimos años. También, se mostrará el estado actual del aceite lubricante en México y se anticipa la situación de los aceites lubricantes para el futuro y así determinar la cantidad que será empleada para re-refinamiento.

3.2 Mercado nacional

Para la realización del estudio económico en el mercado nacional, se consultó el Banco de Información Económica (BIE) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI),³⁴ en donde se desglosan los datos de las industrias manufactureras desde el año 2007. En las Tablas 3.1 a 3.3 se confinan los datos obtenidos de los diferentes lubricantes (lubricante automotriz, de uso industrial o motor diesel), donde se muestran las cantidades de aceite lubricante virgen y su respectivo valor en el mercado.

Como se observa en las Tablas 3.1 y 3.2, para los aceites lubricantes de uso automotriz y diesel, las cantidades producidas en miles de litros varían considerablemente durante el período 2007-2013, lo que sugiere una producción inestable de aceite. Sin embargo, en la Tabla 3.3 para el aceite de uso industrial, la producción se mantiene más estable en este mismo período.³⁴ Aquí, es apropiado resaltar que en el año 2009, los tres tipos de aceite presentaron un decremento en su producción, lo que sugiere un exceso en la misma, posterior a este año la demanda de aceite presentó incrementos importantes, siendo el aceite de uso industrial el que mostró el nivel de producción con menor variación en los siguientes años, con estos datos se puede asumir que la demanda interna del país, actualmente, no es la suficiente.

Tabla 3.1. Volumen y valor de producción de aceite lubricante de motor automotriz.

Producto elaborado	Producción	
Aceite Lubricante automotriz	Cantidad Miles de litros	Valor Miles de pesos
Año		
2007	287,908	5,122,585
2008	260,785	5,692,193
2009	242,208	6,070,910
2010	261,345	5,872,489
2011	247,355	6,634,554
2012	242,327	6,924,922
2013	244,273	6,824,974

Tabla 3.2. Volumen y valor de producción de aceite lubricante para diesel.

Producto elaborado	Producción	
Aceite Lubricante para motor Diesel	Cantidad Miles de litros	Valor Miles de pesos
Año		
2007	126,622	2,244,798
2008	130,756	2,686,365
2009	123,541	2,666,488
2010	134,234	3,093,488
2011	128,343	3,244,931
2012	101,940	2,918,288
2013	109,547	3,080,695

Tabla 3.3. Volumen y valor de producción de aceite lubricante de uso industrial.

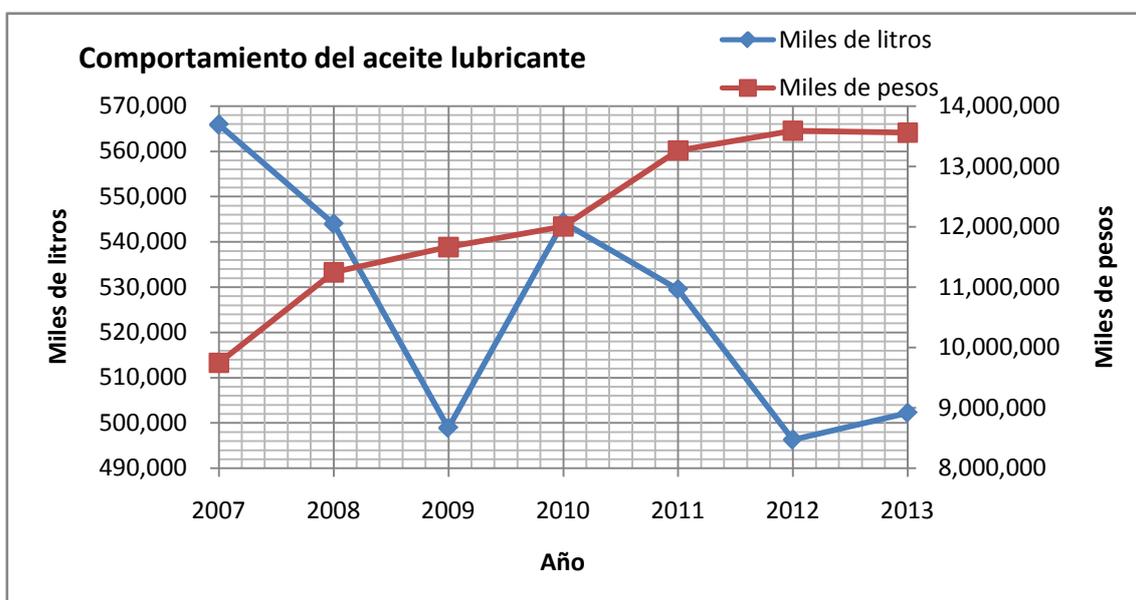
Producto elaborado	Producción	
Aceite Industrial	Cantidad Miles de litros	Valor Miles de pesos
Año		
2007	151,317	2,380,153
2008	152,383	2,866,688
2009	133,145	2,926,558
2010	148,749	3,037,196
2011	153,832	3,382,751
2012	151,992	3,749,745
2013	148,416	3,655,300

En la Tabla 3.4 se presenta el resumen del mercado nacional total de aceites lubricantes y en el Gráfico 3.1, se observa el comportamiento que presentan los datos para cada año.

Tabla 3.4. Volumen y valor de producción de los aceites lubricantes.

Cantidad total de aceite lubricante		
Producto elaborado	Producción	
Aceite lubricante	Cantidad en miles de litros	Valor en miles de pesos
Año		
2007	565,847	9,747,536
2008	543,924	11,245,246
2009	498,894	11,663,956
2010	544,328	12,003,173
2011	529,530	13,262,236
2012	496,259	13,592,955
2013	502,236	13,560,969

Gráfico 3.1. Comportamiento del aceite lubricante.



Como se observa en el Gráfico 3.1, las cantidades generadas de aceite lubricante presentaron una disminución considerablemente alta en el año 2009 y 2012, debido principalmente a un problema ocurrido en la refinería Ing. Antonio M. Amor, en Salamanca, Guanajuato, que es la principal planta productora de lubricantes en el país. Una justificación que se puede adjudicar para este problema, con relación al año 2009, es la adquisición de una deuda externa con organismos financieros internacionales como el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo en el año 2009; para el año 2011 y 2012, se propone que el decaimiento fue generado por procesos políticos internos en donde se vio involucrada la modificación a leyes y reformas energéticas que

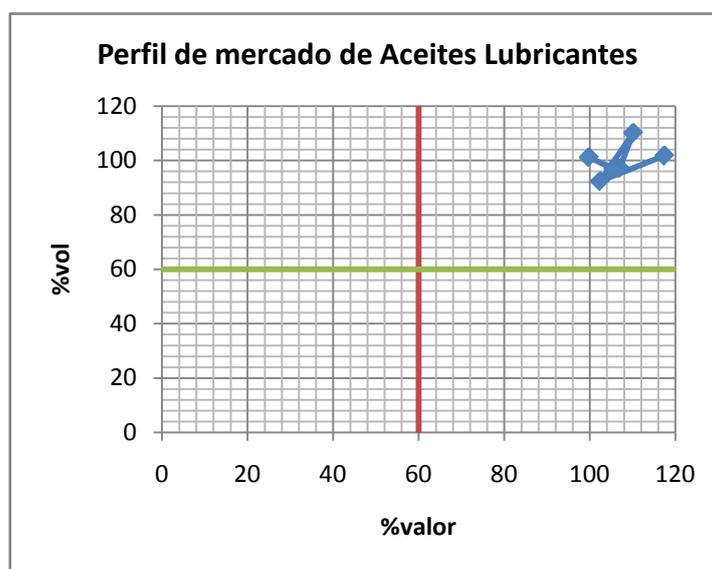
podieron favorecer solo a algunos sectores o mediante un decremento al costo del aceite lubricante importado, lo que generó, posiblemente, una menor producción de aceite lubricante interno y una mayor producción de otros bienes.

Como se observa en la Tabla 3.5 y el Gráfico 3.2, el perfil del aceite lubricante se encuentra en el primer cuadrante, indicándonos que el aceite lubricante crece en precio y en volumen, sin embargo, el volumen producido no satisface la demanda de consumo. Actualmente la refinería de Salamanca, Guanajuato, para solventar el problema de producción, implantará dos trenes más de aceites lubricantes, aunque esto no asegurará la demanda actual.³⁵

Tabla 3.5. Datos referentes para la realización del Gráfico 3.2.

Año	Cantidad Miles de litros	Miles de pesos	% vol	% valor
2007	565,847	9,747,536	100	100
2008	543,924	11,245,246	96.12563113	115.3650112
2009	498,894	11,663,956	91.72126988	103.7234401
2010	544,328	12,003,173	109.1069446	102.90825
2011	529,530	13,262,236	97.28141856	110.4894181
2012	496,259	13,592,955	93.71688101	102.4936896
2013	502,236	13,560,969	101.2044114	99.76468693

Gráfico 3.2. Perfil del mercado nacional.



3.3 Mercado Internacional

El “Anuario estadístico del comercio exterior” del INEGI,³⁶ nos permite conocer los datos del mercado internacional y, a diferencia del mercado interno, en este caso solo se encuentran los datos referentes hasta el año 2011. En las Tablas 3.6 y 3.7 se muestran los datos obtenidos de aceites lubricantes totales, es decir, para motor automotriz, diesel y uso industrial para el período comprendido del año 2006 al 2011.³⁷

Tabla 3.6. Cantidades de aceites lubricantes importados terminados.

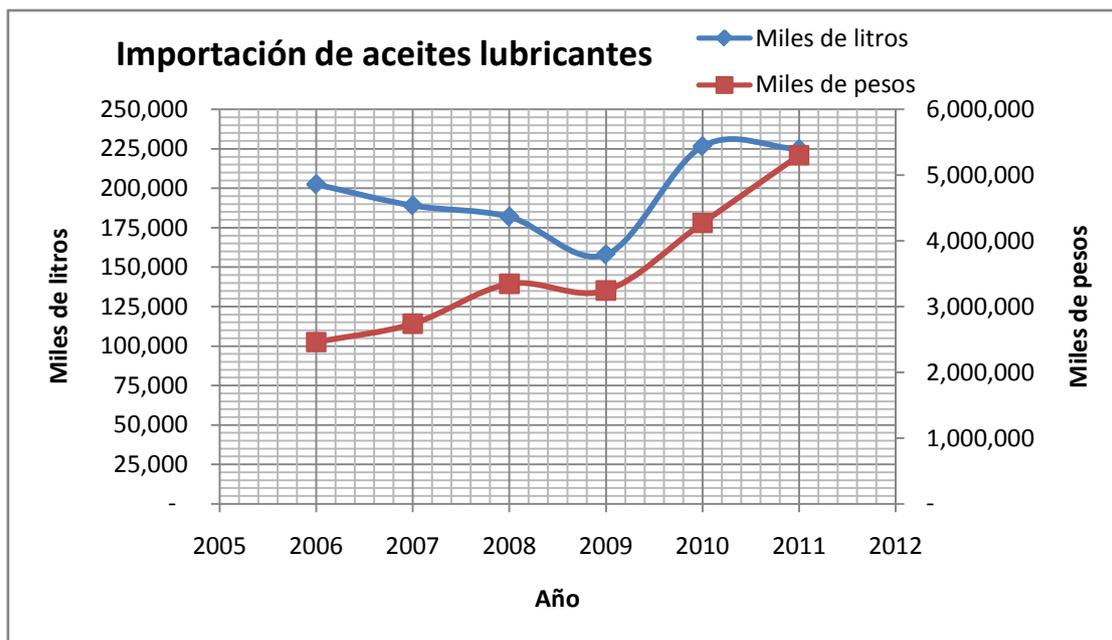
Importación de aceites lubricantes terminados		
Año	Cantidad, litros	Valor, pesos
2006	202,464,939	2,462,956,545
2007	189,012,794	2,741,018,162
2008	181,877,331	3,347,829,569
2009	157,944,055	3,245,175,797
2010	226,501,262	4,271,803,765
2011	224,773,995	5,300,058,645

Tabla 3.7. Cantidades de aceites lubricantes exportados terminados.

Exportación de aceites lubricantes terminados		
Año	Cantidad, litros	Valor, pesos
2006	13,956,974	198,833,406
2007	12,276,587	217,822,172
2008	13,034,871	253,686,126
2009	18,922,524	403,846,667
2010	34,432,703	688,254,109
2011	45,205,550	670,869,025

En el mercado internacional las importaciones representan el transporte legítimo de bienes y servicios provenientes de otros países, con el objetivo de ser usados o consumidos en el interior del propio país. Las importaciones pueden ser cualquier producto o servicio recibido dentro de la frontera de un estado con propósitos comerciales. Las importaciones permiten a los ciudadanos adquirir productos que en su país no se producen, o que son más baratos o de mayor calidad, beneficiándolos como consumidores. En la Tabla 3.6 y en el Gráfico 3.3, se presentan las importaciones realizadas en los últimos años.³⁶

Gráfico 3.3. Importación de aceites lubricantes.



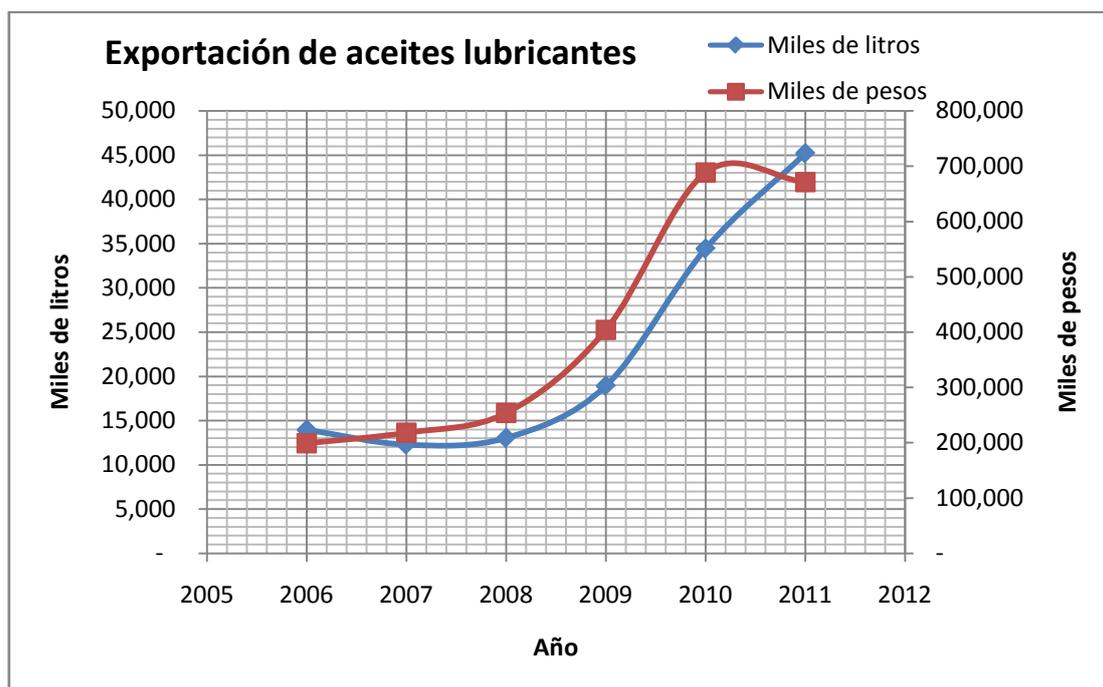
Como se aprecia en el Gráfico 3.3, México es considerado un país importador de aceites lubricantes, a través de los años se ha mantenido en la necesidad de comprar estos aceites a gran escala; sin embargo, en los años 2007 y 2008, se presentó una disminución en la importación del aceite, donde se importó un 6.6 y 10.16 %, de manera respectiva, con relación al año 2006 y presentándose, en el año 2009, una drástica disminución en la importación, donde se dejaron de importar 44,520 litros. Efecto que sea adjudica a la deuda externa adquirida con organismos financieros internacionales como el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo, precedente que no se manifestó en los años ochenta e incluso después del colapso del peso en 1995, cuando el país había recibido el mayor programa de asistencia, con ello descendió el valor de la producción total de bienes y servicios.³⁸ En los siguientes años el país recurrió nuevamente a las importaciones de los países que se mencionan en el anexo C, Tabla C1, a pesar de que la producción en el año 2010 fue alta, esto de acuerdo al Gráfico 3.1.

En este sentido, se observa que México es dependiente de una sola fuente de producto; esto es, la refinería de Salamanca, que es la única que posee la tecnología para abastecer de aceites lubricantes al país y más, sin embargo, no genera las cantidades suficientes para satisfacer la demanda actual, motivo que lleva a buscar otras fuentes de abastecimiento. Es por ello que la reutilización o re-refinamiento de aceites lubricantes,

además de ser un proceso benéfico para el ambiente, genera un producto de alto consumo en el país.

Por otra parte la exportación se refiere a cualquier bien o servicio enviado al extranjero o a cualquier parte del mundo pretendido para su uso o consumo con propósitos comerciales. En la Tabla 3.7 y Gráfico 3.4, se pueden observar los datos consultados referentes a la exportación en el país durante los últimos años.³⁷

Gráfico 3.4. Exportación de aceite lubricante.



Como se observa en el Grafico 3.4, el mercado mexicano presenta un crecimiento en las exportaciones del aceite lubricante, en donde los países compradores han mantenido su constante inversión, ver anexo C, Tabla C2. Al respecto, es oportuno pensar, que es más redituable para México exportarlo que venderlo en el propio país, esto debido a los precios internacionales. No obstante, la cantidad exportada a otros países representa una minoría en comparación con las macro-cantidades que se importan cada año. Haciendo de estos volúmenes anuales de aceite lubricante importados indispensables para abastecer a los automóviles e industrias en general.

3.4 Aceites lubricantes regenerados

Para la consulta de estos datos se recurrió al “XV Censo Industrial edición 1999, e Industrias manufactureras, censos económicos 2004”, ya que solo en estos censos se desglosan las cantidades reutilizadas (re-refinadas) de aceites lubricantes en el país, Tablas 3.8 y 3.9.³⁹

Tabla 3.8. Producción y ventas netas año 1999.

Productos elaborados (Aceites lubricantes)	Unidad de medida	Producción			Ventas netas			
		Cantidad	Valor	Precio medio	Total		Mercado nacional	Mercado extranjero
			Miles de pesos	Pesos	Cantidad	Valor		
							Miles de pesos	
Automotriz	Miles de Lts	53,980	161,917	2,999.574	53,918	161,847	156,373	5,474
Industrial	Miles de Lts	6,091	35,607	5,845.838	6,682	40,044	40,044	---
Total	Miles de Lts	60,071	197,524	8,845.412	60,600	201,891	196,421	5,474

Tabla 3.9. Producción y ventas netas año 2004.

Productos elaborados (Aceites lubricantes)	Unidad de medida	Producción			Ventas netas			
		Cantidad	Valor	Precio medio	Total		Mercado nacional	Mercado extranjero
			Miles de pesos	Pesos	Cantidad	Valor		
							Miles de pesos	
Automotriz	Miles de Lts	85,589	532,183	4,879.683	85,589	632,183	616,287	15,896
Industrial	Miles de Lts	39,353	336,651	8,554.646	39,353	336,651	330,817	5,834
Total	Miles de Lts	124,942	868,834	13,434.329	124,942	968,834	947,104	21,730

De acuerdo a lo mostrado en las Tablas 3.8 y 3.9, se aprecia que el empleo de aceite lubricante proveniente de la fuente automotriz o industrial ha aumentado considerablemente, su reutilización ha generado un aumento considerable en sus ventas debido a un crecimiento en la producción de éstos. Debido a ello, es prioritario generar e implementar tecnologías para poder llevar a cabo el re-refinamiento del aceite lubricante.

Como se observa en el Gráfico 3.5, para el período comprendido del año de 1998 al 2003, el comportamiento en la producción de aceite regenerado ha aumentado de manera considerable así como la generación de capital monetario. Además, en el Gráfico 3.6, se anticipa el comportamiento que tendría el aceite lubricante regenerado en los siguientes años, aquí, de acuerdo a la proyección de los datos por el INEGI, el re-refinamiento de aceite lubricante es indispensable para generar una economía más viable en esta área y para que México deje de ser un país dependiente de una sola refinería y se convierta en un mayor exportador y un menor importador, esto al generar un incremento hasta del 6 % del aceite lubricante reutilizado, produciendo al menos 12,947 miles de litros de este aceite por año.

Gráfico 3.5. Comportamiento del aceite lubricante regenerado.

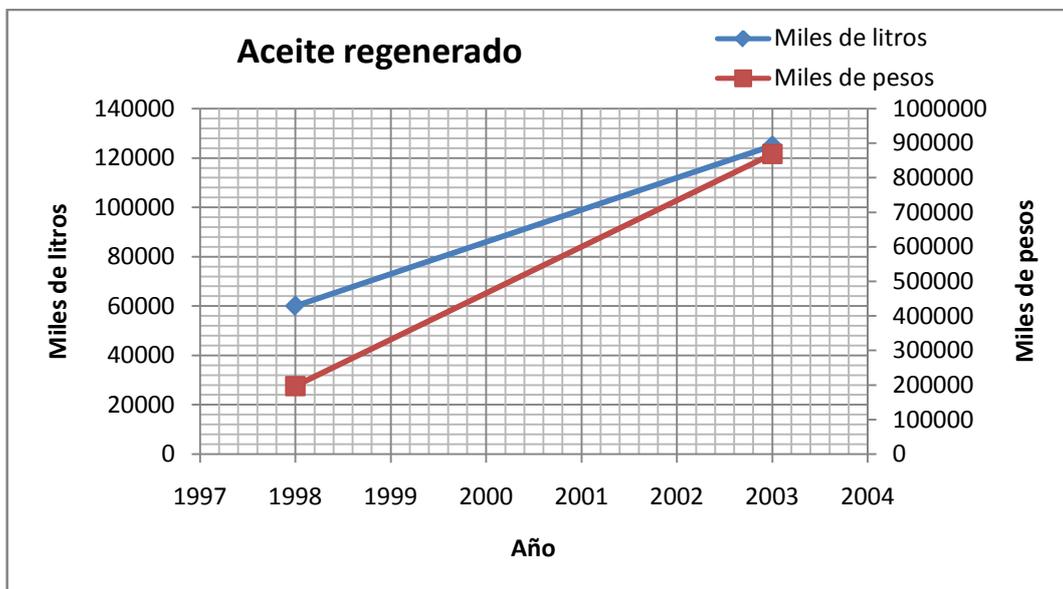
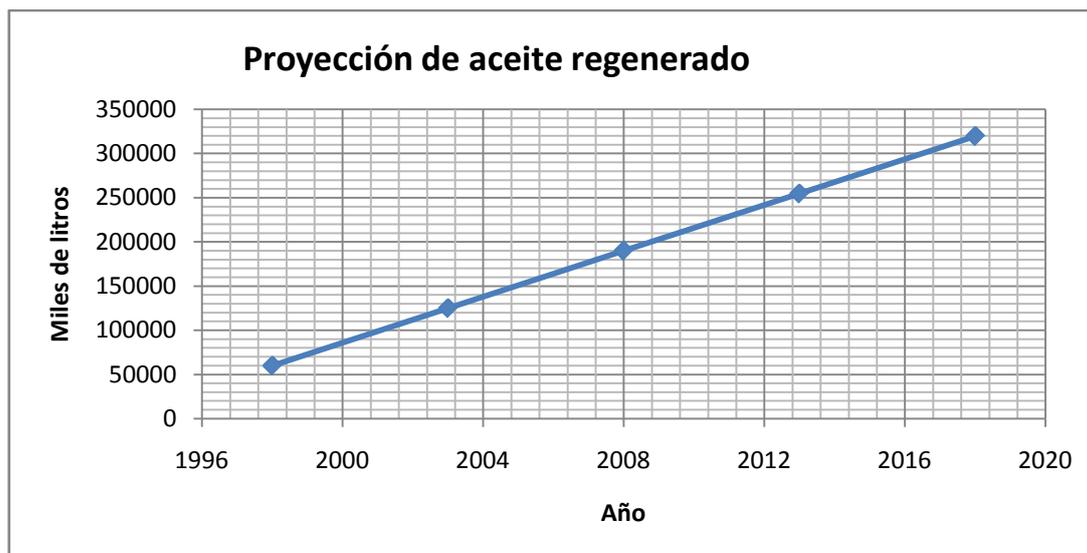


Gráfico 3.6. Proyección en miles de litros de aceite regenerado.



Por otro lado, en la Tabla 3.10, se muestran las cantidades totales de aceite lubricante usado en México, tomando en cuenta las exportaciones e importaciones, así como las cantidades que permanecen en el país cada año. También, en la Tabla 3.11 se muestra la comparación entre las cantidades utilizadas anualmente contra las reutilizadas. Así, de esta manera podemos notar que las cantidades reutilizadas hasta el año 2011 se encuentran dentro de lo pronosticado por el INEGI; sin embargo, es muy poca la cantidad reutilizada en comparación con las cantidades totales usadas en el país, cifras que no representan un gran ventaja para el ambiente puesto que se desconoce el destino final del aceite, lo que puede generar consecuencias adversas en el mismo.

Tabla 3.10. Aceites lubricantes utilizados anualmente.

Aceites lubricantes utilizados en México	
Año	Cantidad Miles de litros
2007	742,583.2
2008	712,766.4
2009	637,915.5
2010	736,396.5
2011	709,098.4

Tabla 3.11. Aceites lubricantes sin regenerar anualmente.

Resumen de los aceites lubricantes en México			
Año	Cantidad utilizada Miles de litros	Cantidad reutilizada Miles de litros	Cantidad sin reutilizar Miles de litros
2007	742,583.2	176,838.8	565,744.4
2008	712,766.4	189,813	522,953.4
2009	637,915.5	202,787.2	435,128.3
2010	736,396.5	215,761.4	520,635.1
2011	709,098.4	228,736	480,362.4

Como se observa en la Tabla 3.11, el volumen sin reutilizar es muy grande, si en México existiera la tecnología para regenerar todo este aceite, como se mencionó anteriormente, se podría generar un mayor porcentaje de aceite lubricante reutilizado (mayor al 6 % por año), se podría evitar la importación del mismo en un menor tiempo, la exportación del aceite aumentaría y, se dejaría a un lado la dependencia hacia la refinería de Salamanca. Sin embargo, actualmente, es un tema considerado no prioritario, debido a que el volumen de aceite lubricante no reutilizado es quemado para generar electricidad, lo que conlleva a emitir gases contaminantes al medio ambiente o son vertidos al drenaje.

CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE RE-REFINAMIENTO

4.1 Generalidades

En este capítulo, se hace una descripción del proceso de cada una de las tecnologías utilizadas a nivel mundial para el re-refinamiento del aceite lubricante usado, con el fin de conocer sus características principales y operaciones involucradas para su funcionamiento, así como las características del producto final.

4.2 Tecnologías de reprocesamiento

De acuerdo a las especificaciones de la ASTM, se indica que el aceite usado requerirá una reducción del 85 % en el contenido de sedimentos de fondo y agua, 90 % en la reducción de la concentración de sedimentos y una reducción similar en el contenido de cenizas.⁴⁰ Tales reducciones pueden ser logradas por el mezclado de aceite usado con aceite virgen o por tratamiento del aceite con algunas técnicas de separación. Por lo tanto, el objetivo de las tecnologías de reprocesamiento es remover la mayoría de los contaminantes, los cuales pueden causar daños al ambiente.⁴¹ Algunas de las técnicas o métodos de pre-tratamiento⁴² se enuncian a continuación:

- Asentamiento de partículas o sedimentación.
- Centrifugación.
- Filtración.
- Calentamiento.

La naturaleza de la técnica de procesamiento dependerá del destino que se le quiera dar al aceite usado, su composición y las regulaciones que gobiernan su uso. Todo ello para remover agua, sólidos y otras sustancias. En la Tabla 4.1, se muestran los efectos de los tratamientos físicos sobre algunos contaminantes del aceite usado. En general, los datos indican que apreciables cantidades de agua y sedimentos son removidos por sedimentación, seguidos por filtración o centrifugación. Una extracción con disolvente asegura un mayor removimiento de sedimentos, además de agua y plomo.⁴³

Tabla 4.1. Efecto del reprocesamiento sobre las propiedades del aceite usado, % volumen.

Propiedad física				
Tratamiento	Agua	Sedimentos	Cenizas	Plomo
Sin tratamiento	8	5	3	1
Sedimentación	1	2.5	2.3	0.9
Centrifugación	1	1.7	1.5	0.75
Extracción con disolvente ^a	0	0.3	0.3	0.1

^aHexano y 2-propanol.

Considerando los resultados mostrados en la Tabla 4.1, puede observarse que algunos de los contaminantes son afectados por los tratamientos en las tecnologías de reprocesamiento, además muchos de los contaminantes, no mostrados en la tabla anterior, los cuales son solubles en el aceite, pueden no ser afectados por cualquier operación de reprocesamiento. Por ello, los métodos de reprocesamiento son útiles para remover agua, sólidos y sedimentos, motivo por el cual han llegado a ser consideradas como tecnologías de pre-tratamiento. Sin embargo, estas tecnologías de pre-tratamiento son muy útiles en el tratamiento de aceites lubricantes industriales.²²

4.3 Tecnologías de re-refinamiento

La industria del re-refinado no es nueva, ha existido desde 1990 en Europa, donde uno de los primeros impulsos para la recuperación del aceite lubricante usado, fueron los bajos suministros del crudo y el alto costo del crudo importado.

Por otra parte, en los Estados Unidos el re-refinamiento del aceite usado data desde la primera guerra mundial, donde el aceite re-refinado fue exitosamente usado en aviones militares. La industria prospero y creció rápidamente durante los años 40's y 50's. Para el año de 1960, la industria contenía aproximadamente 150 re-refinerías produciendo cerca de 300 millones de galones de aceite lubricante re-refinado, casi el 18 % del aceite lubricante necesitado en los E.U.^{44,45} Actualmente en los E.U., existen menos de 16 re-refinerías generando menos de 300 millones de galones de aceite re-refinado por año. Al respecto, a continuación se muestran algunas razones que han contribuido a esta disminución:

- Bajos precios del crudo.
- Poco apoyo del gobierno.
- Estrategias de recolección.
- Altos costos de los procesos.
- Especificaciones cada vez más demandantes para el reuso de materiales.

Todos estos factores se han combinado para dar como resultado un significativo decline de la industria del re-refinamiento.

Los procesos de producción de una base lubricante limpia, re-refinada y de alta calidad, principalmente empiezan con un paso de pre-tratamiento, el cual puede ser la aplicación de calor y filtración, seguida por uno de los siguientes procesos: pre-flash o destilación atmosférica, destilación a vacío, tratamiento con arcilla o terminado con hidrógeno; extracción con disolventes, entre otros. En general, los análisis de aceites lubricantes re-refinados, muestran las siguientes características de los procesos de re-refinamiento:

- La mayoría de los procesos de re-refinamiento tienen un rendimiento promedio entre el 70 y 90 %.
- Casi todos los procesos de re-refinamiento generan aceites lubricantes sin los siguientes componentes: agua, cenizas de carbón, metales contaminantes, asfáltenos, halógenos, etc.
- Los aceites re-refinados se desempeñan de igual manera a los aceites vírgenes.⁴⁶

4.4 Proceso de la tecnología ácido-arcilla

El proceso ácido-arcilla, había representado durante mucho tiempo uno de los medios más adecuados para recuperar aceite lubricante básico a partir de aceite lubricante gastado. Es el proceso más utilizado por las plantas de regeneración en la India, no así en los Estados Unidos y en Europa (Figura 4.1 a y b). Inicialmente, el tratamiento comprende un lavado cáustico del aceite seguido de una adición de arcillas adsorbentes a temperatura elevada, seguido de una destilación; sin embargo, la presencia, cada vez en mayor proporción, de aditivos, justificaron la inclusión de ácido sulfúrico, para producir un aceite regenerado de mayor calidad.

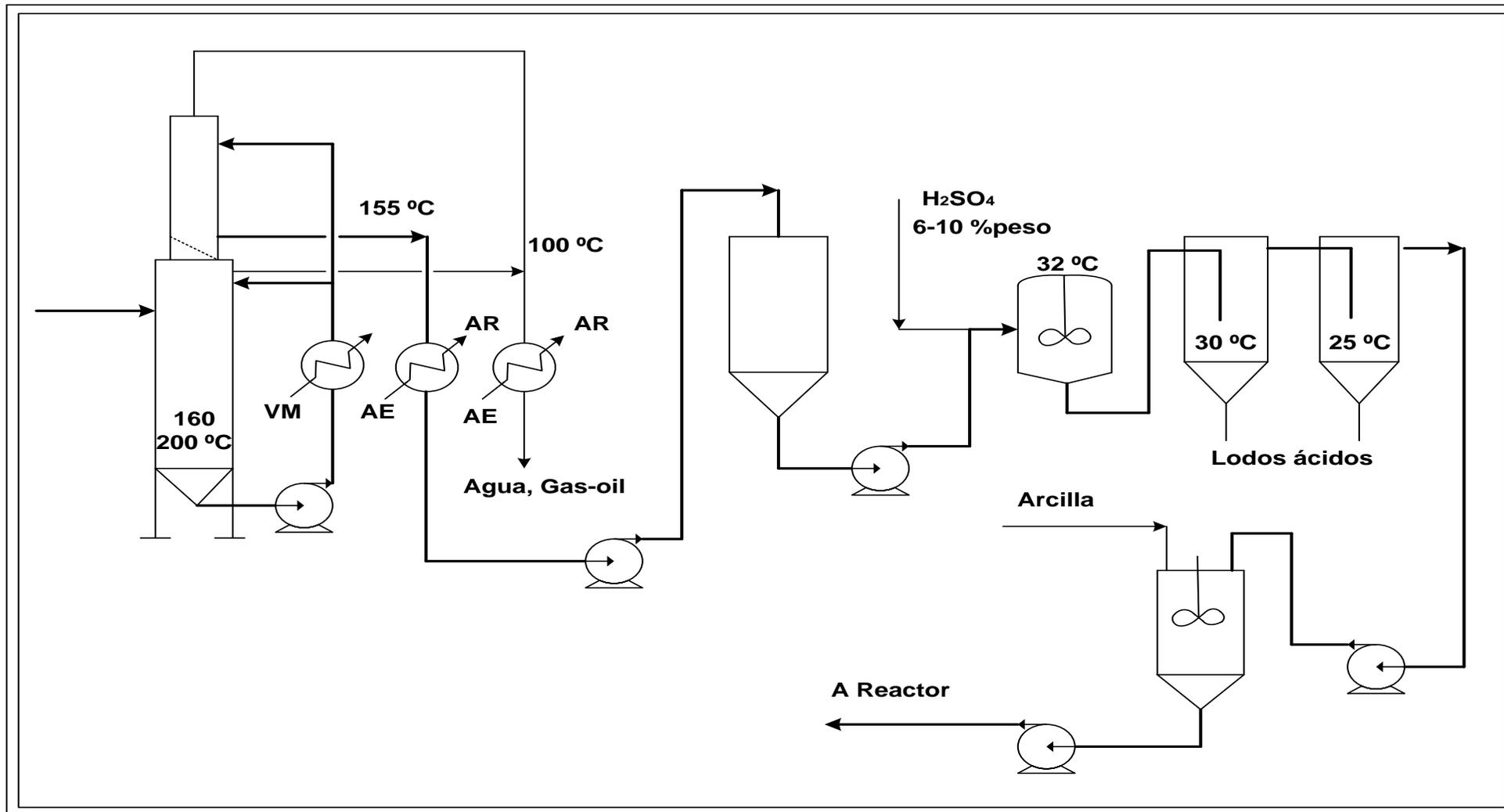


Figura 4.1a Diagrama de proceso de la tecnología acido-arcilla.

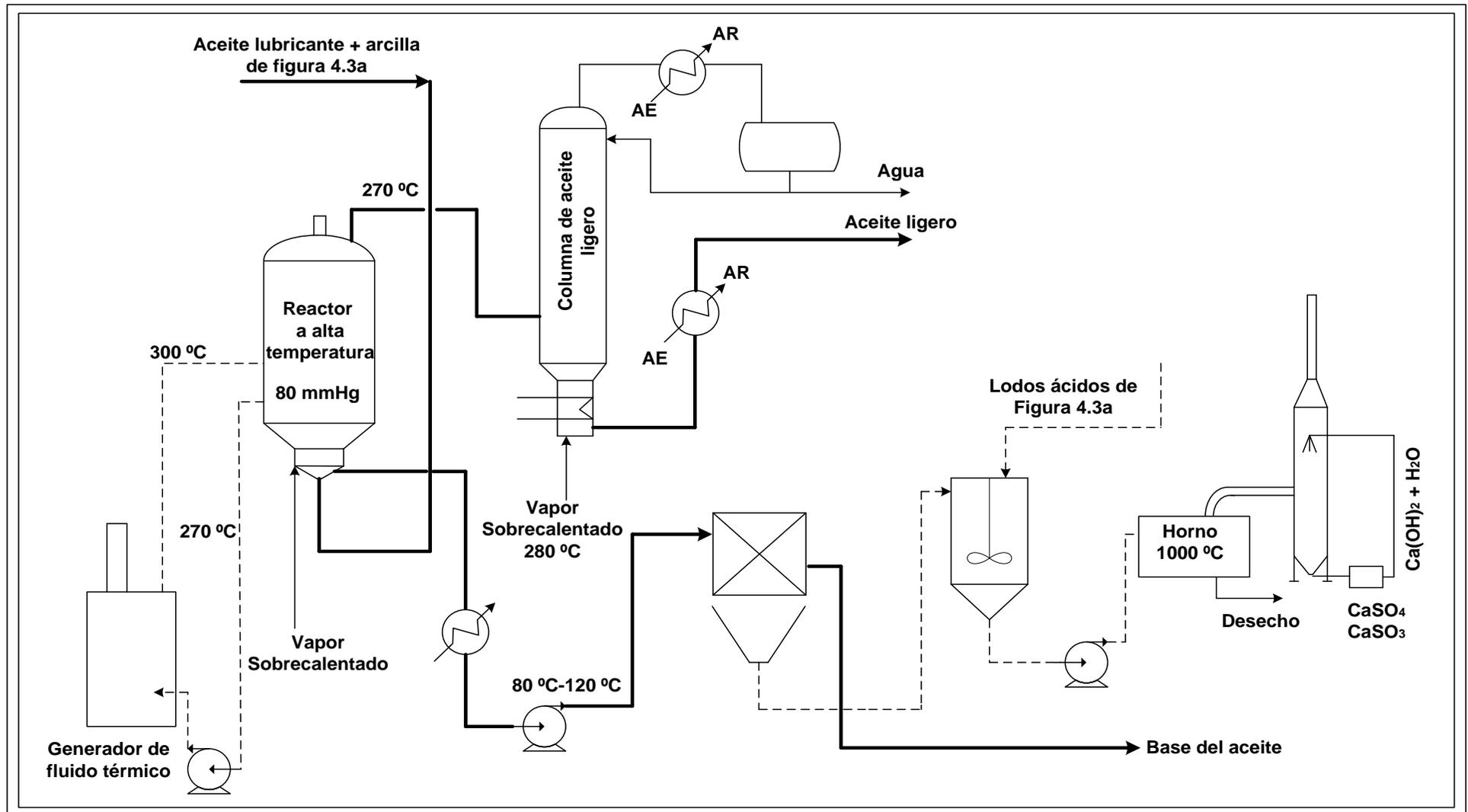


Figura 4.1b. Diagrama de proceso de la tecnología ácido-arcilla.

Después de una filtración rigurosa para eliminar partículas, por ejemplo >3 mm, el aceite es procesado. El proceso inicia con una destilación atmosférica, a una temperatura de 160 a 200 °C, esta columna se basa en dos secciones: a) En la sección de domos, se separa el agua e hidrocarburos ligeros del aceite lubricante y b) En la sección de fondos, el aceite es bombeado a una parte superior de la columna con el fin de evitar un posible craqueo del aceite, además de asegurar una transferencia de calor en el intercambiador.⁴⁶ El aceite lubricante es enfriado a una temperatura cercana a los 30 °C, y posteriormente en un recipiente con agitación se mezcla con ácido sulfúrico de 92 a 93 % de concentración volumétrica.

El ácido actúa como un medio de extracción que permite la remoción de los asfaltenos, compuestos aromáticos, compuestos insaturados, aditivos y otros materiales indeseables presentes en el aceite usado, generalmente en forma de lodos muy densos.⁴⁷ Por lo cual se introduce en un decantador tipo cilindro-cónico, separándose del aceite en forma de precipitado, donde el tiempo de retención es de 24 h.

Posteriormente, el aceite decantado ligeramente ácido, se somete a un tratamiento con arcillas, tales arcillas consisten de materiales naturales procesados, tales como: Tierra fuller, bentonitas y attapulgitas. Algunas de estas arcillas se procesan por activación ácida y por otros métodos distintos, a fin de mejorar sus propiedades de adsorción. Aproximadamente 0.4 lb de arcillas son requeridas por cada galón de aceite procesado.⁴⁸

La mezcla se introduce a un reactor (Figura 4.1b) donde se calienta hasta los 300 °C y a una presión de 80 mmHg, obteniendo en la parte superior del reactor aceite ligero y en los fondos la base del aceite, la cual es enfriada a un máximo de 80-120 °C, para facilitar la siguiente etapa del proceso que es la filtración.⁴⁷ En la filtración se retienen las arcillas adsorbentes y las impurezas depositadas en ellas, obteniéndose un aceite lubricante con un color y olor deseados. Por último, los lodos ácidos y la arcilla usada son quemados en un horno equipado con un removedor de polvo y lavado con cal. Para ser llevado a una planta de producción de sulfatos. La cantidad total de desperdicios producidos en el proceso ácido-arcilla, se presentan a continuación:

- Agua de proceso: 130 kg/t de aceite usado.
- Producción de gas: 40 Nm³/t.
- Lodos ácidos: 170 kg/t.
- Arcilla usada (100 % aceite de retención): 31 kg/t.

El uso de este proceso ha sido drásticamente reducido por los altos costos y dificultades asociadas con el manejo de los grandes volúmenes de desperdicio de ácido y arcilla, que son subproductos del proceso. Por ejemplo, los lodos ácidos son producidos en una décima parte del flujo del aceite usado de alimentación. Además, los lodos contienen ácido sulfúrico, plomo, compuestos órgano-metálicos, sulfonatos y posiblemente algunos compuestos cancerígenos. Los lodos ácidos son también combustibles; sin embargo, no deberían ser quemados, debido a las altas concentraciones de óxidos de azufre (SO_x) y partículas muy finas que continen metales.⁴⁸

A diferencia de los lodos ácidos, las arcillas generadas por el proceso son básicas; éstas son basadas en compuestos polares tales como el oxígeno y compuestos orgánicos conteniendo nitrógeno. También poseen un alto contenido de aceite del 20 al 30 % pero con altos niveles de aditivos. Es por estos inconvenientes que el proceso ácido-arcilla, es ligeramente efectivo en el tratamiento del aceite usado. A pesar de estas desventajas, el proceso ácido-arcilla produce buena calidad de aceite. Resultados de simulaciones en laboratorio para este proceso muestran una eliminación total del 70 % de los elementos inorgánicos.²²

4.5 Proceso de la tecnología PROP

El proceso de re-refinación de aceites PROP, fue desarrollado en Raleigh, Carolina del Norte USA, por la compañía petrolera Phillips Petroleum, actualmente conocida como Phillips 66. PROP es un proceso en dos etapas el cual incorpora la desmetalización seguida por un hidrotreatmento catalítico, con el fin de generar un aceite de alta calidad, Figura 4.2 a y b.

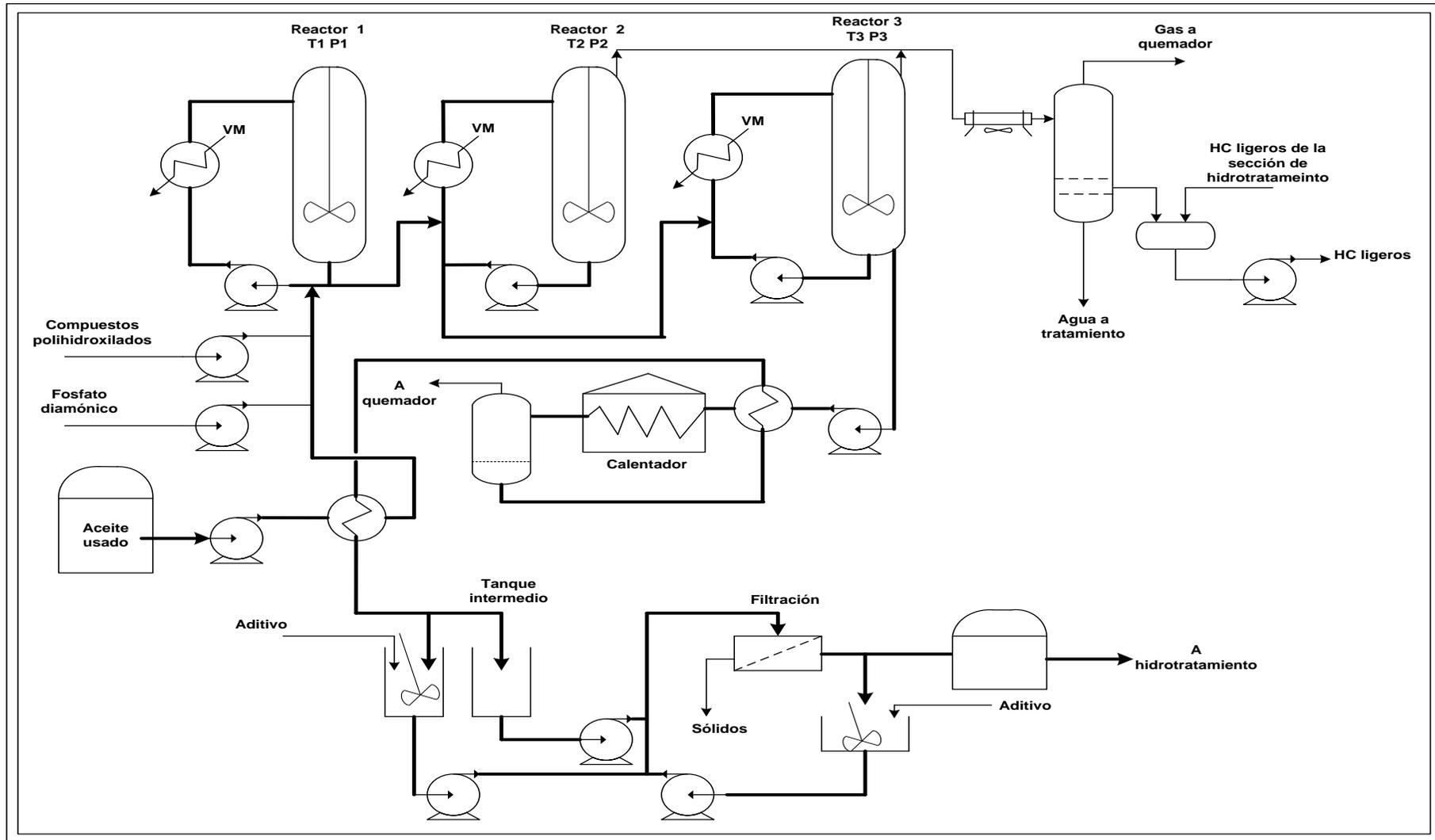


Figura 4.2a. Diagrama de proceso de la tecnología PROP, sección de desmetalización.

El aceite usado se precalienta antes de ser mezclado con una solución acuosa de fosfato diamónico y un agente químico (compuestos polihidroxilados o alquil-polihidroxi-amina), ambos por corrientes independientes. Cuando la mezcla está caliente se ingresa al primer reactor, aquí, se llevan a cabo reacciones en las cuales el agente químico desestabiliza las partículas dispersas y reacciona sobre los elementos metálicos para formar sales. Las condiciones del reactor son relativamente moderadas, la temperatura es de 150 °C y la presión se ajusta de tal manera de mantener la fase en estado líquido. Las sales resultantes de un ácido fuerte sobre hidróxido de amonio, son capaces de precipitar las partículas metálicas dispersas como sales. Los fosfatos o sulfatos metálicos formados son menos solubles en ambas fases (acuosa y orgánica) y pueden precipitar, el aceite que reaccionó llega a convertirse en lodos, con aproximadamente 1 % en el contenido de sólidos, el agua y los hidrocarburos ligeros son removidos en los domos de los reactores 2 y 3, los cuales son separados en un tanque flash.

Posteriormente, el contenido residual de zinc y fosforo, debido a la presencia de aditivos antioxidantes (dialquilditiofosfatos de zinc), son eliminados por un tratamiento térmico seguido por una filtración con aditivo.

Después, el aceite se envía a hidrotratamiento, para ser precalentado antes de ingresar a los reactores donde el aceite se pone en contacto con una cama de catalizadores de níquel-molibdeno con el fin de remover azufre, nitrógeno, óxidos, cloro y trazas de compuestos inorgánicos; de esta manera, el aceite sin contaminantes, es destilado para eliminar los componentes volátiles resultantes de la hidrogenación catalítica y ajustar el punto de flasheo. El hidrógeno recirculado es lavado con agua y sosa para remover compuestos como lo son el H₂S, NH₃ y HCl resultantes de las reacciones catalíticas.⁴⁶ El producto final es un aceite básico de alta calidad, listo para venderse al mercado.

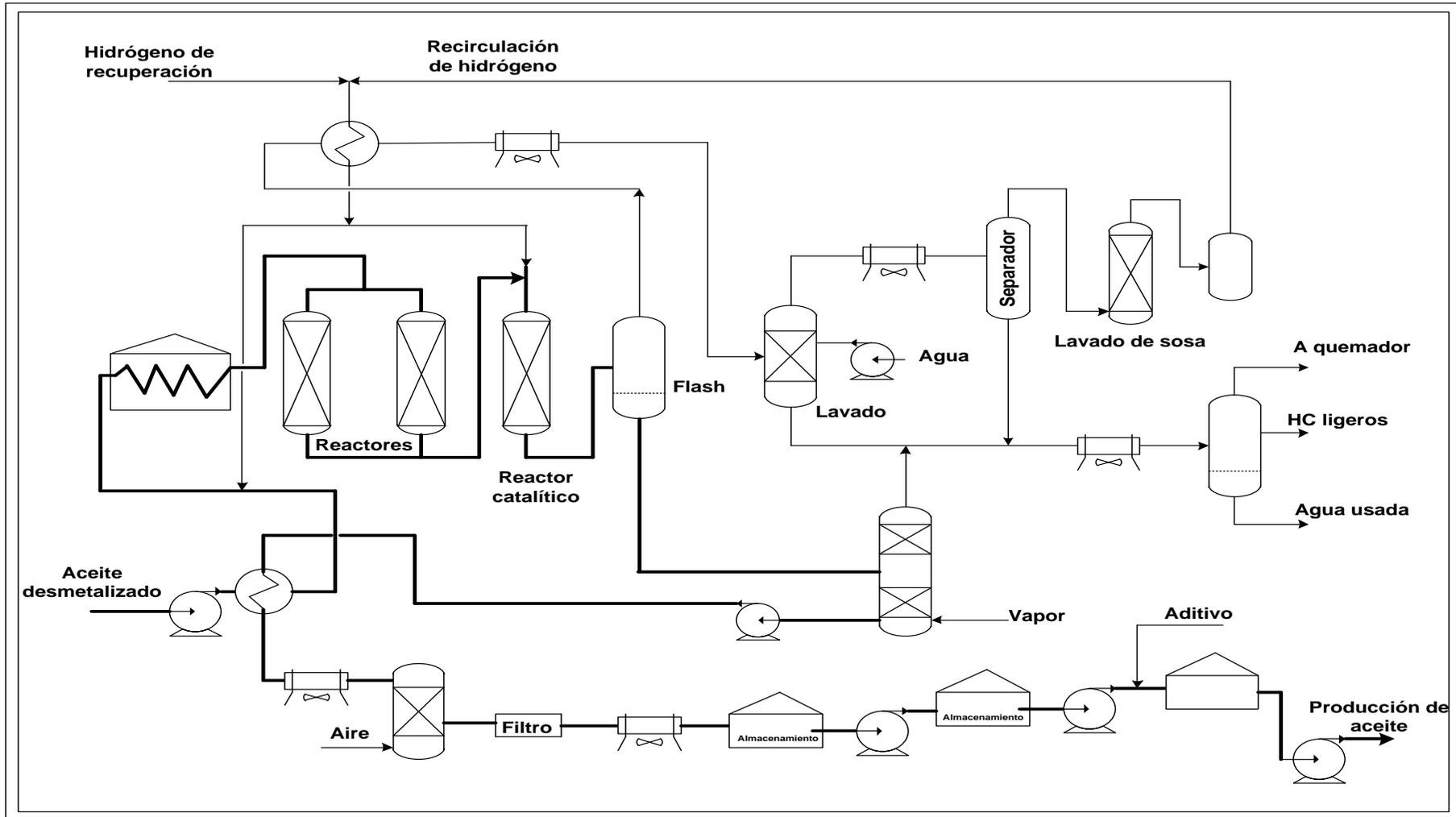


Figura 4.2b. Diagrama de proceso de la tecnología PROP, sección de hidrotratamiento.

Características del proceso:

La reacción de desmetalización ocurre a 150 °C, la presión se ajusta para hacer posible la eliminación de agua en los reactores desmetalizadores 2 y 3, la cantidad de agente químico es igual al 100 % en peso del contenido en cenizas del aceite lubricante. Este tipo de precipitación con agentes flocculantes es llevada en dos o tres etapas (tres reactores en este caso). El costo de los reactores químicos es moderado, ya que requiere una baja presión (cercana a la atmosférica). El aceite ya desmetalizado se calienta a 180 °C antes de la filtración, para posteriormente obtener el aceite regenerado.

Las condiciones del hidrotratamiento son:

- Temperatura: 360 °C.
- Presión: 50 bar.
- Hidrógeno recirculado: 214 L.

Como ventajas de esta tecnología sobresale la alta calidad de los aceites de base obtenidos, conteniendo menos de 10 ppm de metales. Además de los altos rendimientos equivalentes a un 90 % de aceite base. También, se tiene la ventaja de producir por una corriente lateral una gasolina (en el intervalo de diesel), la que puede ser usada como combustible. Además, la contaminación del aire producida por el azufre, del aceite usado, convertido a sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el paso de hidrogenación se ve reducida y con ello su toxicidad. Esta corriente no contiene muchos contaminantes, por lo tanto, puede ser enviada a sistemas municipales de eliminación, dependiendo de las regulaciones del estado.⁴⁷

Las desventajas que aquí se presentan están relacionadas con las corrientes de desperdicios sólidos (lodos de la desmetalización), ya que éstos contienen altos niveles de metales contaminantes. Estas corrientes no son aprobadas para eliminarlos en vertederos controlados y el catalizador gastado es tratado como un residuo peligroso. Además, los tratamientos previos del aceite lubricante antes de pasar a la etapa de hidrogenación, genera altos costos de operación, principalmente en la sección de desmetalización, aproximadamente del 25 al 35 % del costo total de operación de acuerdo a la capacidad de la planta, obteniéndose principalmente aceite pesado.⁴⁹

Con base a una alimentación de una tonelada de aceite usado o gastado, los consumos de servicios son los siguientes:

- Vapor a 10 bar: 444 kg/t.
- Agua de enfriamiento: 1.28 m³/t.
- Electricidad: 94 kWh/t.

Los análisis de la fracción pesada del aceite lubricante se confinan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Análisis de la base del aceite PROP.

Parámetro	Aceite usado	Aceite pesado tratado
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	92.8	51.6
Gravedad específica (kg/m ³)	897	877
Punto de flasheo (°C)	---	215
Punto de congelación (°C)	---	-15
Metales totales (ppm)	9,500	<12
Azufre (% peso)	0.44	0.03
Contenido de ceniza (% peso)	1.58	<0.01

4.6 Proceso de la tecnología KTI

Esta tecnología fue desarrollada por las compañías Kinetics Technology International y la compañía Gulf Science and Technology. El proceso KTI o también llamado KTI Relub Technology (Figura 4.3), se caracteriza por la incorporación de la destilación al vacío después de un pre-flash y el uso del evaporador de película delgada (thin film evaporator, TFE). Esta técnica ofrece la ventaja de retener las propiedades esenciales de los aceites lubricantes con un corto tiempo de residencia y un alto vacío en la columna. El diseño del evaporador facilita una pequeña caída de presión que crea un alto vacío y consecuentemente temperaturas más bajas que en otras tecnologías que involucra el empleo de columnas. Además, el tratamiento de hidrogenación asegura la eliminación de los elementos contaminantes del aceite usado.

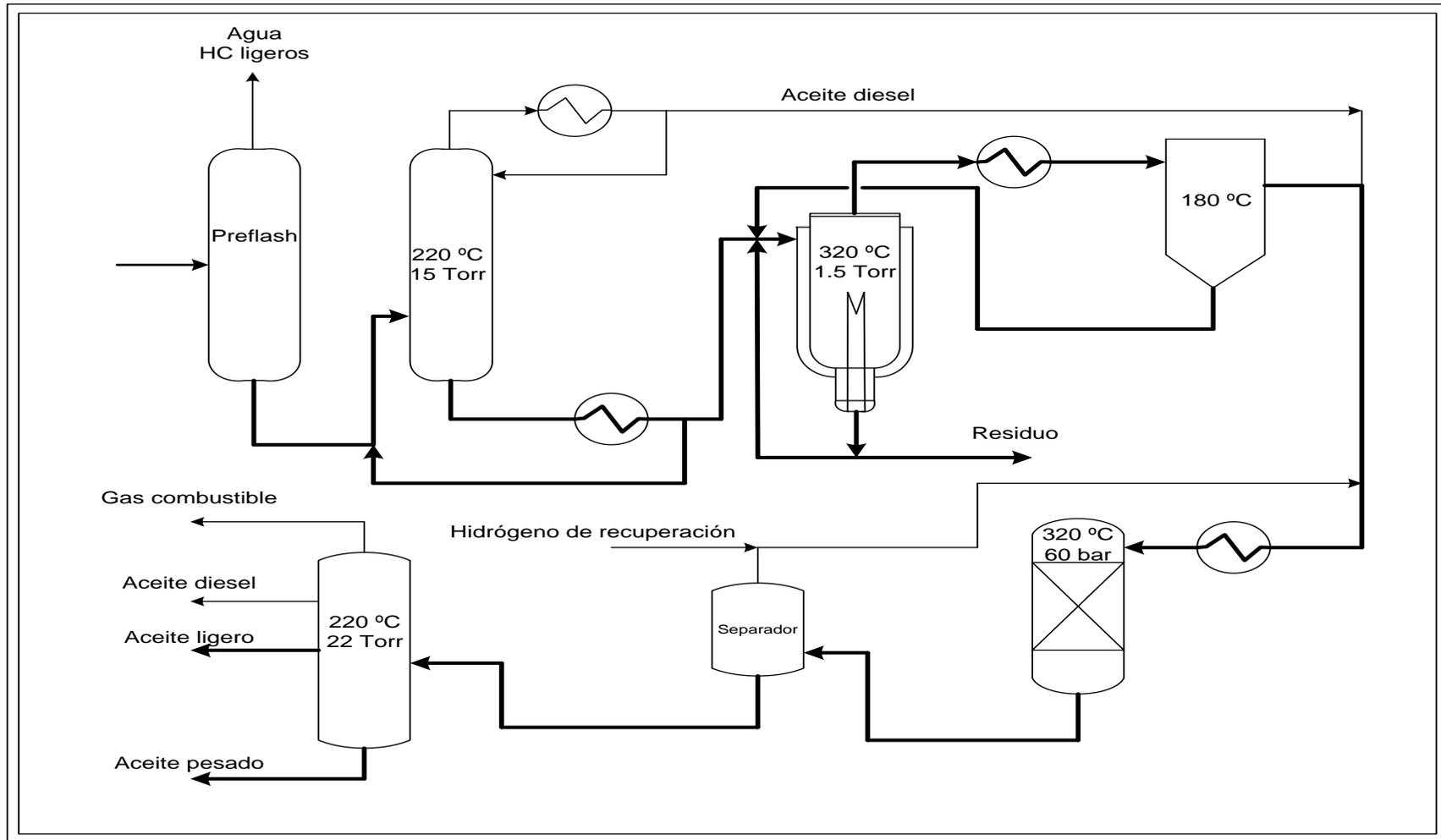


Figura 4.3. Diagrama de proceso de la tecnología KTI.

Dentro del pre-flash o destilación atmosférica, se separan los hidrocarburos ligeros (gasolina), agua, fenoles y glicol de la base del aceite, mediante la corriente de domos. El producto de fondos (la base del aceite), se introduce a la torre de vacío, la cual tiene como objetivo remover diesel por la parte superior de la torre, los fondos de la columna son calentados y enviados al TFE.

El TFE constituye la parte central del proceso ya que aquí se elimina el contenido de metales, los productos de polimerización y los asfaltenos del aceite base. Así, en los domos del evaporador, el aceite lubricante, sin estos contaminantes, es condensado y enviado a un recipiente caliente “hot soak vessel” y los fondos del evaporador son recirculados hacia la entrada del mismo. Una vez que se tiene el aceite libre de sus contaminantes, es mezclado con la corriente de aceite diesel y una corriente de gas rico en hidrógeno, el cual es alimentado al reactor de hidrotratamiento, calentándose la mezcla primeramente antes de hacer contacto a través del reactor de lecho catalítico fijo. En este paso se lleva a cabo la separación o reducción de otros contaminantes del aceite lubricante, como lo son compuestos de nitrógeno, cloro, oxígeno y uno de los contaminantes más importantes, azufre. Cabe mencionar que esta etapa se lleva a cabo una mejora en el color y olor del aceite y, no existe ninguna descomposición o rompimiento del aceite. El exceso de gas que no ha reaccionado se recircula, adicionándole una cierta cantidad de hidrógeno. Después, el aceite tratado se introduce a una torre fraccionadora, en la cual los remanentes ligeros son eliminados, teniendo como producto final la base del aceite lubricante, que es tratado con los aditivos para obtener un aceite lubricante con las especificaciones correctas.

La base del aceite lubricante producido a partir de uno gastado, representa un 82 % con respecto a este último sobre base seca. Los residuos pesados de fondos como el producido en el TFE, representan el 8 % de la producción y pueden ser usados para fabricar productos de asfalto o bien pueden ser usados como combustible en hornos otro 10 % de la producción, son las fracciones más ligeras, por ejemplo agua, diesel y los hidrocarburos ligeros. Los diseñadores del proceso advierten que las especificaciones del producto pueden variar dependiendo de las condiciones de hidrogenación. Además, de que esta tecnología acepta PCB's y otros materiales peligrosos.

Los consumos de servicios para una alimentación de una tonelada de aceite usado o gastado, son:

- Vapor a 7 bar: 26.5 kg/t.
- Agua de enfriamiento: 2 m³/t.
- Electricidad: 94 kWh/t.
- Hidrógeno: 29 m³/t.
- Nitrógeno: 1.6 m³/t.
- Aditivos: 0.25 m³/t.

Como desventaja fundamental de este proceso se tiene la sensibilidad del tratamiento con catalizador, resultante de los contaminantes en el aceite usado.⁴⁹ Los análisis de las fracciones ligeras y pesadas de la base del aceite se muestran a continuación:

Tabla 4.3. Análisis de la base del aceite KTI.

Parámetro	Aceite ligero	Aceite pesado
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	22.7	86.1
Viscosidad a 100 °C (mm ² /s)	4.3	9.9
Gravedad específica (kg/m ³)	889.4	918.2
Punto de congelación (°C)	0	-6
TAN (mg KOH/g)	0.03	0.04
Azufre (% peso)	0.4	0.4
Contenido de ceniza (% peso)	<0.01	<0.01

4.7 Proceso de la tecnología BERC

La tecnología BERC fue desarrollada por la Bartlesville Energy Research Center en E.U., que posteriormente paso a ser el Instituto Nacional del Petróleo y Estudios en Energía (National Institute of Petroleum and Energy Research, NIPER). Este proceso incorpora algunas tecnologías de la compañía KTI, pero además tiene la variación de adicionar un tratamiento con disolventes, Figura 4.4.

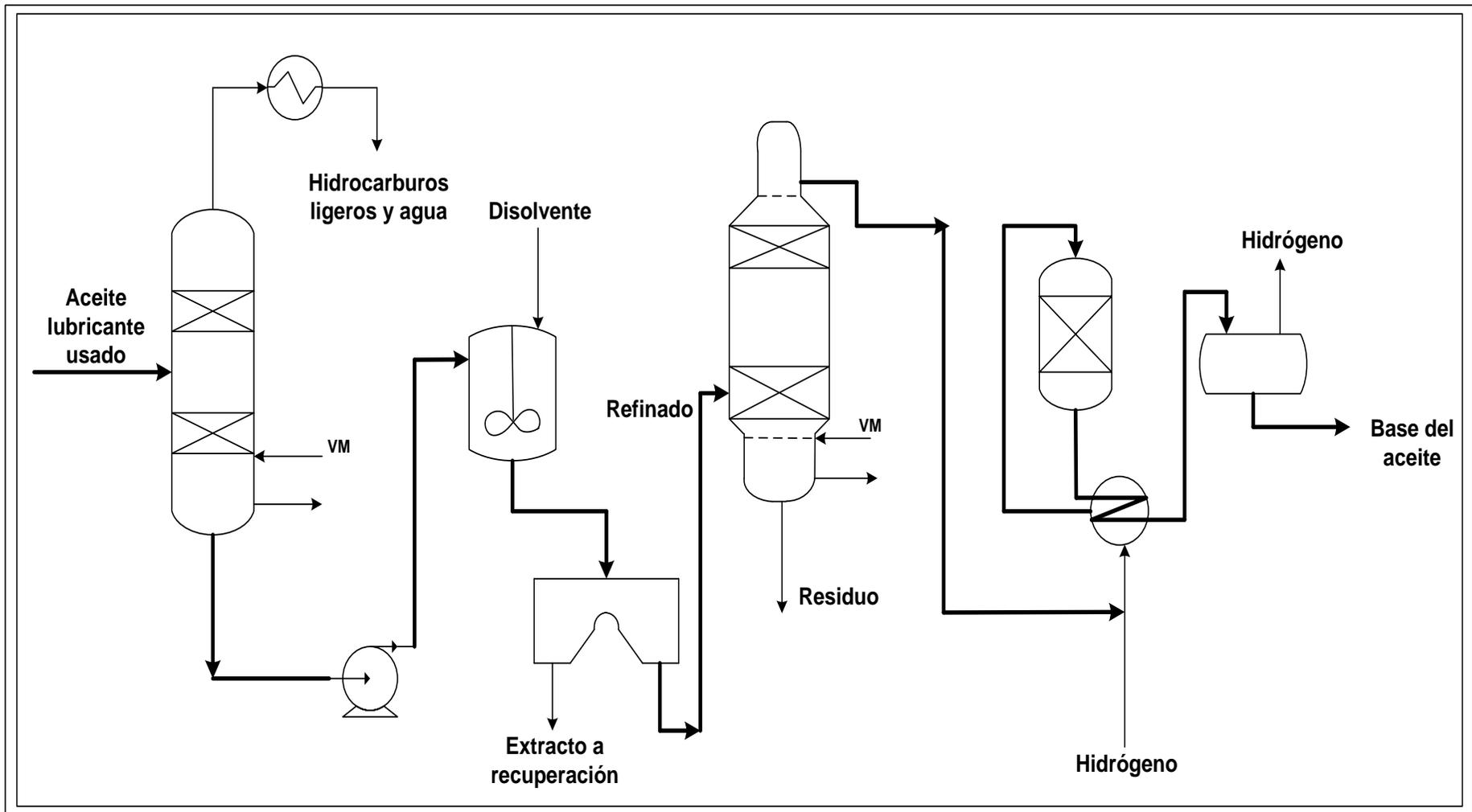


Figura 4.4. Diagrama de proceso de la tecnología BERC.

Como se describió en la tecnología KTI, el aceite lubricante usado se introduce a la torre de destilación atmosférica, con la función principal de separar los hidrocarburos y el agua del aceite base. En el proceso BERC, una vez realizada esta separación, el aceite lubricante es circulado a un tanque con agitación, donde se lleva a cabo la extracción, en la cual el aceite es tratado con una mezcla de disolventes: El sistema óptimo es una mezcla de 2-propanol, 1-butanol y metiletilcetona, en una relación 1:2:1 en volumen. Donde la relación mínima de disolvente y aceite usado resulta ser de 3:1. Por lo que la mezcla líquido-líquido proveniente de esta etapa se lleva a separación en un sedimentador centrífugo, del tipo tubular. Así, en este equipo se realiza la purificación del aceite lubricante usado, por medio de la diferencia de densidades, generando aceites lubricantes de calidad. El producto de la operación rico en disolvente es enviado a un sistema de recuperación y después es reusado. Posteriormente el aceite lubricante es destilado en la torre de vacío, esta torre produce un residuo en el intervalo de los combustibles. El aceite lubricante de domos es mezclado con un gas rico en hidrógeno, esta mezcla se calienta y pasa a través de un reactor de lecho catalítico fijo. Removiendo por último contaminantes críticos como el azufre, además de mejorar el olor y color del aceite lubricante.

En la configuración original del proceso BERC, el contacto con arcillas era usado como paso final para producir un aceite de alta calidad. Sin embargo, recientemente, NIPER evaluó la sustitución de las arcillas, por el hidrotratamiento como una sustitución para producir aceites lubricantes con un color más claro y una viscosidad aceptable.²⁰ Esta reconfiguración ofrece simplicidad de operación y un atractivo para el ambiente. Otras ventajas del hidrotratamiento son: Una simple operación continua, eliminación de tratamientos con arcilla y reducción del manejo de los sólidos. Además de que no es necesario un filtro en el hidrotratamiento aunque si es agregado, no es tan caro como resulta ser en el tratamiento con arcillas.

Entre las desventajas del hidrotratamiento se encuentran:

- Ligeros incrementos de costo en equipos debido a la hidrogenación, en comparación al tratamiento con arcillas.
- Elevadas temperaturas y presiones, que son condiciones de operación peligrosas.
- Ocasionales cierres de la planta, posiblemente resultantes de las excesivas pérdidas de hidrógeno de la unidad de almacenamiento criogénico.

- Requerimientos de energía adicional para mantener altas temperaturas y altas presiones.
- Disminución de la flexibilidad de operación, ya que el flujo debe ser relativamente constante.

Aunque el proceso BERC elimina muchos de los problemas asociados con el manejo de los lodos ácidos, la incorporación del hidrotatamiento produce dos corrientes de residuos, las que deben ser manejadas de manera adecuada. Estas corrientes son los lodos del disolvente y el residuo de la destilación a vacío. Aunque el residuo de vacío contiene menos contaminantes que los involucrados en la recuperación del disolvente, de igual manera deben ser manejados de una manera apropiada. Con relación a este tratamiento con disolventes, se mejora el rendimiento de los aceites lubricantes, de un 71 hasta un 75 %, así como sus propiedades físicas y los demás hidrocarburos obtenidos representan un 10 % de la producción. Sin embargo, los disolventes, así como el tratamiento de recuperación de los mismos representan costos adicionales.⁵⁰

4.8 Proceso de la Resource Technology

Muchas de las plantas en los Estados Unidos fueron transformadas de la tecnología Ácido-Arcilla a la tecnología Resource Technology Inc. (RTI), el proceso se basa en la destilación al vacío ciclónica y de un tratamiento con arcillas, Figura 4.5.

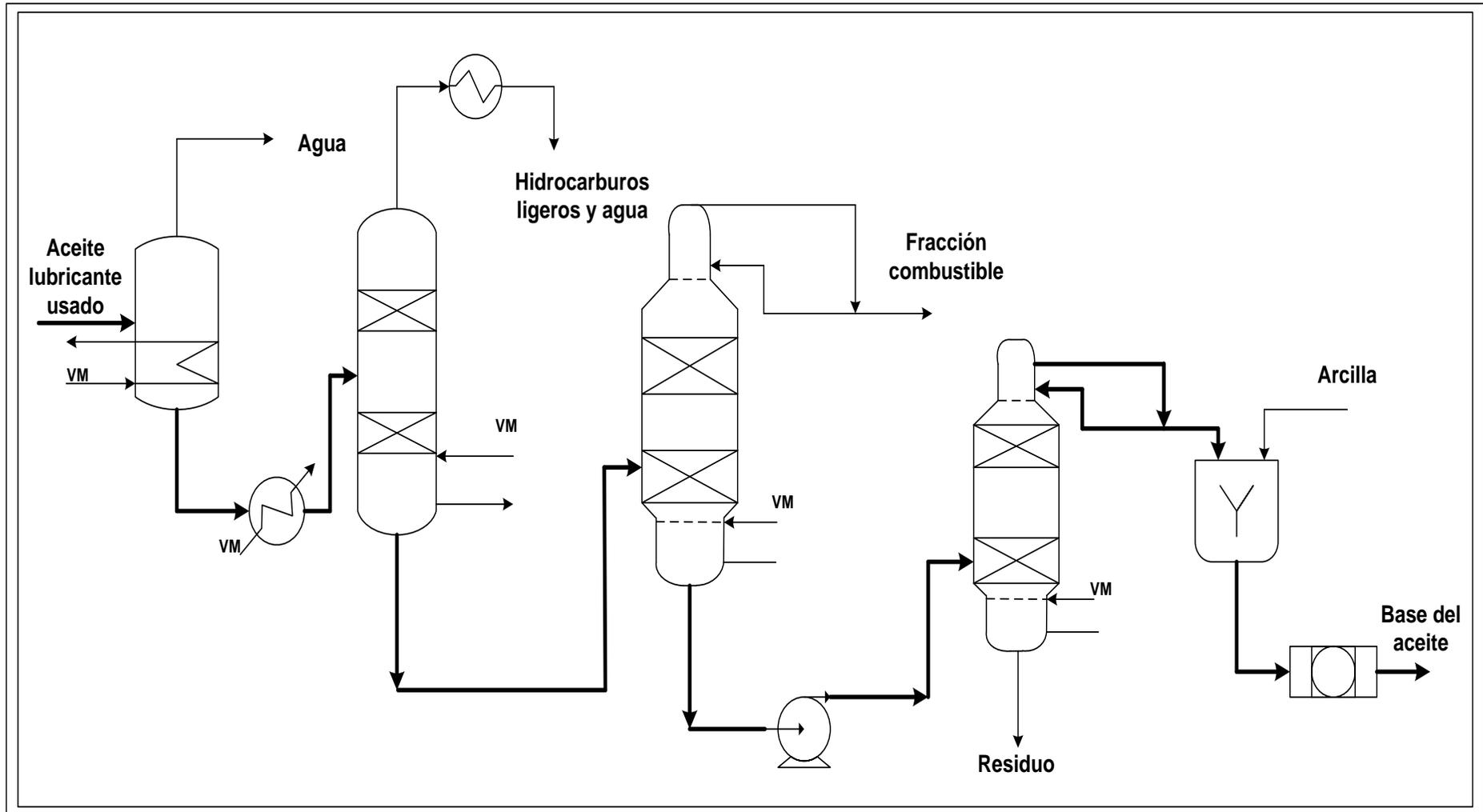


Figura 4.5. Diagrama de proceso de la Resource Technology.

El aceite usado es inicialmente calentado hasta que el agua es eliminada, entonces se precalienta en un intercambiador de calor y es introducido a una torre de destilación atmosférica con el objetivo de remover agua emulsificada y fracciones ligeras de combustible, ebulviendo por debajo de los 219 °C. Después, el aceite lubricante deshidratado es enviado a una columna de vacío, donde las fracciones ligeras y medias de combustible son vaporizadas por arriba de los 327 °C. Estas fracciones de combustible pueden ser quemadas o vendidas después de someterlas a un proceso de terminación tal como pulido con arcillas.

El aceite usado restante es introducido a gran velocidad dentro de una columna de vacío ciclónica. La alta velocidad de la corriente genera una fuerza centrífuga extremadamente grande que ayuda en la separación de los aditivos y contaminantes restantes del aceite usado sin la formación de coque. Los contaminantes son generalmente removidos como un residuo de fondo de la columna de vacío, los cuales sin un tratamiento son enviados a la industria del asfalto. El aceite lubricante destilado es entonces enviado a un mezclador donde se pone en contacto con tierra diatomea y arcilla activada, finalmente es enviado a un filtro prensa.

El proceso RTI produce relativamente un producto limpio con menos de 5 ppm en el contenido de metales. Además, aproximadamente el 75 % del aceite lubricante usado que se trata es recuperado como base del aceite,⁵¹ genera emisiones despreciables, y el agua de desperdicio producida requiere un tratamiento. Finalmente, no se generan residuos sólidos por el proceso RTI, todos los subproductos producidos son considerados de valor comercial. Además, la destilación ciclónica evita la formación de coque y como resultado evita que el equipo se ensucie. Aquí es adecuado comentar que la calidad del producto no es muy alta, debido a que la tecnología emplea un tratamiento con arcillas en lugar de un hidrotatamiento.⁴³

4.9 Proceso de filtración, destilación-arcilla

El proceso de filtración, destilación-arcilla, fue desarrollado basándose en la tecnología del proceso ácido-arcilla, actualmente existen seis plantas utilizando esta tecnología las cuales se encuentran en E.U., Alemania, Taiwan y Brasil. Esta tecnología involucra el uso de un evaporador de película delgada, el cual permite la separación de productos

que son transformados por una destilación convencional al vacío. Debido a las altas temperaturas y el gran tiempo de residencia. En la Figura 4.6 se muestra el diagrama de proceso.

El aceite usado es calentado a una temperatura de 149 °C, hasta eliminar el agua. Los vapores son condensados y bombeados a un tratamiento, mientras que el aceite es enviado a la sección de destilación, en esta sección de destilación el aceite proveniente del tanque deshidratador, se introduce a la columna, donde las fracciones de bajo punto de ebullición son evaporadas, condensadas y colectadas, para posteriormente ser bombeadas a un tanque de almacenamiento temporal. Por otro lado, el aceite de punto de ebullición elevado es circulado mediante un sistema de control hacia el evaporador de película delgada. Ajustando el sistema de vacío, las cantidades de productos finales ligeros pueden ser removidos durante este paso del proceso. La temperatura de la chaqueta y el sistema interno de vacío son controlados para permitir la separación de los productos a generar; los vapores son condensados en el condensador interno generando así el producto destilado. El residuo restante que posee contaminantes sólidos, es usado en la manufactura del asfalto.⁵² Como paso final del proceso el destilado se pone en contacto con arcilla en las proporciones correctas y se envía a un filtro prensa para remover la arcilla y otras impurezas.

Las desventajas de este proceso son que los compuestos de azufre no son removidos y la calidad del producto final está muy relacionada con la calidad del aceite que se regenera, obteniendo rendimientos entre el 70 y el 75 %.

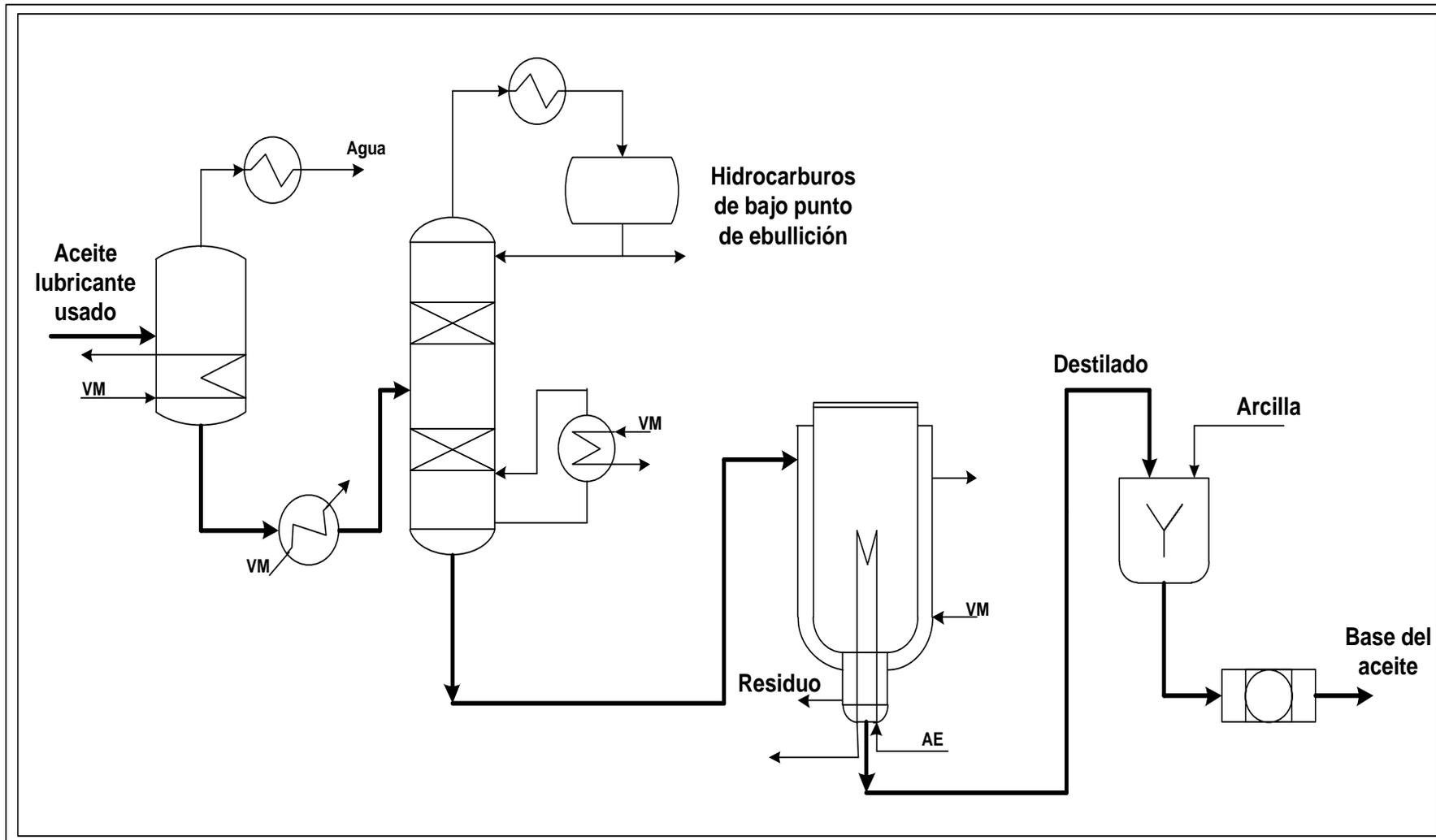


Figura 4.6. Diagrama de proceso de filtración, destilación-arcilla.

4.10 Proceso de la tecnología Recyclon

El proceso Recyclon fue desarrollado por Leybold-Heraeus GmbH al oeste de Alemania, Figura 4.7. El proceso se basa en el tratamiento del aceite usado con sodio metálico para remover compuestos poliaromáticos, PCB's y aditivos. La reacción produce sales de sodio, las cuales poseen altas temperaturas de ebullición, permitiendo su separación por medio de la destilación.

Los principales pasos del proceso son:

- Separación mecánica del agua y sedimentos.
- Remover agua e hidrocarburos ligeros en un preflash.
- Dispersar el sodio sobre el aceite deshidratado.
- Eliminación de los productos ligeros formados.
- Recuperación de aceite en un TFE.
- Fraccionamiento del aceite en tres columnas en serie.

El primer paso del proceso es remover los hidrocarburos ligeros y agua del aceite usado. El aceite deshidratado es entonces enviado a un reactor donde primeramente se mezcla con hidróxido de sodio, a una temperatura de operación del reactor de 200 °C. El tratamiento elimina compuestos conteniendo azufre y halógenos. Los productos ligeros resultantes de la reacción de sodio metálico con el aceite son eliminados a través de un flash y los productos pesados son enviados a destilación al vacío donde los compuestos que incluyen la polimerización de olefinas insaturadas, conversión de halógenos y compuestos de azufre e impurezas, son eliminadas del aceite lubricante por los fondos. Por último, el aceite lubricante se fracciona en tres corrientes dependiendo del mercado a donde vaya dirigido, teniendo como producto final la base del aceite.

El rendimiento del proceso Recyclon es aproximadamente del 70-75 %. El proceso no requiere altas presiones y el agua residual producida por la deshidratación puede ser ligeramente ácida; sin embargo, con un tratamiento puede ser neutralizada y posteriormente enviada al sistema de drenaje local.

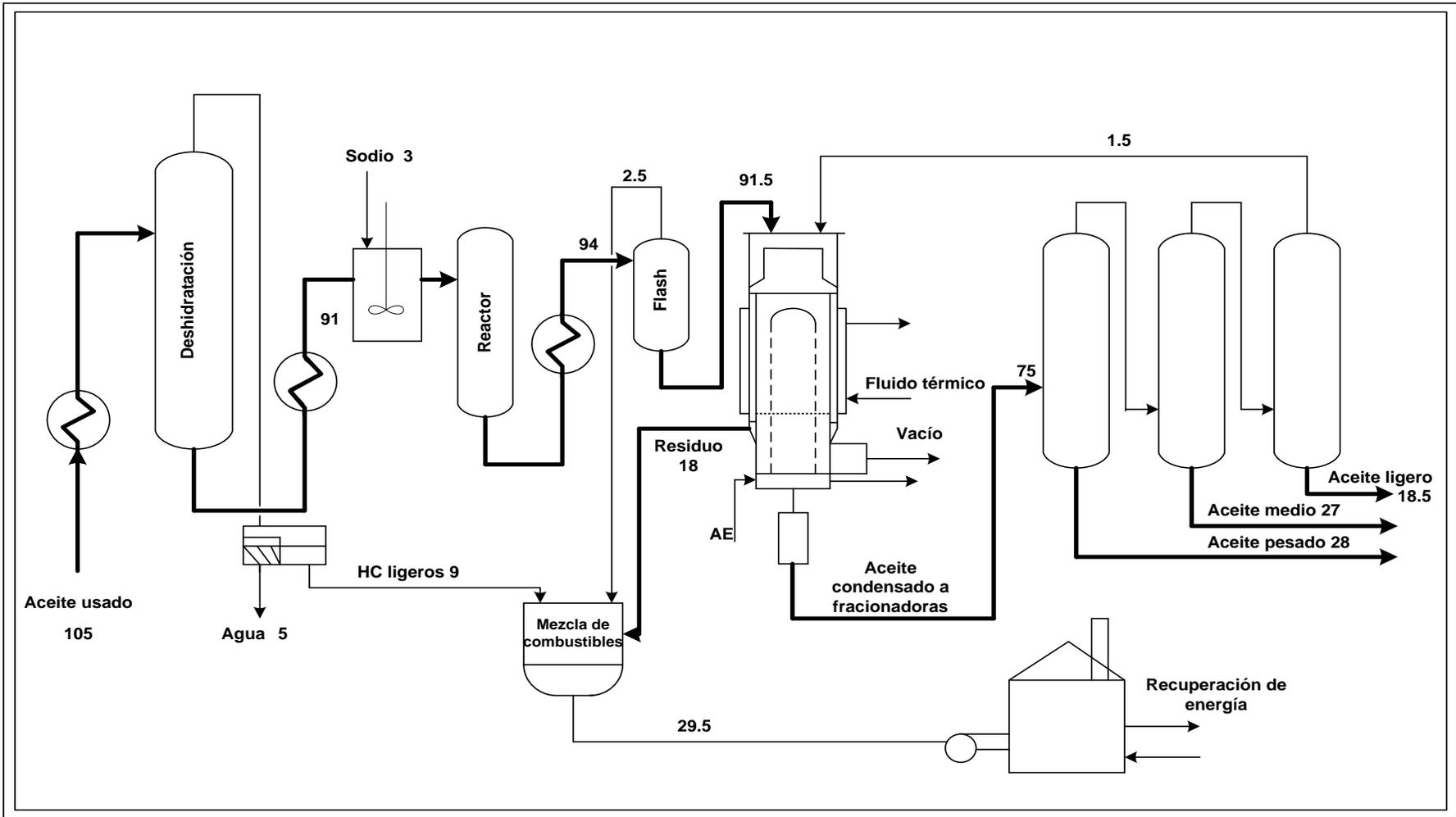


Figura 4.7. Diagrama de proceso de la tecnología Recyclon.

Las desventajas de este proceso se enuncian a continuación:

- El proceso no utiliza un tratamiento con arcillas o hidrotratamiento, por lo tanto la calidad del aceite base se reduce.
- El costo de operación del proceso es elevado, así como el del equipo.
- Al emplear sodio metálico se debe de tener un especial manejo con personal altamente capacitado para la operación del mismo.
- La alta electropositividad del sodio causa una reacción violenta con agua, que se descompone produciendo hidrógeno el cual puede inflamarse o causar una explosión al contacto con el oxígeno del aire.
- Existe una alta cantidad de azufre en el producto final de la base del aceite.⁴⁶

Los análisis de las diferentes fracciones obtenidas del aceite lubricante se muestran a continuación:

Tabla 4.4. Análisis de las diferentes bases del aceite Recyclon.

Parámetro	Aceite ligero	Aceite medio	Aceite pesado
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	18.17	38.55	79.22
Viscosidad a 100°C (mm ² /s)	3.67	5.86	9.42
Gravedad específica (kg/m ³)	870	873	878
Punto de flasheo (°C)	180	220	230
Punto de congelación (°C)	-25	-16	-14
TAN(mg KOH/g)	0.017	0.018	0.01
Azufre (% peso)	0.7	0.62	0.5
Contenido de ceniza (% peso)	0.01	<0.01	<0.01

4.11 Chemical Engineering Partners (CEP), proceso de la tecnología Mohawk

Esta tecnología fue desarrollada por la compañía Mohawk Oil en Canadá, basada en la tecnología KTI, manejando diferentes condiciones de temperatura y tiempos de trabajo del proceso. Consiguiendo mejorar las características de los productos acabados, tanto en lo referente a la vida de los catalizadores que intervienen, como con el aumento de la resistencia a la corrosión, Figura 4.8.³²

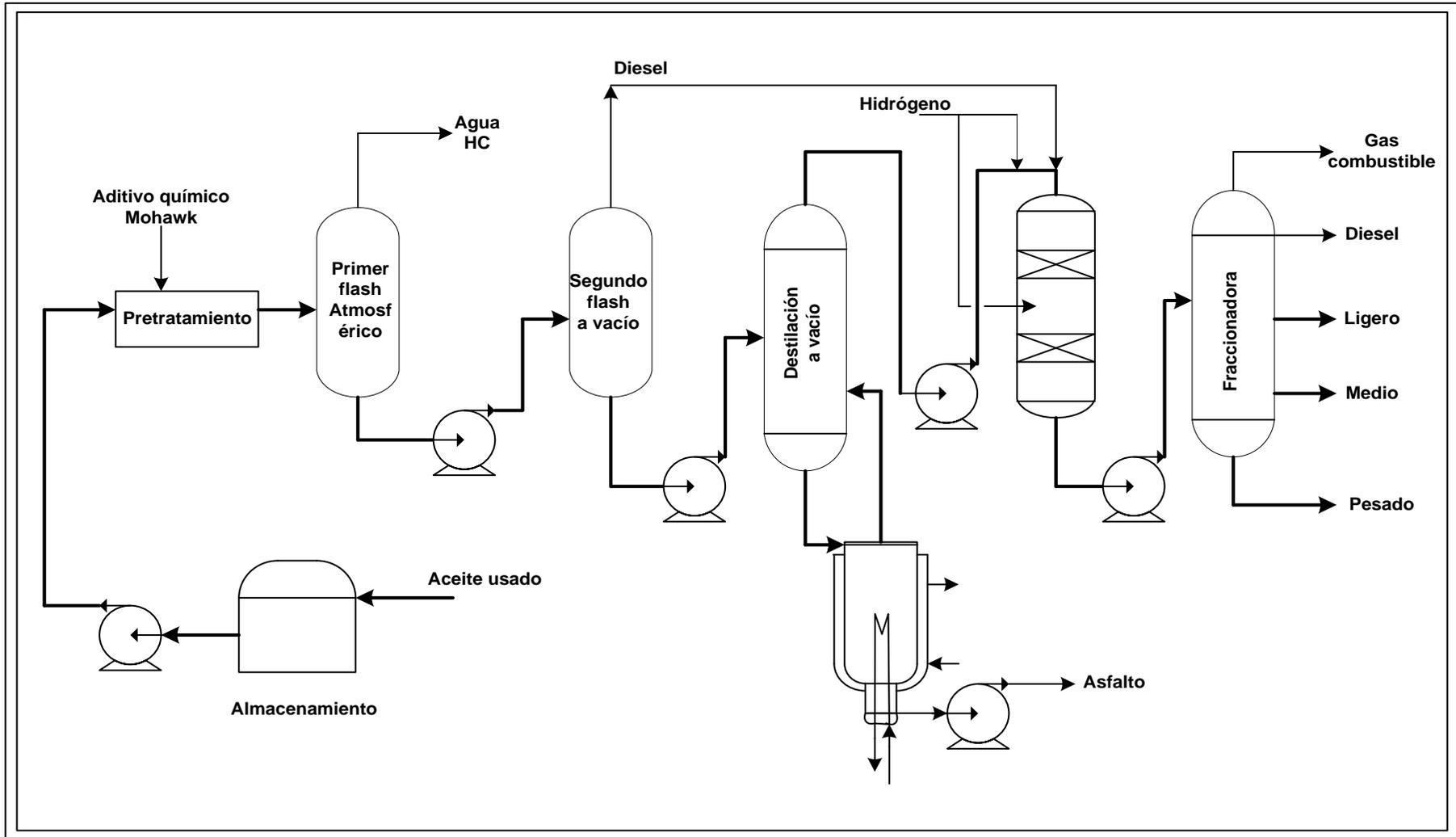


Figura 4.8. Diagrama de proceso de la tecnología Mohawk.

A través de diversos estudios, los investigadores de la tecnología Mohawk notaron que algunos aditivos organometálicos eran térmicamente inestables formando polímeros, causando corrosión y daños de taponamiento en equipos, generando diversas operaciones inestables en el proceso. Por ello, se implementó un tratamiento químico al aceite antes de su regeneración y así solucionar varios de los problemas anteriormente mencionados.

Al aceite que proviene de los tanques de almacenamiento se le adiciona un agente antidepósito, posteriormente el aceite es introducido a un preflash eliminando hidrocarburos ligeros y agua, después a un segundo flash a condiciones de vacío asegura la eliminación de diesel. Además, para obtener una mejor separación del producto, un TFE es acoplado a la torre de destilación al vacío. Después, un hidrotreatmento es requerido para asegurar la calidad de las diferentes fracciones en la separación final, lo que ayuda a remover los contaminantes no deseados.

En la Figura 4.9 se muestran las modificaciones realizadas al proceso Mohawk. El proceso es actualmente llamado evergreen oil, el cual cuenta con mayor renombre en la Asociación Nacional de Recicladores de Aceite (National Oil Recyclers Association, NORA), esta asociación cuenta ya con 25 años promoviendo la reutilización de líquidos. Actualmente, NORA representa 350 compañías dedicadas a la reutilización en las áreas de aceite usado, anticongelante, absorbentes, filtros de aceite, aguas residuales y químicos. Este proceso se basa en la destilación-hidrogenación-TFE y, tiene como requerimiento mantener una baja volatilidad de la base del aceite, de tal manera de reducir la cantidad de lubricante quemado en la cámara de combustión.

Como se ha visto a lo largo de las diferentes tecnologías mostradas, las más eficientes son aquellas que incorporan un hidrotreatmento y una destilación a vacío, pero es claro que la hidrogenación implica una alta inversión. Es por ello que CEP-Mohawk en el proceso evergreen oil ha implementado la eliminación de la separación de diesel a vacío. Además, el aceite evaporado en el TFE es enfriado dentro del recipiente en vez de ser condensado en un enfriador posterior.

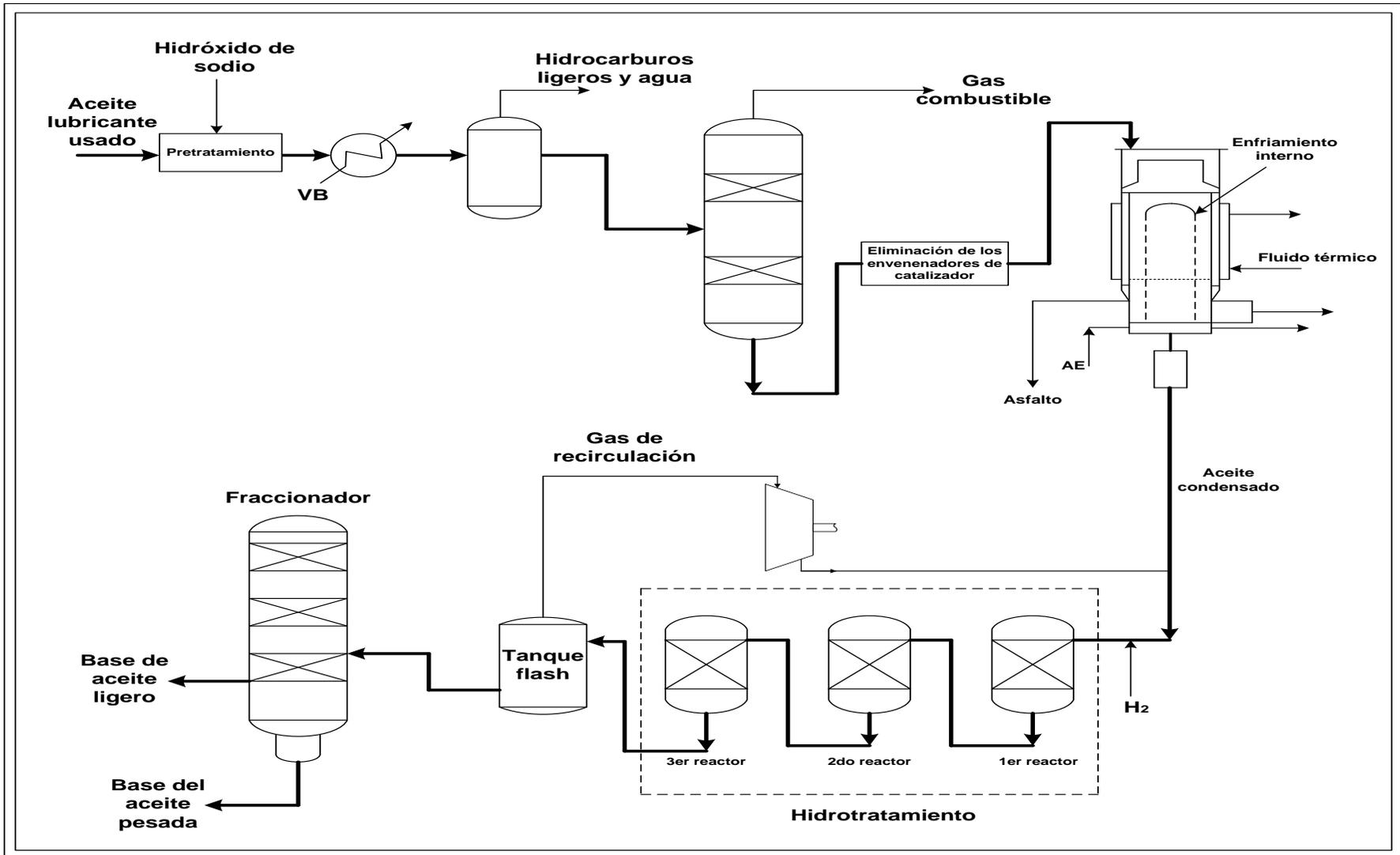


Figura 4.9. Diagrama de proceso mejorado de la tecnología Mohawk.

El primer paso del proceso es un tratamiento químico de la carga con hidróxido de sodio, el cual conlleva a la precipitación de elementos contaminantes con el fin de reducir los problemas de suciedad y corrosión, y de esta manera evitar paros generales de la planta por limpieza en equipos, además, alarga la vida de los catalizadores. Posteriormente, al aceite lubricante pre-tratado se le elimina el agua e hidrocarburos ligeros, aquí es adecuado mencionar que en la torre de destilación el producto de domos es principalmente combustible diesel. En algunos casos es posible usar este diesel e hidrocarburos ligeros como combustible de planta, pero esto es determinado por las regulaciones locales del ambiente, si no se permite el uso de estos subproductos como combustible de planta, este puede ser vendido.

El aceite libre de agua, es entonces enviado a tratamiento donde se le eliminan los envenenadores de catalizador, ya que algunos aditivos y contaminantes en el aceite usado son perjudiciales para el catalizador del hidrotratamiento, por lo que la rápida desactivación del catalizador ocurre cuando esos contaminantes están presentes.

El siguiente paso es la destilación a vacío en un TFE con el fin de separar la base del aceite de materiales pesados tales como residuos, metales, productos degradados como los aditivos, etc. El vacío permite la separación en temperaturas por debajo de las temperaturas de craqueo, por lo que las bajas temperaturas y el corto tiempo de residencia en el evaporador de película delgada, minimiza el “coking” que ocurre en otros equipos. Una vez que el aceite base es separado de los aditivos y materiales contaminantes, se continua con el hidrotratamiento, por lo que el aceite lubricante es enviado a los reactores configurados en serie. Aquí, al entrar en contacto la base del aceite con el catalizador CEP-HRX, se reduce principalmente el azufre a menos de 300 ppm, así como el contenido de nitrógeno, cloro y compuestos orgánicos oxigenados y se incrementa el contenido de los compuestos saturados hasta un 90 %. Por último, se lleva a cabo una destilación a vacío, por la cual se separa la base del aceite hidrotratado en diferentes cortes con viscosidades diferentes dependiendo del mercado al que se venderá.

Los productos secundarios del proceso de re-refinamiento del proceso mejorado Mohawk, incluyen:

Combustible ligero (gasolina): Este combustible es adecuado para ser usado como combustible de planta, siempre y cuando las regulaciones locales lo permitan; el quemado de este combustible puede reducir los requerimientos de combustible de planta hasta un 40 %.

Gas combustible (diesel): Este subproducto puede ser usado como combustible de planta o ser vendido, dependiendo de las condiciones de mercado.

Asfalto: Puede ser empleado para el recubrimiento de techos o pavimentación.

Los consumos de servicio, para una alimentación de una tonelada de aceite usado o gastado son:

- Vapor: 25 kg/t.
- Agua de enfriamiento: 2,000 kg/t.
- Electricidad: 100 kWh/t.
- Hidrógeno: 2.5 kg/t.

Algunas ventajas importantes en este proceso se deben al pre-tratamiento de la carga inicial, en donde los equipos no se deben de limpiar con frecuencia regular, ahorrando tiempos de producción y evitando el desgaste de los mismos. Además, la calidad de los aceites después de reprocesarlos es muy alto, superior o igual del 83 %, a pesar que la tecnología acepta aceites usados de diferentes tipos: aceite de transmisión, hidráulico, de motor, etc.

Las desventajas del proceso son mínimas, ya que no genera desechos por que el catalizador es reutilizado y no se desactiva tan frecuente como en otras tecnologías.⁴⁶

Los análisis de las fracciones ligeras y pesadas de la base del aceite se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Análisis de la base del aceite CEP-Mohawk.

Parámetro	Aceite ligero	Aceite pesado
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	20.1	54
Viscosidad a 100°C (mm ² /s)	4.0	7.4
Gravedad específica (kg/m ³)	865	871
ASTM 1500-color	L 0.5	L 1.0
Punto de flasheo (°C)	185	224
Punto de congelación (°C)	-12	-9
TAN (mgKOH/g)	<0.01	<0.01
Azufre (%peso)	0.05	0.02
Contenido de ceniza (%peso)	<0.001	<0.001

4.12 Proceso de la tecnología Revivoil

La tecnología Revivoil desarrollada por la compañía Axens anteriormente incorporaba a su proceso el uso de ácido sulfúrico y un tratamiento con arcillas, pero debido a los pobres rendimientos asociados a estos procesos la tecnología Revivoil fue reconfigurada usando un tratamiento con propano o butano para aumentar el rendimiento del producto y un hidrotreamiento generalmente a alta presión, con el fin de reducir los compuestos aromáticos e incrementar la eficiencia del aceite, Figuras 4.10 a, b, c y d.

El aceite proveniente del tanque de almacenamiento es precalentado y mezclado con un aditivo, la mezcla calentada hasta 140 °C es enviada a un tanque flash donde se separan los hidrocarburos ligeros y el agua. Después se envía a un tanque de decantación con tiempos de residencia de dos a tres días, para posteriormente ser destilado en la columna a vacío con temperaturas y presiones de 350 °C y 15 Torr respectivamente, así en los domos de la columna se produce diesel y por los fondos un residuo asfáltico, el cual se envía a la sección de desasfaltado.

El proceso de desasfaltado involucra tres operaciones:

1. Floculación y precipitación del asfalto.
2. Sedimentación del asfalto.
3. Lavado de asfalto.

De esta manera, con relación a la operación 1 (Floculación y precipitación del asfalto, Figura 4.10d), la adición de una parafina ligera (C₃ o C₄) rompe el equilibrio entre los diferentes grupos de hidrocarburos (aceites, resinas y asfaltos), acelerado por la temperatura hasta el punto crítico del disolvente.

La operación 2, implica que la velocidad del líquido en la parte superior del extractor es más baja que la velocidad descendiente de las partículas dispersas. La operación 3 se lleva a cabo cuando las condiciones hidrodinámicas permitan al disolvente desplazar la fase oleosa alrededor de las partículas suspendidas, Figura 4.10 d.

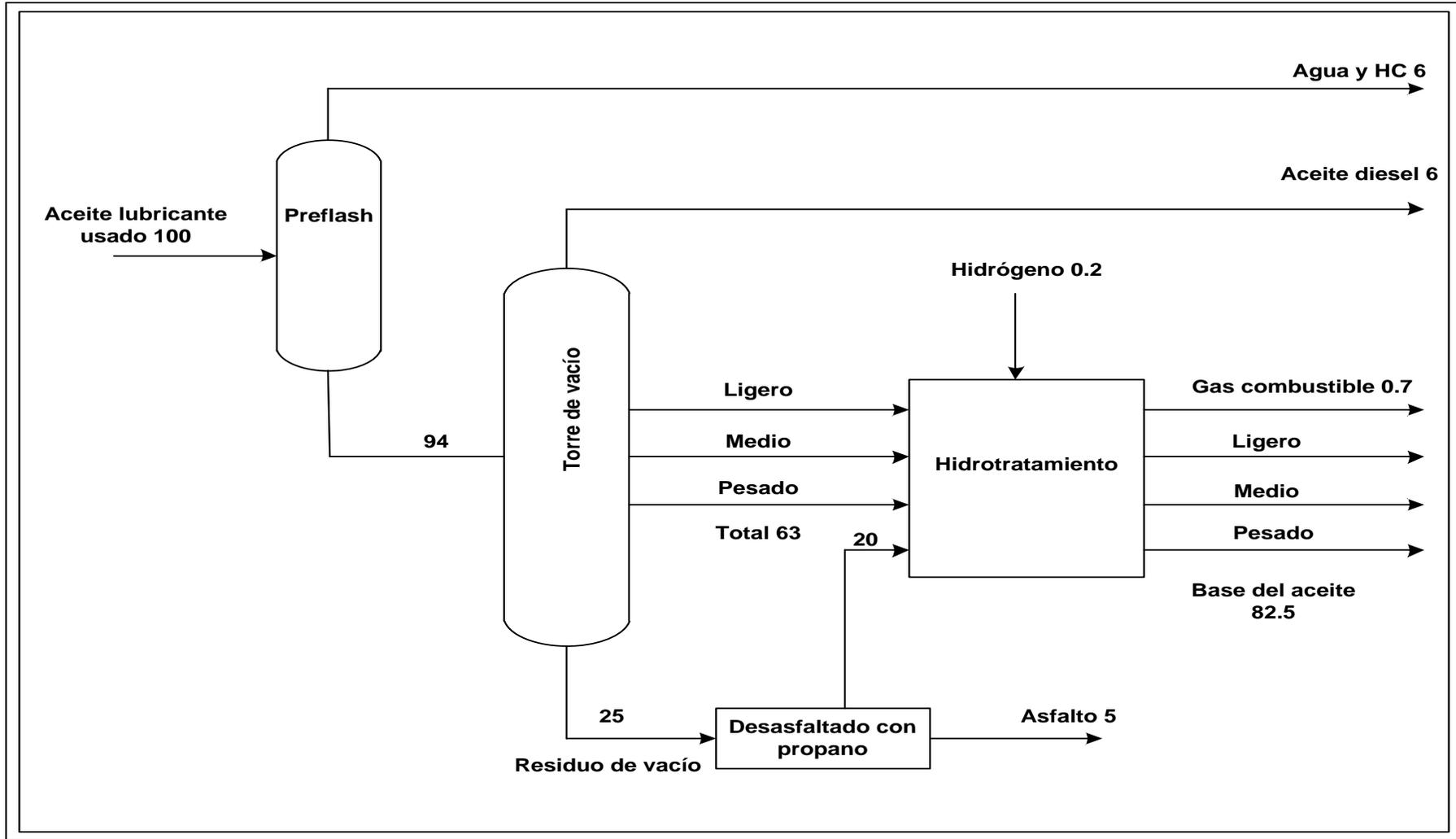


Figura 4.10a. Diagrama de proceso de la tecnología Revivoil.

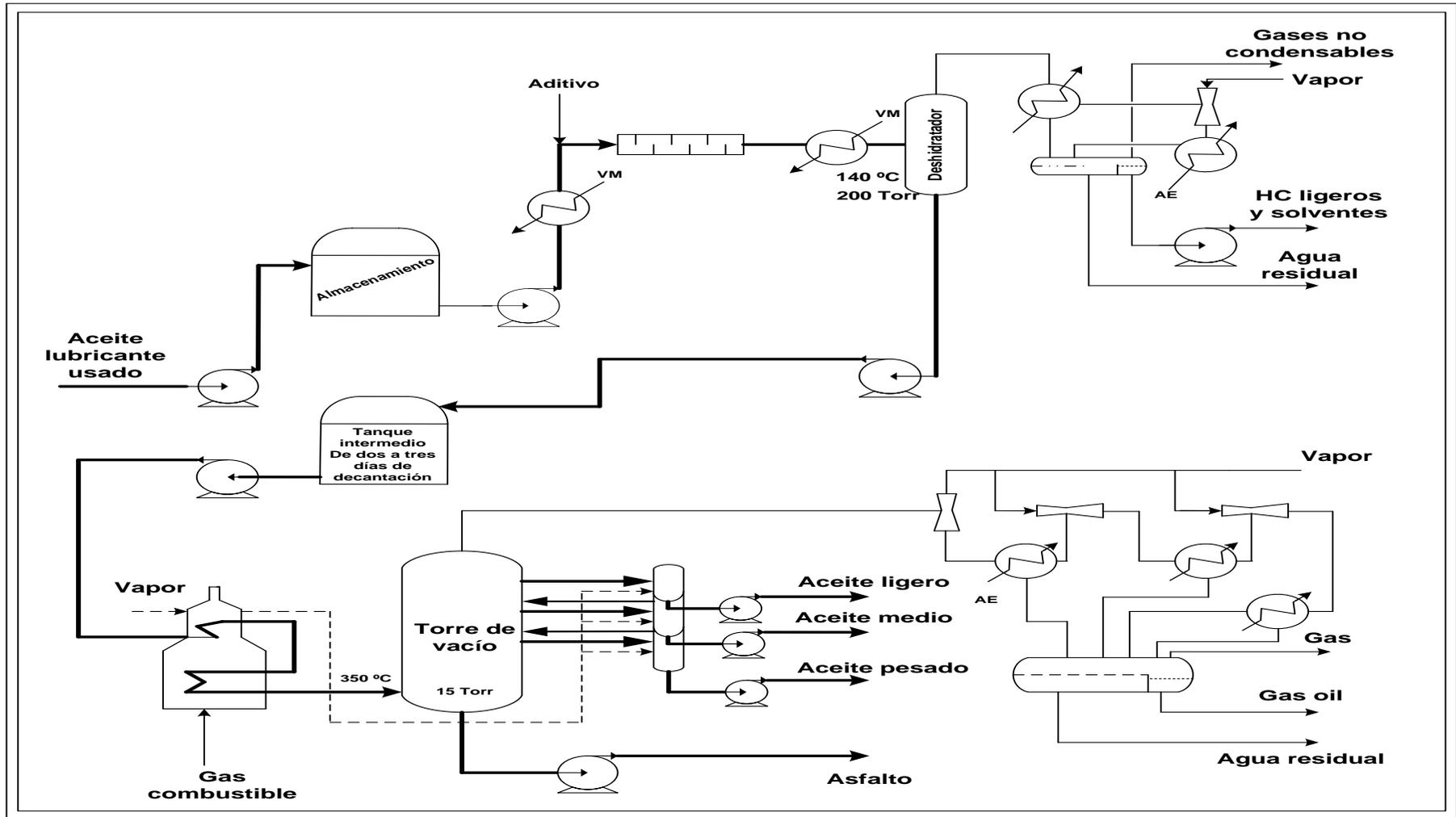


Figura 4.10b. Diagrama de proceso de la tecnología Revivoil.

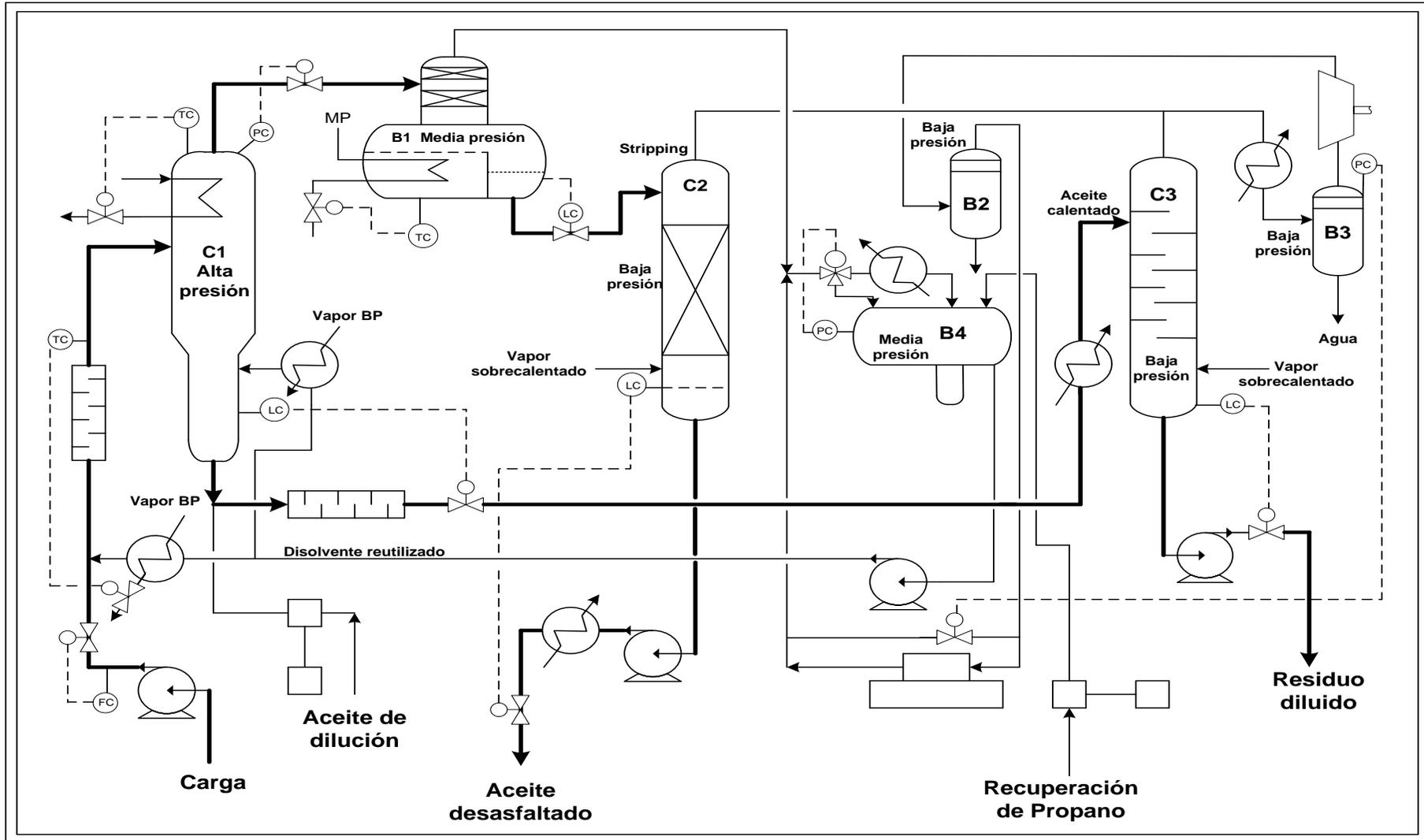


Figura 4.10c. Diagrama de proceso de la tecnología Revivoil, sección de desasfaltado.

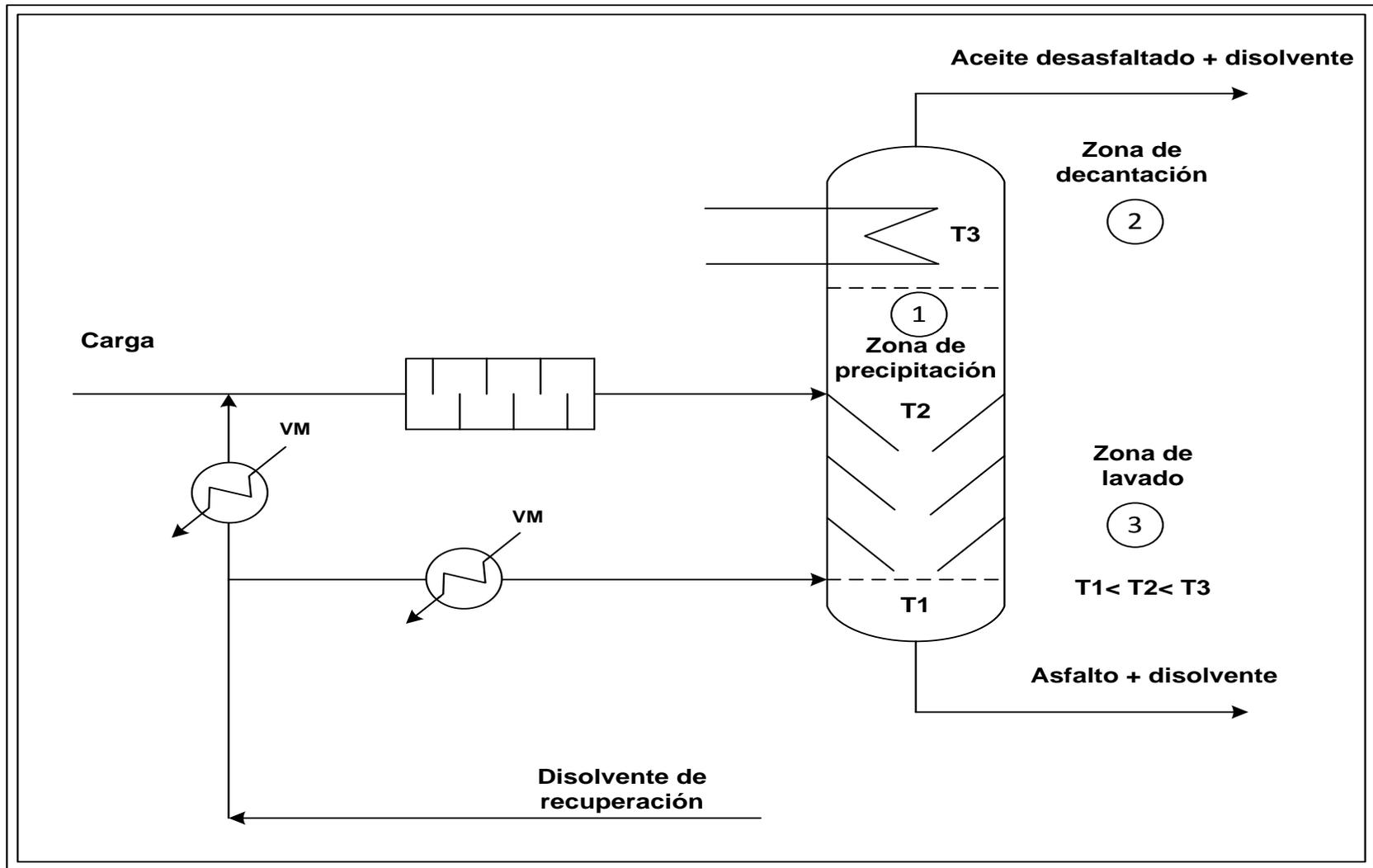


Figura 4.10d. Tres etapas de desasfaltado, sección de extracción líquido-líquido.

En esta tecnología el disolvente más apropiado es el propano con una relación en volumen de 8:10, garantizando un aceite limpio en un intervalo de 92-99 % peso, la fracción precipitada incluye productos de oxidación, polimerización y aditivos desestabilizados formados durante el uso del aceite en el motor. Las condiciones óptimas de operación son cercanas a las del punto crítico del disolvente (42 bar y 95 °C), siempre en fase líquida. Para una mejor separación un gradiente de temperatura en la columna del orden de 30 °C es mantenida, por tanto el intervalo de temperatura en la parte superior de la columna es desde 75 a 85 °C hasta 45 a 55 °C, en los fondos. La Figura 4.10c, representa el diagrama de esta parte del proceso.

El aceite a ser desasfaltado se mezcla con el disolvente reutilizado caliente representando una relación 3:5 en volumen del disolvente total reciclado. La mezcla es introducida en la columna desasfaldadora C1, llamada también columna de clarificación. Después de someterse a evaporación en B1 y un agotamiento (stripping) en la columna C2, el aceite desasfaltado es llevado a un tratamiento con las corrientes laterales de la columna de vacío en los reactores de hidrotreatmento. El propano es parcialmente recuperado en B4 antes de ser circulado por la bomba hacia la columna C1, después de ser calentado y mezclado con el aceite de alimentación.

La presión promedio en B4 depende de la válvula de tres vías que envía una parte del flujo de propano al intercambiador. El compresor aumenta la baja presión del recipiente de propano B3 al B4. El residuo de la columna C1 es parte del residuo final del aceite y es removido de la base de la columna, mezclándose con un aceite de dilución y enviado a la columna C3, donde las últimas trazas de disolvente son eliminadas. El residuo restante en la columna C1, representa solo del 6-7 % del aceite deshidratado.

Este tipo de proceso, solamente puede ser considerado para largas capacidades, por ejemplo mayores de 30,000 t/año. Este proceso es muy rentable, debido a la alta afinidad del propano con el aceite lubricante, dejando en la base de la columna otros componentes indeseables, como son: polímeros, productos condensados e impurezas. Además, es un proceso en el que las temperaturas no son tan elevadas, protegiendo el aceite de una degradación térmica.

La principal desventaja del proceso es el uso de disolventes de extracción ya que aumentan los costos de tratamiento.^{46,53}

Una alimentación de una tonelada de aceite usado, requiere de los siguientes consumos de servicios:

- Vapor: 800 kg/t.
- Agua de enfriamiento: 226 kg/t.
- Electricidad: 55 kWh/t.
- Hidrógeno: 2.5 kg/t.

Los análisis de la fracción pesada del aceite lubricante se muestran la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Análisis de las diferentes bases del aceite Revivoil.

Parámetro	Aceite ligero	Aceite medio	Aceite pesado
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	25	55	107
Gravedad específica (kg/m ³)	867	877	882
Punto de flasheo (°C)	226	248	280
Punto de congelación (°C)	-12	-6	-9
TAN(mg KOH/g)	0.006	0.008	0.008
Azufre (% peso)	0.03	0.03	0.03
Contenido de ceniza (% peso)	<0.001	<0.001	<0.001

4.13 Proceso de la tecnología Sotulub

En los primeros años en que surgió la tecnología Sotulub, el aceite que se regeneraba involucraba el uso del ácido sulfúrico y una adsorción con arcilla, proceso muy similar a la tecnología Revivoil; sin embargo, presenta una modificación al adicionar un aditivo en dos etapas del proceso, Figura 4.11.

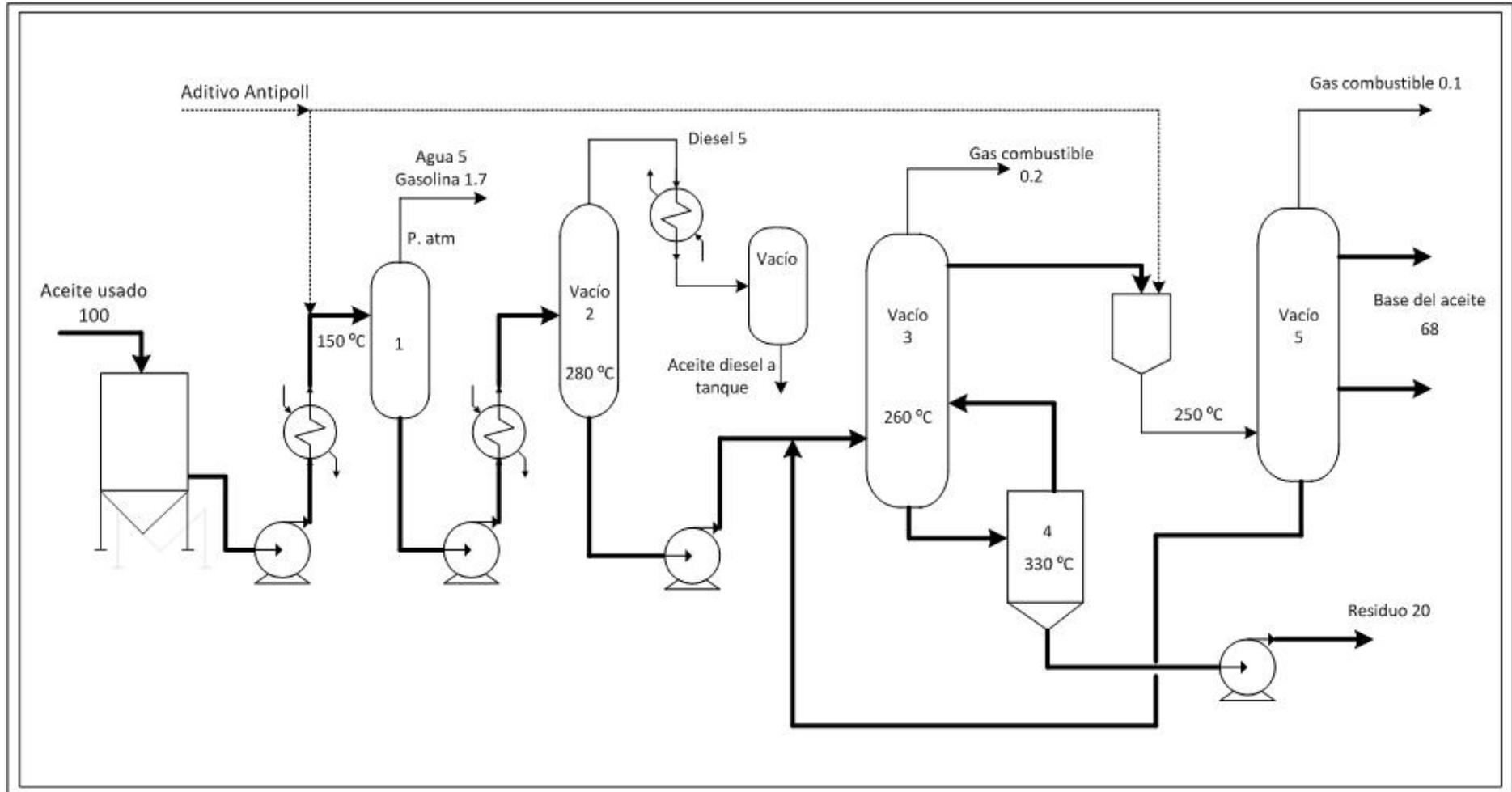


Figura 4.11. Diagrama de proceso de la tecnología Sotulub.

Principales características:

- La ausencia de un hidrotamiento, debido principalmente a los altos costos de la operación e inversión inicial.
- Incorpora una columna a vacío acoplada a un evaporador de película delgada, para poder obtener un aceite libre de productos degradados térmicamente.
- Sotulub agrega un producto alcalino, llamado antipoll en dos etapas del proceso. La primera adición es realizada antes de entrar a la columna de deshidratación (1) para evitar taponamientos. La segunda adición es realizada dentro del aceite que viene de la columna a vacío (3), para transformar los productos residuales oxidables. Los productos de esta reacción son recolectados en los fondos de la columna (5), en la cual se realiza la separación del aceite en dos fracciones.
- La inyección de antipoll se realiza para eliminar todas las trazas de los elementos capaces de sufrir corrosión y degradación térmica del aceite. Esta precaución hace posible obtener productos de calidad aceptable sin la necesidad de un paso final.

Deshidratación o preflash: El aceite usado es precalentado hasta una temperatura de 150 °C, mezclado con el aditivo antipoll (una base fuerte, tales como: hidróxido de potasio o sodio), e introducidos al recipiente (1), removiendo por los domos agua y gasolina.

Eliminación de diesel: El aceite deshidratado es calentado a 280 °C en un recipiente a vacío (2) y separado del diesel, el cual es removido por la parte superior de la columna.

Destilación a vacío: El aceite libre de diesel alimenta a una columna de destilación a vacío (3) acoplada a un TFE (4), para separar el aceite de una fracción residual colectada en el fondo de la columna, que es valorizado como un componente asfáltico. Con ello se evita arrastrar contaminantes en el aceite y obtener un residuo tan concentrado como sea posible. El aceite de los domos de la columna es sometido a oxidación, antes de ser mezclado con el aditivo antipoll y posteriormente se envía a la columna de vacío final (5), donde se divide en dos fracciones (ligera y pesada). Mientras que los fondos de la columna (5) son recirculados a la columna (3) para incrementar la separación del residuo.

Como desventaja en este proceso se tiene la capacidad de la planta, solo produciría de 15 a 20 mil toneladas por año. Otros procesos, que emplean un hidrotratamiento, son rentables con capacidades mayores a 40,000 toneladas por año.⁵⁴

Los análisis de las diferentes fracciones obtenidas del aceite lubricante se muestran a continuación:

Tabla 4.7. Análisis de las diferentes bases del aceite Sotulub.

Parámetro	Aceite ligero	Aceite pesado
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	28-33	76-100
Gravedad específica (kg/m ³)	871	884
Punto de flasheo (°C)	200	240
Punto de congelación (°C)	-6	-6
TAN(mg KOH/g)	<0.03	<0.03
Azufre (% peso)	<0.9	<1.2
Contenido de ceniza (% peso)	<0.01	0.3

A diferencia de las tecnologías de reprocesamiento, las características de los aceites re-refinados indican que los contaminantes provenientes del aceite usado son removidos. En general, la mayoría de las características físicas y químicas de los aceites re-refinados son similares a las del aceite lubricante virgen. La Tabla 4.8, muestra la similitud y diferencias entre las propiedades del aceite lubricante virgen y re-refinado.

Tabla 4.8. Comparación de las propiedades del aceite virgen y re-refinado.

Propiedad	Base del aceite virgen			Base del aceite re-refinado		
	Intervalo		Composición promedio	Intervalo		Composición promedio
	Bajo	Alto		Bajo	Alto	
Propiedad Física						
Índice de viscosidad	95	100	98	90	108	102
Color ^c	0.5	1.0	0.8	3.0	8.0	5.5
Densidad, lb/ft ³	7.26	7.31	7.29	7.29	7.37	7.33
Punto flash, °F	428	460	441	345	466	408
Peso molecular (promedio)	440	460	450	432	516	480
Distribución del punto de ebullición						

Tabla 4.8. Comparación de las propiedades del aceite virgen y re-refinado. Cont.

Base del aceite virgen			Base del aceite re-refinado			
Propiedad	Intervalo		Composición promedio	Intervalo		Composición promedio
	Bajo	Alto		Bajo	Alto	
Punto 10%, °F	721	795	763	619	792	705
Punto 50%, °F	846	869	855	777	882	828
Punto 90%, °F	916	984	948	928	988	970
Propiedad Química						
Humedad, ppm	26	55	37	40	60	45
No. Total de ácido, mg KOH/g	0.001	0.02	0.006	0.006	0.09	0.01
No. Total de base, mg KOH/g	0.03	0.2	0.1	<0.001	0.041	0.0091
Cloro, ppm	0.01	0.2	0.1	0.1	1.1	0.9
Bromo, ppm	0.01	0.02	0.005	0.15	3.9	0.2
Ceniza sulfatada, % peso	0	0.0005	0.0002	0.0005	0.0144	0.0043
Residuo de carbón, % peso	0.02	0.09	0.07	0.03	1.0	0.1
Nitrógeno total, ppm	18	55	33	9	47	21
Nitrógeno básico, ppm	8	49	26.1	0.4	14.7	3.3
Azufre, % peso	0.01	0.16	0.08	0.12	0.25	0.18
Metales inorgánicos, ppm						
Zinc	--	<1	<1	<0.2	41	6.19
Plomo	--	<1	<1	<1	8.0	2
Hierro	--	<1	<1	0.5	13.0	2.8
Manganeso	--	<1	<1	<1	0.08	0.03
Magnesio	--	<1	<1	<1	0.78	0.44
Calcio	--	<10	<10	<0.2	13.2	3.04
Bario	--	<10	<10	<10	--	<10
Silicio	--	<5	<5	<5	--	<5
Análisis elemental, % peso						
Carbón	85.1	86.2	85.7	85.2	86.6	86.3
Hidrógeno	13.4	13.6	13.5	13.1	13.8	13.4

Estos datos muestran las siguientes características:

- La base del aceite virgen es usualmente más claro en color que el de los aceites re-refinados, indicando posiblemente un alto grado de viscosidad y/o presencia de altas cantidades de azufre o compuestos oxigenados en los aceites re-refinados.
- A comparación de los aceites vírgenes, los aceites re-refinados son bajos en el contenido de nitrógeno, nitrógeno básico y números de base totales.

- El bajo contenido de nitrógeno en los aceites re-refinados puede ser debido a las reacciones de compuestos nitrogenados para formar productos de oxidación o lodos, que pueden ser subsecuentemente removidos durante el proceso de re-refinamiento.
- El alto número de residuo de carbón y número total de ácido de los aceites re-refinados sugieren altos contenidos de oxígeno.
- Tanto el bromo y el cloro parecen evitar el proceso de re-refinamiento, lo cual indica que estos elementos pueden ser derivados del combustible de origen.
- Aunque no se muestra en la Tabla 4.8, las bases de los aceites son aproximadamente iguales en compuestos saturados, parafinas, nafténicos, y aromáticos.^{43,46}

En la Tabla 4.9, se muestra un resumen de las tecnologías expuestas, en la cual se exponen algunas de las características más importantes de cada proceso, de tal manera que pueda interpretarse qué proceso cumple con los parámetros para la reutilización o regeneración del aceite usado.

Tabla 4.9. Resumen de las tecnologías de re-refinamiento.

Proceso	Rendimiento del proceso	Complejidad del proceso	Consideraciones ambientales	Calidad del producto	Comentarios
Ácido-arcilla	Del 45-70%, dependiendo de las condiciones y composición de la alimentación	Simple: Capacidad flexible	Genera grandes cantidades de lodos ácidos y arcilla gastada. Pocas emisiones al aire.	Buena	Altos costos
Phillips Re-refined Oil Process (PROP)	90% <	Inflexible y relativamente complejo. Diseñado especialmente para aceite de automóvil	Pocas emisiones al aire, los lodos de desmetalización son altamente desaprobados en vertederos	Excelente	Muy costoso
Kinetics Technology International (KTI)	82%	Relativamente complejo pero flexible, adecuado para operaciones continuas	Aguas residuales, y muy pocas emisiones al aire	Alta calidad	Acepta materiales peligrosos en los aceites usados
Bartlesville Energy Research (BERC)	71-75%	Relativamente complejo pero flexible	Genera lodos orgánicos y un efluente caustico. Pocas emisiones al aire	Buena	Costos elevados en el tratamiento de disolventes
Resource Technology Inc (RTI)	75%	Moderadamente simple comparado con el proceso KTI	Aguas residuales.	Buena	El uso de arcillas disminuye el rendimiento
Filtración, destilación-arcilla	70-75%	Proceso continuo, completamente automatizado	Despreciables cantidades pequeñas de arcilla gastada son generadas	Buena	El uso de arcillas disminuye el rendimiento
Recyclon	70%-75%	Moderadamente complejo que el proceso ácido-arcilla	Despreciables efluentes de aguas residuales y pocas emisiones al aire	Buena	No utiliza el hidrotratamiento o arcilla
Mohawk	83% <	Relativamente complejo y flexible, adecuado para operaciones continuas	Aguas residuales	Alta calidad	Alta estabilidad del catalizador
Revivoil	82.5%	Relativamente complejo y flexible	Aguas residuales	Muy Buena	Alta afinidad del propano con el aceite
Sotulub	75%	Moderadamente complejo	Aguas residuales	Buena	Bajas capacidades

CAPÍTULO V. PROPUESTA DE INGENIERÍA

5.1 Generalidades

En este capítulo se enuncian las bases del proceso de Ingeniería, las cuales son especificadas a partir de la mejor tecnología seleccionada de acuerdo a la evaluación correspondiente de las tecnologías existentes del re-refinamiento. Además, se hace énfasis en los catalizadores de los reactores como pieza fundamental del proceso, mostrando el análisis de datos experimentales a partir de gráficos de una compañía en particular.

5.2 Comparación de las tecnologías de re-refinamiento

A continuación, se hace la comparación cualitativa de las tecnologías descritas en el capítulo anterior, del reuso del aceite lubricante, así con la información obtenida se lleva a cabo la selección de la tecnología más adecuada.

La evaluación se realiza tomando en cuenta los aspectos y características mostrados en la Tabla 5.1 y se consideran las calificaciones de 0, 1, 3 y 5 que se describen en la Tabla 5.2. Al respecto, la tecnología o tecnologías que mayor puntaje obtengan serán las tecnologías seleccionadas. En este sentido, cuando se obtenga una mayor calificación, es indicativo de que esa tecnología no presenta ningún problema en cuanto a su uso, no existe algún inconveniente al implementarla y cumple con los requerimientos enunciados en el Capítulo II, Tabla 2.6.

Tabla 5.1. Aspectos de selección del proceso de la tecnología.

Factor	Sub aspecto
A. Características relevantes del proceso.	Equipo, condiciones de operación y características especiales de los productos.
B. Flexibilidad del proceso.	Capacidad de operación, número de equipos de relevo.
C. Materia prima.	Tipo de aceite lubricante.
D. Consumo de químicos y catalizadores.	Equipos, seguridad.
E. Consumo de servicios auxiliares.	Vapor, electricidad, agua de enfriamiento, hidrógeno.
F. Mano de obra requerida.	Operación, mantenimiento, entre otros.
G. Tratamiento de efluentes.	Normas, sistemas de tratamiento.
H. Impacto ecológico de la tecnología.	Agua, aire, vertederos.
I. Riesgos implícitos en la tecnología.	Seguridad.
J. Calidad del producto.	Rendimiento del proceso.

Tabla 5.2. Escala de calificación de atributos.

Descripción	Calificación
Atributo no disponible	0
Calificación mínima (pobre en este atributo)	1
Calificación media (atributo promedio)	3
Calificación máxima (excelente en este atributo)	5

Para definir la calificación máxima y mínima se aplicaron criterios como calidad, tipo de proceso, servicios empleados, entre otros, criterios que se confinan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Criterios para definir la calificación en cada aspecto.

Factor	Mínima calificación	Máxima calificación
A.	Se requieran demasiados equipos, no esté dentro de las condiciones de operación adecuadas.	Buena calidad del producto con los equipos mínimos necesarios.
B.	Operaciones por lotes.	Operaciones continuas.
C.	Solo aceite automotriz.	Diferentes tipos de aceites.
D.	Tratamientos largos, muy caros y peligrosos.	Usos mínimos de químicos y reutilización de los mismos.
E.	Requiera demasiados servicios auxiliares.	Solo los servicios elementales o que se aprovechen de otros procesos.
F.	Demasiada supervisión.	Poca supervisión y mantenimiento a equipos.
G.	Almacenamiento de sustancias no regenerativas.	Se pueda dar tratamiento a las sustancias.
H.	Se necesite demasiado cuidado al manipular las sustancias, no se puede dar tratamiento y genere desechos.	Sea limpio y no genere desechos.
I.	Cuando se requieran medidas de precaución.	La seguridad sea la indispensable.
J.	Baja calidad del aceite.	Alta calidad del aceite.

Una vez establecidos los parámetros de evaluación para llevar a cabo la selección de la mejor tecnología para aceite re-refinado, en la Tabla 5.4 se presenta ésta para todas las tecnologías descritas en el capítulo anterior, en donde los valores más altos son los procesos más adecuados para llevar a cabo esta operación de reuso.

Tabla 5.4. Comparación de las tecnologías de re-refinamiento.

Factor	Ácido-Arcilla	PROP	KTI	BERC	RTI	Filtración- Destilación- Arcilla
A.	1	1	3	3	3	3
B.	3	3	5	5	5	5
C.	3	1	3	3	3	3
D.	1	3	3	1	3	5
E.	3	3	3	3	3	3
F.	3	1	3	5	5	3
G.	1	1	3	3	3	3
H.	1	1	3	3	3	1
I.	1	1	5	3	3	3
J.	3	5	3	3	3	3
Calificación	2.0	2.0	3.2	3.2	3.4	3.2
Decisión	No	No	No	No	No	No
Factor	Recyclon	Mohawk	Revivoil	Sotulub		
A.	3	5	5	3		
B.	5	5	5	3		
C.	3	5	3	3		
D.	1	3	3	3		
E.	3	3	3	3		
F.	3	3	3	3		
G.	3	5	3	3		
H.	1	5	3	3		
I.	1	5	5	3		
J.	3	5	5	5		
Calificación	2.6	4.6	3.8	3.2		
Decisión	No	Si	Si	No		

5.3 Interpretación de resultados de los procesos de re-refinamiento

En función de los datos generados en la Tabla 5.4, y con el conocimiento de que todas las tecnologías tienen el mismo fin común, se analizaron las posibles tecnologías de acuerdo a las características de cada una y a los requerimientos de las mismas, en base a ello se

observó que no todas cumplen con las especificaciones adecuadas para regenerar el aceite. Los procesos en los cuales el uso de la arcilla es un paso clave del proceso, presentan calificaciones bajas, debido particularmente por las dificultades asociadas con el manejo de los grandes volúmenes de desperdicios generados. Además, de que los rendimientos de los procesos aumentan cuando se cambia o sustituye la arcilla por un paso de hidrotatamiento.

Respecto a los procesos que emplean agentes químicos en altas cantidades, de la misma manera que en el proceso con arcillas, también obtuvieron calificaciones bajas, esto es debido principalmente al manejo y tratamientos de recuperación de los mismos, los cuales representan costos adicionales. Además, estas tecnologías resultaron inflexibles y/o relativamente complejas para operaciones continuas y el análisis de la calidad del aceite se vio afectado por el contenido de azufre o cenizas, también algunas tecnologías solo utilizan aceite automotriz como materia prima.

La tecnología Revivoil, es una de las tecnologías que presentaron una evaluación alta; sin embargo, el uso de la tecnología para admitir diferentes tipos de aceite como base de alimentación no es mencionado, además no se aprovechan corrientes de otras operaciones unitarias para poder minimizar costos energéticos y el análisis de la fracción pesada del aceite resulta diferente a las especificaciones del aceite base renovable.

La tecnología Mohawk, se muestra como la tecnología más adecuada para la regeneración de los aceites lubricantes de motor; además, esta tecnología también tiene la ventaja de admitir diferentes tipos de aceites, ésta resulta ser una tecnología flexible y adecuada para operaciones continuas, es una tecnología limpia, es decir; los desechos que se generan son tratados, como lo son: las aguas residuales y el catalizador empleado. Un aspecto importante es el relacionado a los rendimientos del proceso, siendo la calidad del aceite muy buena, el cual está listo para formularse con paquetes de aditivos y venderse al mercado, teniendo en consideración los parámetros mostrados en la Tabla 5.5.⁴⁶

Tabla 5.5. Análisis de la base del aceite.

Parámetro	Análisis del aceite pesado de acuerdo a la tecnología					
	PROP	KTI	Recyclon	Mohawk	Revivoil	Sotulub
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	51.6	86.1	79.22	54	107	76-100
Viscosidad a 100°C (mm ² /s)	~	9.9	9.42	7.4	~	~
Gravedad específica (kg/m ³)	877	918.2	878	871	882	884
Punto de flasheo (°C)	215	~	230	224	280	240
Punto de congelación (°C)	-15	-6	-14	-9	-9	-6
TAN (mg KOH/g)	~	0.04	0.01	<0.01	0.008	<0.03
Azufre (% peso)	0.03	0.4	0.5	0.02	0.03	<1.2
Contenido de ceniza (% peso)	<0.001	<0.01	<0.01	<0.001	<0.001	0.3

Al llevar a cabo una comparación entre los datos de la Tabla 5.5 y la Tabla 2.6 “Especificaciones del aceite base renovable” (Capítulo II, pág. 56). De acuerdo a las especificaciones dadas por los métodos ASTM, se aprecia que la tecnología, de nueva cuenta, que más cumple con las características especificadas es el proceso Mohawk. En las estas tablas se puede observar que los valores de viscosidad a 40 y 100 °C difieren de los valores sugeridos por la EOLCS, pero son los más cercanos en comparación con las demás tecnologías, a pesar de esto, los valores presentados tanto de densidad, número total de ácido, porcentaje de azufre y contenidos de ceniza, cumplen con los valores mostrados en los ensayos de laboratorio establecidos por la ASTM, SAE y ACC.

5.4 Bases de diseño

Las bases de diseño de proceso (process design basis, PDB), es un documento el cual sirve como base para el desarrollo del paquete de ingeniería básica, aquí se establecen requerimientos, criterios e información para el diseño de las instalaciones. Las cuales serán aquellas que el proveedor de ingeniería (CEP), deberá cumplir en el desarrollo del alcance del proyecto.⁵⁵ Está regida por ocho puntos fundamentales, los cuales se enlistan a continuación.

1. Generalidades

1.1 Función de la planta

La planta reutilizadora de aceites lubricantes tiene como objetivo principal la remoción de los compuestos de azufre, nitrógeno, halogenuros, metales y compuestos orgánicos oxigenados, así como también incrementar el contenido de compuestos saturados a un 90 % en la mezcla de hidrocarburos, para obtener como producto principal el aceite lubricante con un contenido de azufre menor o máximo de 300 ppm y como subproductos: Gasolina, diesel y asfalto.

El producto y/o los subproductos son enviados al límite de baterías (L.B.) para su envío e integración a otras unidades de proceso o almacenamiento para uso posterior.

1.2 Tipo de proceso

El proceso está fundamentado en el uso de tecnología ampliamente establecida y probada a nivel comercial por la compañía CEP, con la utilización de los catalizadores CEP-HRX de mayor actividad y de nueva generación especiales para la producción de aceite lubricante con bajo contenido de contaminantes.

El proceso de regeneración fundamentalmente considera las siguientes etapas:

- Pre-tratamiento.
- Eliminación de subproductos (agua, combustible ligero y diesel).
- Separación del aceite por medio del TFE.

- Hidrotratamiento.
- Fraccionamiento para obtener cortes del aceite lubricante a diferentes viscosidades.

2. Capacidad, rendimiento y flexibilidad

2.1 Factor de servicio

La planta debe operar durante 350 días por año, lo que es equivalente a un factor de servicio de 0.95. Con ello, se garantiza que la planta tendrá un primer ciclo de corrida del catalizador de 24 meses como mínimo procesando solo la carga de diseño.

2.2 Capacidad y rendimiento

Para la definición de una planta reutilizadora de aceites lubricantes, se considera que la planta deberá abastecer el 20 % del promedio geométrico de las cantidades sin regenerar, esto es debido a que el mercado es cambiante y los datos no se ajustan a una curva en específico para predecir el mercado, por lo cual el volumen a obtener aproximadamente es de 100,600 miles de litros por año. De esta manera la planta deberá producir aceite lubricante con las siguientes capacidades:

La capacidad de diseño es de 100,600 miles de litros/año.

La capacidad de operación normal es de 100,600 miles de litros/año.

La capacidad mínima de la planta será el 50 % (50,300 miles de litros/año) de la capacidad de diseño.

2.3 Flexibilidad

La planta procesará de forma normal la carga de diseño y operará en forma correcta y segura en el intervalo entre el 50 y el 100 % de su capacidad normal. Además, la planta debe ser diseñada para realizar un paro seguro ante condiciones anormales y no debe operar bajo las siguientes condiciones:

- Falla de vapor.
- Falla de energía eléctrica.
- Falla de aire de instrumentos.

- Falla de agua de enfriamiento.
- Falla de hidrógeno de reposición y/o recirculación.

La planta se diseñará para realizar un paro ordenado y seguro ante cualquiera de las eventualidades anteriores.

2.4 Previsión para ampliaciones futuras

No se contemplan previsiones para ampliaciones futuras, por arriba de la capacidad de diseño.

3. Especificación de la alimentación

3.1 Alimentación

La planta regeneradora de aceites lubricantes usados se debe de diseñar para procesar la corriente de alimentación presentada en la Tabla 5.6.⁵⁴

Tabla 5.6. Características de la corriente de alimentación.

Propiedad	Valor
Gravedad específica (kg/m ³)	897
Viscosidad (cSt) a 40°C	92
Viscosidad (cSt) a 100°C	13
Agua (% peso)	13.7
Contenido de cenizas (% peso)	1.51
Punto de flash (°C)	207.7
Punto de congelación (°C)	-34
Residuo de carbón (% peso)	3.25
Azufre (% peso)	1.45
Índice de viscosidad	154
Halógenos, ppm	370

Tabla 5.6. Características de la corriente de alimentación. Cont.

Propiedad	Valor
Metales inorgánicos, ppm	
Zinc	1151
Plomo	524
Hierro	212
Manganeso	3
Magnesio	312
Calcio	1295
Bario	204
Silicio	15

3.2 Hidrógeno de reposición de L. B., Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Composiciones del hidrógeno de planta.

Componente	Composición en % mol
Hidrógeno	99.9
Metano	0.1
Total	100.0

4. Especificaciones del producto

4.1 Producto, Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Características del producto.⁴⁶

Propiedad	Método	Aceite ligero	Aceite pesado
Gravedad específica (kg/m ³)	ASTM D 287	865	871
Viscosidad (cSt) a 40 °C	ASTM D 445	20.1	54
Viscosidad (cSt) a 100 °C	ASTM D 445	4.0	7.4
Contenido de cenizas (% peso)	ASTM D 482	<0.001	<0.001
Punto de flasheo (°C)	ASTM D 92	185	224
Punto de congelación (°C)	ASTM D 5950	-12	-9
Índice de viscosidad	ASTM D 2270	90	105
Azufre (% peso)	ASTM D 3120	0.05	0.02
Saturados (% peso)	ASTM D 2887	92	92
TAN mg KOH/g	ASTM D 664	<.01	<.01
Color	ASTM D 1500	<0.5	<0.5
Metales inorgánicos, ppm			
Zinc		<0.2	41
Plomo		<1	8.0
Hierro		0.5	13.0
Manganeso		<1	0.08
Magnesio		<1	0.78
Calcio		<0.2	13.2
Bario		<10	--
Silicio		<5	--

4.2 Subproductos, Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Especificaciones de los subproductos.

Producto	Especificación
Combustible ligero (gasolina)	(1)
Gas combustible (diesel)	(1)
Asfalto	(1)

(1) Valor a definir durante la Ingeniería Básica de CEP.

5. Agentes químicos y catalizadores, Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Especificaciones de los agentes químicos y catalizadores.

Producto requerido	Especificación
Hidróxido de sodio	(1)
Catalizador CEP-HRX	(1)
Inhibidor de corrosión	(1)

(1) Valor a definir durante la Ingeniería Básica de CEP.

6. Efluentes

6.1 Líquidos

La planta deberá contar con drenaje pluvial (DP), drenaje químico (DQ) y drenaje sanitario (DS) dentro de L.B. En las tomas de muestra se deben instalar sistemas de muestreo cerrado para evitar derrames al drenaje, también deben tenerse los sistemas requeridos para el vaciado de equipos en paros y arranques de la unidad.

6.2 Sólidos

Los catalizadores al final de su vida útil se envían en tambores a confinamiento autorizado, para posteriormente ser regenerados de acuerdo a lo establecido por la tecnología CEP-Mohawk.

7. Servicios Auxiliares

7.1 Vapor, Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Condiciones del vapor.

Vapor de baja presión			
Variable	Mínimo	Normal	Máximo
Presión, kg/cm ² man	3.5	3.5	5.5
Temperatura, °C	160	180	200

7.2 Condensado

El condensado generado en la planta será recuperado y enviado a límites de batería para su tratamiento correspondiente de acuerdo a las condiciones siguientes, Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Condiciones de condensado de vapor.

Variable	Mínimo	Normal	Máximo
Presión, kg/cm ² man	5.5	5.5	6.0
Temperatura, °C	60	60	100

7.3 Agua.

7.3.1 Agua de enfriamiento, Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Condiciones de agua de enfriamiento.

Sistema de enfriamiento	Torre de enfriamiento		
Condiciones de suministro dentro del límite de batería			
Variable	Mínimo	Normal	Máximo
Presión, kg/cm ² man	3.5	4.0	5.0
Temperatura, °C	30	32	33
Disponibilidad	La requerida		
Condiciones de retorno dentro del límite de batería			
Variable	Mínimo	Normal	Máximo
Presión, kg/cm ² man	2.1	3.0	3.5
Temperatura, °C	39	42	43

Los parámetros listados en la Tabla 5.14 muestran los valores máximos⁵⁵ esperados de contaminantes y están dentro de los criterios aceptados para la recirculación del agua de enfriamiento. Los valores exactos serán confirmados tomando en cuenta prevenciones por corrosión, dispersantes, control biológico, etc. Los cuales serán definidos durante la etapa IPC del proyecto.

Tabla 5.14. Parámetros del agua de enfriamiento.

Agua de enfriamiento	
Amoníaco, ppmw	<5
Bicarbonato, ppmw	<100
Calcio como CaCO ₃ , ppmw	<800
Cloruros, ppmw	<1000
Demanda Química de Oxígeno, DQO, ppmw	<50
Cloro, Residual libre Cl ₂ , ppmw	0.2 a 1.0
Conductividad, µS/cm	<8000
Hierro, ppmw	<2
Manganeso, ppmw	<0.3
Nitratos +Nitritos, ppmw	<160
pH, @ 25°C	7.0-8.0
Fosfato, ppmw	<2.2
Silica como SiO ₂	<150
Sodio, ppmw	<900
Sulfato, ppmw	<1500
Alcalinidad total como CaCO ₃ , ppmw	<350
Total de sólidos disueltos, ppmw	<5000
Dureza total como CaCO ₃ , ppmw	<1000
Total de solidos suspendidos, ppmw	<35
Turbidez, NTU	<50

ppmw= partes por millón en peso.

7.3.2 Agua para servicios, Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Condiciones de agua de servicios.

Condiciones dentro del límite de batería	
Presión (min/norm/máx), kg/cm ² man	---/5.0/---
Temperatura (min/norm/máx), °C	---/25 (Ambiente)/---
Presión de diseño mecánico, kg/cm ² g	10
Temperatura de diseño mecánico, °C	70
Recurso	Suministro de agua pretratada

7.3.3 Agua potable, Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Condiciones de agua potable.^a

Requerimientos del agua potable en el límite de baterías	
Presión (min/norm/máx), kg/cm ² man	---/3.5/---
Temperatura (min/norm/máx), °C	---/25 (Ambiente)/---
Presión de diseño mecánico, kg/cm ² man	6.0
Temperatura de diseño mecánico, °C	70
Parámetros del agua potable	
pH valor @ 25 °C	6.8-8.5
Total de sólidos disueltos, ppmw ^b	<1000
Cloruros. ppmw ^b	<250
Dureza (CaCO ₃), ppmw ^b	<250

^aLos requerimientos de agua potable para consumo humano, lavado de ojos y baños de seguridad, serán confirmados por el proveedor del paquete de ingeniería (CEP).

^bPartes por millón en peso.

7.3.4 Agua contra incendio, Tabla 5.17.

Tabla 5.17. Condiciones de agua contra incendio.

Condiciones dentro del límite de batería	
Presión (min/norm/máx), kg/cm ² man	---/---/12.3 ^a
Temperatura (min/norm/máx), °C	---/25 (Ambiente)/---
Presión de diseño mecánico, kg/cm ² man	TBD ^b
Temperatura de diseño mecánico, °C	70

^aPresión máxima para sistemas nuevos, de acuerdo con las NRF-016-PEMEX-2010 y NRF-128-PEMEX-2011.

^bSerá determinado durante el desarrollo de la Ingeniería Procura y Construcción, IPC.

7.4 Aire

7.4.1 Aire de instrumentos

Se suministrará un paquete completo que incluya un compresor en operación normal y otro de relevo y un paquete de secado de aire de instrumentos incluyendo pre y post- filtros, así como tanques acumuladores de aire con toda la instrumentación y conexiones al sistema de medición de la planta, Tabla 5.18.

Tabla 5.18. Condiciones de aire de instrumentos.

Condiciones en el cabezal de distribución	
Presión (min/norm/máx), kg/cm ² man	6.0/6.5/7.0 ^a
Temperatura (min/norm/máx), °C	20/40/50
Presión de diseño mecánico, kg/cm ² man	10.5
Temperatura de diseño mecánico, °C	80
Temperatura de rocío	-40
Impurezas (aceite, grasa, polvo)	Ninguno

^aLa presión máxima de 7.0 kg/cm²g debe ser especificada como la presión en la red de tuberías de aire de instrumentos en la parte más lejana de la descarga del compresor.

7.4.2 Aire de Planta

Se deberán suministrar los pre-filtros correspondientes, un tanque acumulador de aire de planta, así como un paquete de secado. El sistema de aire de planta, Tabla 5.19, estará integrado al sistema de aire de instrumentos, usando un compresor de aire común.

Tabla 5.19. Condiciones de aire de planta.

Variable	Mínimo	Normal	Máximo
Presión, kg/cm ² man	6.0	7.0	7.5
Temperatura, °C	20	40	50
Presión de diseño mecánico, kg/cm ² man	10.5		
Temperatura de diseño mecánico, °C	80		

7.5 Energía eléctrica

El suministro de las diferentes cargas de energía a la unidad, serán provistas por la Comisión Federal de Electricidad, de acuerdo a los datos confinados en la Tabla 5.20.

Tabla 5.20. Características eléctricas.

Potencia del motor kw (cp)	Tensión diseño motor (volts)	Tensión del sistema (volts)	Frecuencia (Hertz)	Fases
Menor de 0.746	115,220	120,220	60	1 ó 3
De 0.746 hasta 130.55	460	480	60	3
De 149.2 hasta 1492	4,000	4,160	60	3
Mayores de 1492	13,200	13,800	60	3

7.6 Iluminación e instrumentos, Tabla 5.21.

Tabla 5.21. Características eléctricas de iluminación e instrumentos.

Corriente de alimentación:	127/220 Volts, 1/3 fases y 60 ciclos.
Corriente para instrumentos y control:	120 volts, 1 fase y 60 ciclos. Corriente directa: 24 volts
Acometida de la corriente dentro de L. B.	Subterránea.

Notas: Las características de alimentación a motores, características de instalaciones, corriente de alumbrado y alimentación eléctrica para sistemas de control e instrumentación, será de acuerdo a lo indicado en la NOM-001-SEDE-2012, “Diseño de instalaciones eléctricas”.

8. Localización de la planta

La planta se ubicará preferentemente en el Estado de México, debido a que es en este estado donde se genera la mayor cantidad de desperdicio de aceite lubricante en el país.³⁸

8.1 Condiciones climatológicas, Tabla 5.22.

Las condiciones climatológicas son los datos referentes al sitio donde se ubicara la planta, con el fin de ser tomadas en consideración para el diseño de las operaciones unitarias.

Tabla 5.22. Condiciones de temperatura ambiente.

Temperatura	Bulbo húmedo (°C)	Bulbo seco (°C)
Máxima	30	17
Mínima	3.0	0
Promedio	24	11

8.2 Humedad relativa, Tabla 5.23.

Tabla 5.23. Condiciones de humedad relativa.

Promedio anual	40 %
----------------	------

8.2 Precipitación Pluvial, Tabla 5.24.

Tabla 5.24. Condiciones de precipitación pluvial.

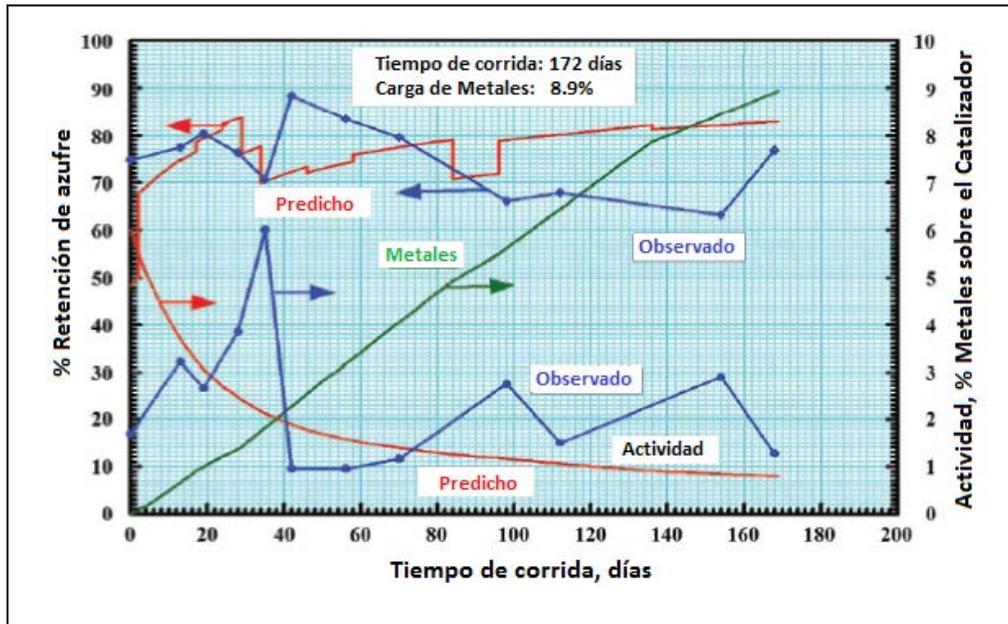
Total anual, mm	779 mm
Máxima, mm	54.2 mm

5.5 Otros

Como se describió en el Capítulo IV, las tecnologías que presentan las mejores características de aceite lubricante re-refinado como producto terminado, son aquellas que contemplan en el proceso, el uso de la hidrogenación como paso intermedio a la destilación. Es por ello que la tecnología Mohawk (CEP), ha llevado a cabo estudios con el fin de lograr avances en las tecnologías de hidrot ratamiento. El reto en los procesos de hidrot ratamiento de aceite usado es tal, que es difícil no tener cambios frecuentes de catalizador, algunas re-refinerías tienen “lechos de respaldo” para funcionar como reactores de sacrificio en el reactor catalítico principal. Estos lechos tienden a durar uno o dos meses como máximo antes de ser cambiado por otro lecho. Por lo que teniendo lechos de respaldo extras en los reactores, incrementa los costos de inversión y de mantenimiento.⁵⁶

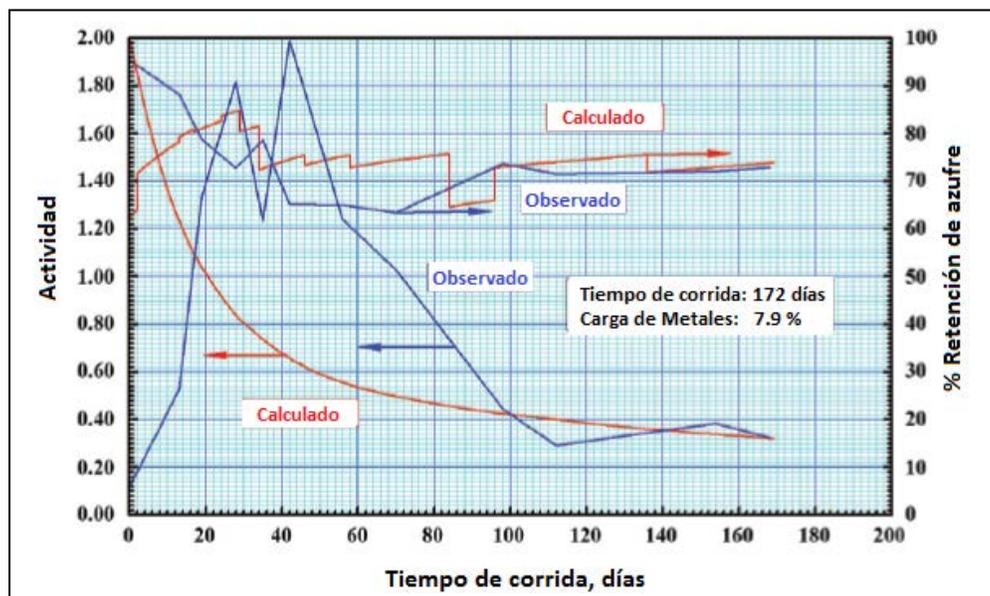
En los Gráficos 5.1 a 5.3, se muestran los análisis realizados en tres reactores con una configuración en serie por CEP, por medio de dos catalizadores: El CEP HRX-597 y el comercialmente usado. Con los datos experimentales tomados durante ciento setenta y dos días, la compañía CEP desarrollo modelos matemáticos en los tres reactores para las diferentes actividades presentadas por el catalizador y peculiaridades de cada unidad. Los modelos de desulfuración/desactivación permiten a los operadores optimizar variables de operación y lograr el óptimo funcionamiento de los tres lechos de catalizador en los reactores. Las comparaciones de la actividad del catalizador solo son validas para el mismo reactor y, sirven como guía para ayudar a predecir las especificaciones del producto.

Gráfico 5.1. Comportamiento del reactor DC-101.



En el Gráfico 5.1, la carga de metales, el cual es una indicación de la incrustación de los mismos y que disminuye la actividad del catalizador, fue de un 8.9 %, por otra parte la retención de azufre se mantuvo en un intervalo del 65 al 85 % para el catalizador CEP. Sin embargo, para el catalizador comercial los resultados experimentales muestran que para la misma carga de metales el porcentaje de azufre retenido fue de 47 al 60 %.

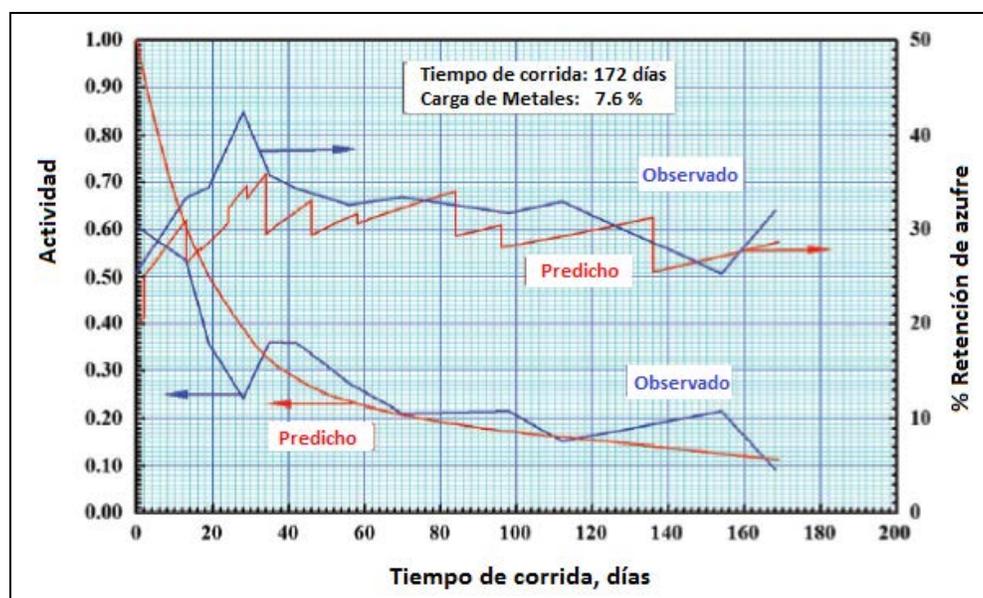
Gráfico 5.2. Comportamiento del reactor DC-102.



Al observar el Gráfico 5.2, se puede apreciar una carga de metales de 7.9 %, una retención de azufre con el catalizador CEP entre 65 y 85 % y una variación del 15 al 35 % con relación al catalizador comercial.

El Gráfico 5.3, muestra los resultados para el tercer reactor, donde la carga de metales fue de 7.6 % y la retención de azufre resultó ser más baja con un valor del 25 al 40 %, por lo que podemos decir que en los reactores DC-101 y DC-102 se realiza una gran desulfurización respecto a este último, debido a que la mayoría del azufre ha sido removido en gran cantidad. Por otra parte el catalizador comercial como se ha visto en las gráficas anteriores, ha tenido un pobre desempeño retirando solamente del 4 al 12 % de azufre.

Gráfico 5.3. Comportamiento del reactor DC-103.



Por lo que uno de los factores que más complejidad tiene en una planta de regeneración de aceites, es el cambio del lecho de catalizador, ya que además de presentar un costo elevado, los cambios deben de realizarse con extrema precaución debido a los agentes oxidantes que desactivan al catalizador, lo que disminuye la rentabilidad del proceso.

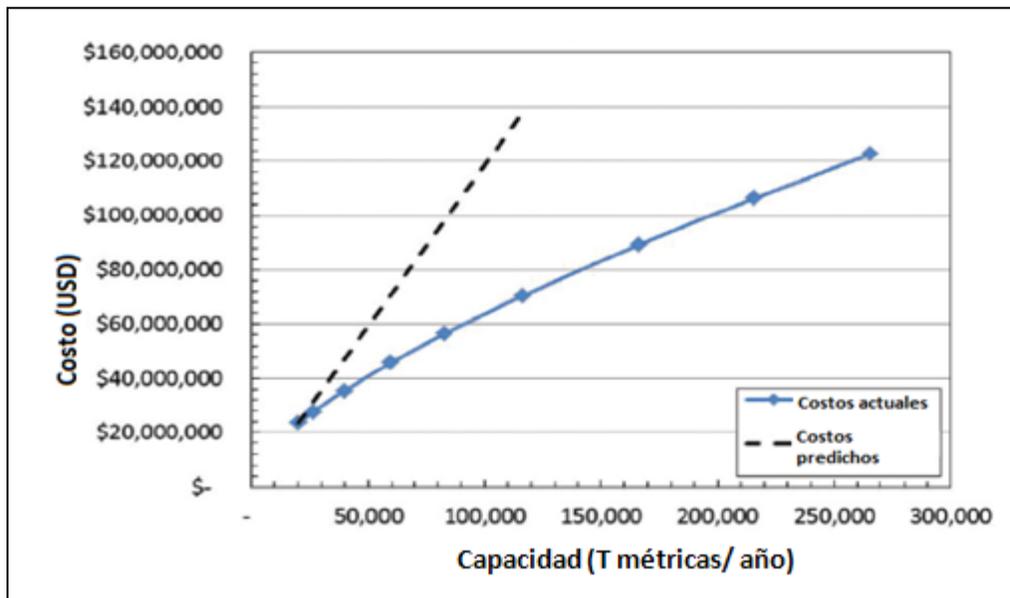
Los modelos matemáticos desarrollados para este reactor (DC-103), así como para los demás, tienen la finalidad de ser la guía en el diseño de reactores para el re-refinamiento,

asegurando las óptimas condiciones de proceso que cumplan con las especificaciones del aceite de base renovable, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 2.6 (Capítulo II, pág. 56).

En base a la economía del re-refinamiento y a los Gráficos 5.1 a 5.3 mostrados con anterioridad, los catalizadores del proceso de la tecnología Mohawk presentan un comportamiento factible, teniendo una duración de 24 meses, antes de que el catalizador se desactive por completo, impidiendo eliminar el azufre de la base del aceite. Además, CEP recomienda que para construir y operar una re-refinería, se debe disponer con suficiente aceite lubricante usado para alimentar la planta.

Por lo que para ser un proceso rentable, los diseñadores CEP establecen que se debe tener como mínimo una capacidad anual de 20,000 toneladas de alimentación, Gráfico 5.4.

Gráfico 5.4. Costos requeridos para varias capacidades de planta, usando la tecnología CEP.

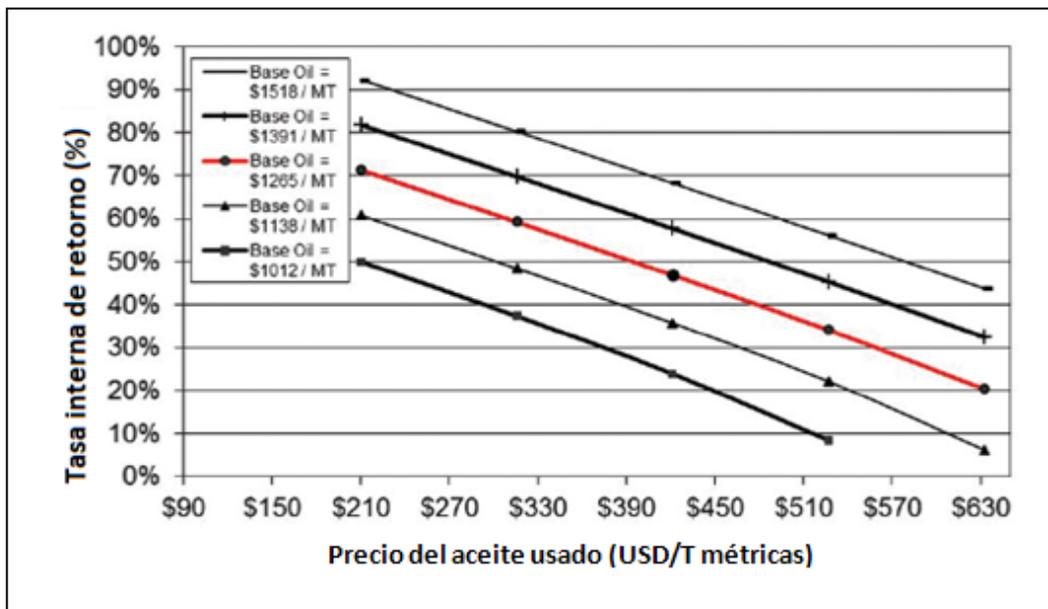


Es claro que la relación entre el costo y la capacidad no siguen un comportamiento lineal (como se muestra en la línea punteada del Gráfico 5.4). Por lo tanto, mientras mayor sea la capacidad de la planta, será menor el costo requerido por tonelada métrica de aceite usado procesado.

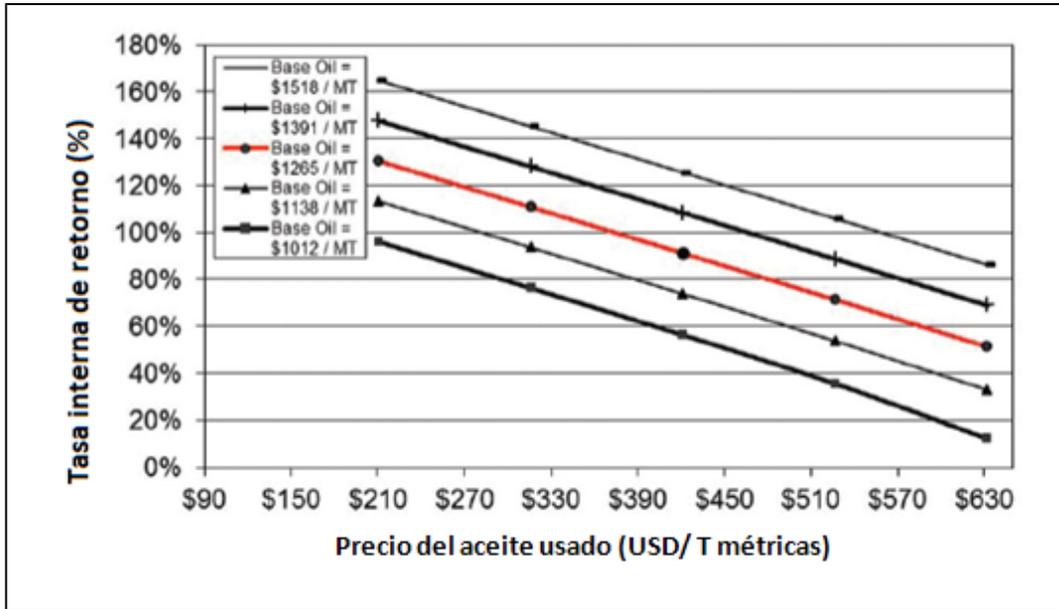
En los Gráficos 5.5 a 5.6 se muestra la relación entre los precios de aceite usado y la tasa de retorno de varios precios de la base del aceite. La tasa de retorno para una planta de 165,000 T/año que invierte \$422 (USD) por tonelada de aceite usado y vende la base del aceite a \$1,265 (USD), es cerca del 90 %, mientras que para la planta de 40,000 T/año con el mismo aceite usado y precios de base del aceite, la tasa interna de retorno es cerca del 45 %.

Los costos laborales, son unos de los mayores factores en los costos de operación. Sin embargo, los costos laborales no incrementan para una planta de mayor capacidad, ya que se necesita el mismo número de personal para operar una planta de 40,000 T/año o de 165,000 T/año, es decir la capacidad de la planta no importa. Esta es la principal razón de porque la tasa de retorno para una planta de mayor capacidad es mas grande. Por lo tanto, es recomendado maximizar el tamaño de la planta, donde el único factor limitante sería el volumen de recolección.⁵⁶

Gráfico 5.5. Re-refinería Grassroots 40,000 T anuales, tasa interna de retorno contra precios de aceite usado.



**Gráfico 5.6 Re-refinería Grassroots 165,000 T anuales,
tasa interna de retorno contra precios de aceite usado.**



CAPÍTULO VI. PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE RE-REFINAMIENTO

6.1 Generalidades

En éste capítulo se proponen modificaciones de la tecnología para el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados, la cual fue seleccionada a través de una comparación cualitativa. Las modificaciones aquí propuestas se fundamentan en base a los doce principios de la Química e Ingeniería Verde, con el propósito de implementar una industria más sostenible en la obtención de aceites lubricantes básicos.

6.2 Química verde

A lo largo de la historia las estrategias destinadas a controlar la contaminación han pasado por distintas etapas, inicialmente se consideró suficiente diluir los contaminantes presentes en efluentes y/o residuos hasta llegar a las concentraciones exigidas por la legislación; pero el continuo crecimiento, tanto en cantidad como en variedad, de contaminantes liberados al medio ambiente, la necesidad creciente de controlar mejor esta liberación y la presión ejercida por los movimientos ambientalistas hicieron necesario tratar los efluentes y residuos, surgiendo así los tratamientos conocidos como “*end of pipe*” diseñados para disminuir la concentración de los contaminantes en residuos y/o efluentes sin modificar el proceso en el cual son generados.

En la década de los 90's comenzó a desarrollarse la idea de que la mejor forma de solucionar los problemas originados por los contaminantes es no generarlos, para lo cual es necesario evolucionar desde una planificación remediadora hacia una preventiva, cuyo objetivo es introducir en el proceso de producción las modificaciones necesarias para minimizar y, si es posible, eliminar tanto la generación de residuos y efluentes, así como la utilización de sustancias tóxicas. A principios de esta década surgieron en el mundo y casi simultáneamente distintas estrategias preventivas como las siguientes:⁵⁷⁻⁶⁰

- *Producción más limpia*: Desarrollado en 1989 por el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente).
- *Ecoeficiencia*: Desarrollado en 1990 por el Consejo Mundial para el Desarrollo Sustentable.
- *Prevención de la contaminación*: Introducido en la legislación de los Estados Unidos en 1990 en el “Acta de prevención de la contaminación”.

Éstas se basan en la misma idea: integrar la reducción de la contaminación al proceso de producción e incluso al diseño de producto, recurriendo a la revisión y modificación de los procesos con la finalidad de eliminar todas las salidas que no sean productos terminados o materiales reciclables. Como consecuencia de la promulgación, en 1990, del acta de prevención de la contaminación en los Estados Unidos, la Sociedad Química Americana (American Chemical Society, ACS) desarrolló el concepto de Química Verde (cuyo origen del vocablo proviene literalmente del idioma inglés Green Chemistry) o Química Sostenible, que se rige por doce principios establecidos:⁵

Principios de la química verde

1. **Prevención:** Es mejor prevenir la generación de un residuo, que tratarlo o eliminarlo después de haberlo generado.
2. **Economía atómica:** Los métodos de síntesis deberán diseñarse de tal manera que se incorporen al máximo, en el producto final, todos los sustratos usados durante el proceso.
3. **Síntesis químicas menos peligrosas:** Los métodos de síntesis deberán ser diseñados para utilizar y generar sustancias que presenten baja o nula toxicidad, tanto para el ser humano como para el ambiente.
4. **Diseño de químicos seguros:** Los productos químicos se diseñarán de manera que mantengan su eficacia y baja toxicidad.

5. **Uso de disolventes seguros o auxiliares:** Evitar el empleo de sustancias auxiliares como disolventes, reactivos de separación, etc., y en caso de que se empleen deberán ser lo más inocuos posible.
6. **Diseño de la eficiencia energética:** Los requerimientos energéticos en un proceso químico se catalogan por su impacto económico y al medio ambiente, por lo tanto se sugiere llevar a cabo los métodos de síntesis a temperatura y presión ambiente.
7. **Uso de materia prima renovable:** La materia prima debe ser preferiblemente renovable en lugar de agotable, siempre que sea técnica y económicamente viable.
8. **Reducir derivados:** Evitar el uso de grupos de bloqueo, de protección-desprotección o la modificación temporal de los procesos físico-químicos, ya que su empleo requiere reactivos adicionales y genera residuos.
9. **Catálisis:** Considerar el empleo de catalizadores, lo más selectivo posible, de preferencia de origen natural.
10. **Diseñar sustancias biodegradables:** Los productos deberán ser diseñados de tal manera que al final de su vida útil no persistan en el ambiente.
11. **Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación:** Las metodologías analíticas necesarias serán desarrolladas en el momento del proceso, lo que permitirá un seguimiento y control en tiempo real del proceso, previo a la formación de sustancias peligrosas.
12. **Químicos seguros para prevenir accidentes:** Las sustancias y la forma de una sustancia usada en un proceso químico deberá ser elegida para reducir el riesgo de accidentes químicos incluyendo las emanaciones, explosiones e incendios.

La llamada Química Verde, Preventiva o Sostenible, es decir *el acercamiento que proporciona una metodología fundamental para cambiar la naturaleza intrínseca de un producto químico o proceso y que es inherentemente de menor riesgo para la salud humana y el ambiente, mediante la utilización de un número de principios que reducen o eliminan el uso o generación de sustancias peligrosas*, está basado en un fuerte desarrollo científico guiado por la necesidad económica de lograr un desarrollo sostenible; se trata de una herramienta imprescindible cuando se hace necesario introducir mejoras tecnológicas, ya que se ocupa de estudiar y modificar todos los aspectos de los procesos químicos que

generen impactos negativos sobre la salud humana, así como en el ambiente. Se parte de la base de que el camino más eficiente de prevenir la contaminación consiste en:

- Diseñar productos nuevos que sean útiles y viables comercialmente, pero cuya toxicidad sea mínima.
- Diseñar, para productos ya existentes, pasos sintéticos alternativos que no requieran sustratos o disolventes tóxicos ni generen subproductos tóxicos.

A través del tiempo, los químicos se han ocupado de diseñar y rediseñar sus productos para lograr una mayor eficiencia en los procesos. A partir de la consideración de las propiedades físicas y químicas de las distintas moléculas en estudio, se buscaba obtener productos con propiedades específicas. De esta forma han sido los principales arquitectos de los productos actualmente en uso y son sus diseños estructurales los que tienen efecto tanto en el ser humano como en el ambiente.

Así, la necesidad de reducir o eliminar el uso o generación de sustancias peligrosas en el diseño, manufactura y aplicación de los productos químicos de manera tal de prevenir la contaminación, pone al químico ante un cambio muy importante tanto en la forma de encarar la resolución de los problemas como en su formación personal.⁵⁷⁻⁶⁰

6.3 Propuesta de una Industria más sostenible con base en los principios de la Química verde

La química verde, la cual ha sido ampliamente reconocida y aceptada como un nuevo medio para un desarrollo sostenible, se guía en la aplicación en mayor o menor grado de los doce principios de la química verde, con ello se contribuye a la reducción de los productos contaminantes generados durante los procesos químicos, así como para reemplazar reactivos que dañan al ambiente. Asimismo, debe tenerse en cuenta, que el objetivo real no es la aplicación total de los principios (situación ideal), sino la del mayor número de éstos

(mayor acercamiento verde), de esta forma se encontró incidencia en los siguientes principios:

1.- Prevención: Si bien, de acuerdo a la literatura del re-refinamiento de aceites lubricantes usados, no hay tecnología la cual pueda evitar la total generación de un residuo o el tratamiento del mismo. Sin embargo, la tecnología seleccionada “Mohawk”, asegura la menor generación de residuos, siendo este solamente el agua residual, la cual puede ser tratada en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Asimismo, todo aceite lubricante regenerado es de calidad superior al aceite lubricante virgen, ya que proporciona una mejor lubricación, son más resistentes a la oxidación y producen menos depósitos tanto de carbón como de lodos. Debido, en gran parte, a que los aceites regenerados han sido tratados tres veces: La primera durante la refinación del crudo, la segunda en los motores de los vehículos en donde se presenta la descomposición de las moléculas más débiles y por último durante la regeneración en la cual se eliminan los compuestos inestables junto con otras impurezas.²⁷

5.- Uso de disolventes seguros o auxiliares: De acuerdo a la tecnología Mohawk, que mediante un hidrotratamiento produce una alta calidad de base del aceite, aquí es apropiado resaltar que no se hace uso de ningún tipo de disolventes, lo que coloca a este proceso en un buen contexto con relación a la química verde. Sin embargo, existen otras opciones que involucran el uso de disolventes como el propano líquido, el cual tiene como inconveniente que bajo ciertas condiciones, la extracción con propano muestra una concentración de compuestos oxidados en la base del aceite más alta que la requerida para la formulación del aceite lubricante, además, es costosa, necesita ser licuado y requiere destilación al vacío.⁶⁴

Otra propuesta adecuada, para la extracción de aceite lubricante usado es mediante el empleo de etano en condiciones supercríticas ya que disuelve preferencialmente la fracción de la base del aceite lubricante, precipitando compuestos tales como hidrocarburos pesados más fácilmente que el propano. Como consecuencia, con el uso de la extracción mediante el etano supercrítico, los materiales no deseados disminuyen y la calidad del aceite base incrementa. Sin embargo, una limitante en el uso de este medio de extracción son los rendimientos asociados al proceso los cuales van del 49.1 al 48.8 %.⁶³

Otra opción que tiene un acercamiento a la filosofía de la química verde es el empleo de disolventes de hidrocarburo y un desemulsificante, las cuales ofrecen las siguientes ventajas:⁶⁴

- Las condiciones del proceso de tratamiento se realizan a condiciones ambientales.
- Se tienen bajos costos de operación y de inversión.
- Disolventes no tóxicos.

En la Tabla 6.1 se confinan algunas propiedades físicas que presentan los disolventes de hidrocarburo y en la Tabla 6.2 se muestran las propiedades para el desemulsificante.

Tabla 6.1. Propiedades físicas del disolvente.

Propiedad física	Condensado estabilizado
Gravedad específica	0.7433
Gravedad API @ 15/15 °C	58.9
Contenido de sal, NaCl, ppm	<1
Presión de vapor reid, psi	10.3
Análisis, % peso	
Dióxido de carbono	0.02
Metano	0.121
Etano	0.196
Propano	0.890
<i>Iso</i> -butano	0.838
<i>n</i> -butano	2.196
<i>Iso</i> -pentano	2.598
<i>n</i> -pentano	3.047
Hexanos	7.569
Heptanos	14.642
Octanos	19.555
Nonanos	14.520
Decanos	10.696

Tabla 6.2. Propiedades físicas del agente desemulsificante.

Punto flash, °C	69
Gravedad específica @ 20°C	0.87
Punto de ebullición, °C	185

De esta manera, cuando el disolvente es agregado al aceite lubricante usado, este disuelve al aceite y flocula a los contaminantes como metales y cenizas, etc. En las figuras 6.1 a 6.3 se ilustran los resultados obtenidos para los análisis de las propiedades físicas del aceite a diferentes relaciones del disolvente-aceite, la cual resultó ser de 4:1.

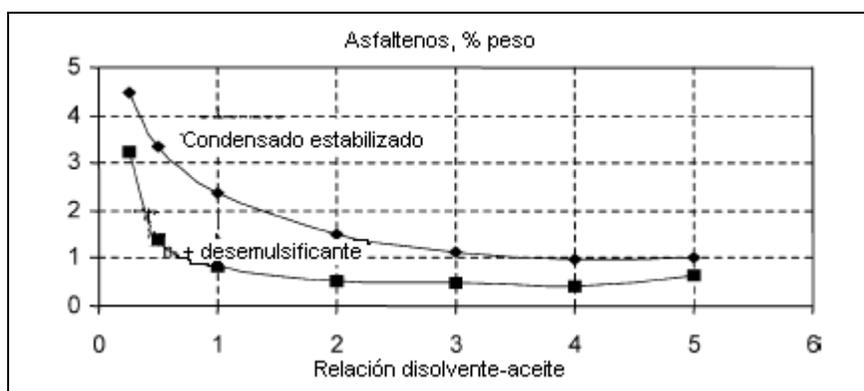


Figura 6.1. Contenido de asfalteno % peso contra condensado estabilizado a diferentes relaciones disolvente-aceite.

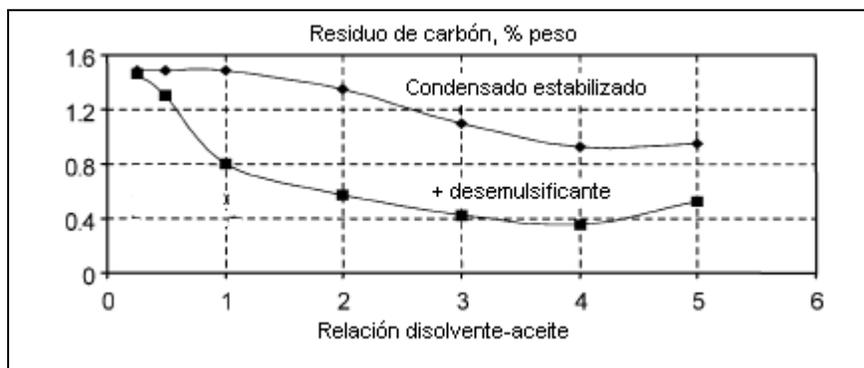


Figura 6.2. Residuo de carbón % peso contra condensado estabilizado a diferentes relaciones disolvente-aceite.

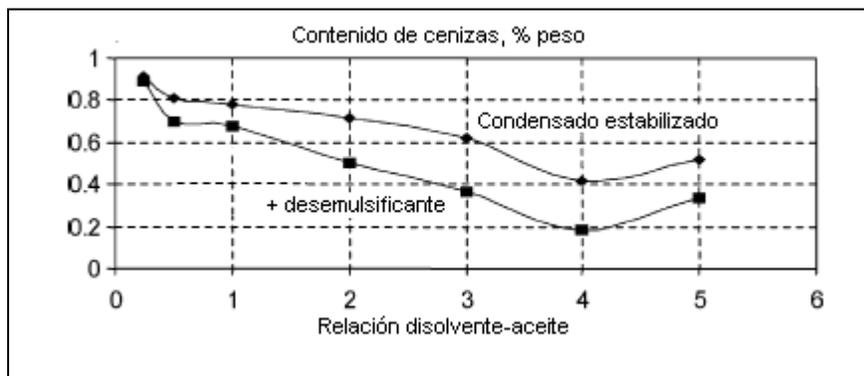


Figura 6.3. Contenido de cenizas % peso contra condensado estabilizado a diferentes relaciones disolvente-aceite.

Una de las principales diferencias entre otros disolventes comparados con el condensado estabilizado, es que este contiene un alto porcentaje de compuestos de alto peso molecular. Es sabido que los compuestos que muestran una mejor solubilidad son aquellos que tienen parámetros de solubilidad cercanos el uno del otro. El aceite lubricante es una mezcla de compuestos de alto peso molecular, por lo que este debe de tener un parámetro de solubilidad similar a los compuestos que constituyen el condensado estabilizado. Es por ello que el disolvente propuesto representa una mayor ventaja en la eliminación de contaminantes ante disolventes utilizados en las tecnologías estudiadas, teniendo un rendimiento del 79 % volumen. Con lo que se previene de manera por demás satisfactoria la generación de residuos y la contaminación del ambiente.⁶⁴

Además, la extracción con disolvente remueve aromáticos (compuestos insaturados) e incrementa el nivel de saturados, produciendo aceite lubricante dentro de la clasificación API Grupo I, Tabla 6.4.³¹

6.- Diseño de la eficiencia energética: Unos de los mayores procesos que requieren gran cantidad de energía en la industria química, son la separación y purificación. Procesos de separación o purificación llevados a cabo a través de la destilación, recristalización, ultrafiltración, hitrotratamiento, etc. los cuales garantizan la separación de las impurezas en el producto. De esta manera, al diseñar un proceso en el cual se minimiza la necesidad de separaciones de este tipo, con la química verde se estaría asegurando que en la mayor parte

del proceso exista una gran disminución del consumo energético, ya sea; térmica, eléctrica, entre otras, las cuales son necesarias para obtener el producto.⁵

Cabe mencionar que el proceso seleccionado de re-refinamiento requiere solamente la mitad de energía que sería requerida en la producción de aceite lubricante a partir de un barril de aceite crudo.³¹ Aunque, si bien, esta comparación es obvia debido a las grandes dimensiones manejadas en el procesamiento del crudo y al gran tratamiento que se le da a este mismo para la obtención de aceite lubricante virgen.

Sin embargo, la tecnología seleccionada utiliza un paso de hidrotratamiento en el cual los requerimientos de energía son elevados, debido a las condiciones de operación para la efectiva eliminación de contaminantes.⁴⁶ Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Resumen de los servicios auxiliares de las tecnologías.

Tecnología Servicio Aux.	Ácido- Arcilla	PROP	KTI	Mohawk	Revivoil
Agua de proceso (kg/t)	130	1,280	2,000	2,000	226
Electricidad (kWh/t)	~	94	94	100	55
Vapor 7-10bar (kg/t)	~	444	27	25	800
Hidrógeno (kg/t)	~	~	29(m ³ /h) ^a	2.5	2.5
Nitrógeno (m ³ /h)	~	~	1.6	~	~
Aditivos (m ³ /h)	~	~	0.25	~	~

^aNo se pudo convertir a kg/t por que se desconocen las condiciones de P y T del hidrógeno.

Por lo que una alternativa sería mediante una extracción con disolventes de hidrocarburo, en donde se disminuirían drásticamente los requerimientos energéticos debido a que el tratamiento de la base del aceite se realiza a condiciones ambientales, reduciendo también los costos operacionales.⁶⁴

7.- Uso de materia prima renovable: Sin duda alguna, los procesos en los cuales la materia prima sea inagotable, seguirán teniendo un auge en la actualidad. Los procesos deben ser sostenibles para poder saciar las necesidades actuales sin poner en peligro la disponibilidad de recursos para las futuras generaciones.

Hoy en día, las materias primas más frecuentemente conocidas como renovables, son aquellas asociadas con materiales biológicos. Sin embargo, la diferencia entre un recurso renovable y no renovable radica en el concepto del “tiempo”. Puesto que los combustibles fósiles son clasificados como recursos no renovables. Excepto por el hecho de que estos requieren millones de años para renovarse, entonces los combustibles fósiles pueden ser considerados como renovables, en cuanto que la vegetación puede ser convertida una vez más a petróleo.⁵

De acuerdo a lo anterior, nuestra materia prima no hubiera surgido sin el petróleo, actualmente no dependemos del mismo, puesto que existe gran cantidad de aceite lubricante por reutilizar, además de que la base del aceite lubricante gastado, posee las mismas propiedades al final de su uso en el motor de combustión interna,³ por lo cual es factible el reuso del mismo, puesto que los aditivos son los únicos compuestos que presentan degradación a lo largo de la vida del aceite lubricante.^{15,22}

9.- Catálisis: La tecnología Mohawk tiene el uso del hidrotratamiento como paso intermedio a la destilación, con lo que se asegura la producción de un aceite lubricante de alta calidad, el cual cumple con las características de la clasificación del API Grupo II. Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Clasificación API de la base del aceite.

Grupo ¹	Azufre	Compuestos Saturados	Índice de viscosidad
I	>300ppm	<90%	≥80-<120
II	≤300ppm	≥90%	≥80-<120
III	≤300ppm	≥90%	≥120
IV	Polialfaolefinas(PAO)		
V	Cualquiera no clasificado en los Grupos I,II,III,IV,V.		

¹Compañías usualmente usan sus propios logos para la comercialización: Grupo 1-1/2 y Grupo 2+

Con relación a este principio, el catalizador (CPE-HRX) usado por la tecnología Mohawk, asegura la eliminación de azufre, compuestos nitrogenados, compuestos aromáticos e incrementa los compuestos saturados; sin embargo, no se proporciona información sobre sus características físicas y químicas, “*state of the art re-refining*”, así como del número de veces que este puede ser reutilizado (*turnover number*), las cuales son fundamentales para obtener un aceite de alta calidad. Además, aquí es apropiado comentar que sin las propiedades del catalizador no es factible llevar a cabo el diseño de un buen proceso de obtención, procesos de retratamiento, así como las respectivas consideraciones de salud, seguridad de proceso, etc.

En este sentido, las regulaciones internacionales como la EPA, enlistan a los catalizadores de hidrodesulfuración como desechos peligrosos. Se recomienda manejar este material como material pirofórico y mantener el catalizador gastado almacenado en recipientes cerrados libres de oxígeno, humedecido con una solución de carbonato de sodio y lejos de combustibles. El personal encargado de la descarga y manejo del catalizador gastado, debe contar con su equipo de seguridad adecuado, mascarillas con aire de respiración, además de estar debidamente entrenado y supervisado.⁶¹

Es por ello que la química verde en vez de aceptar generación de residuos y almacenamientos inevitables, previene la contaminación, de tal manera que la sociedad pueda disfrutar del uso de los productos de los cuales depende, de una manera amigable con el ambiente y económicamente competitiva.⁶² Por lo cual, se propone el uso de un catalizador benigno tal como lo son las arcillas, remplazando catalizadores peligrosos, en este caso se propone el empleo de la arcilla bentonítica Tonsil Actisil FF, la cual presenta las siguientes propiedades: Presenta un área superficial de $198.7 \text{ m}^2/\text{g}$, un volumen de poro de $32.04 \cdot 10^{-2}/\text{g}$ y un diámetro de poro de 77.8 \AA . Esta arcilla tiene como característica que posee propiedades acidas tanto de Lewis como de Bronsted-Lowry, con lo que se podría conseguir una buena calidad del aceite regenerado y un rendimiento de hasta 75 %.

A diferencia del proceso Mohawk, el tratamiento con arcilla se propondría como un paso final de acabado y purificado, después de que el aceite lubricante sea destilado a vacío.

Como se menciono anteriormente el proceso Mohawk emplea un gran gasto energético. De esta manera el método con arcilla se lleva a cabo por medio del uso de reactores de contacto, disminuyendo el consumo energético; así, el aceite una vez destilado es mezclado con arcilla en el reactor y es mantenido en suspensión y finalmente es filtrado para remover la arcilla. La arcilla, para un tratamiento efectivo, debe ser previamente sujeta a un cambio brusco de temperatura (100 °C), lo que permite el reacomodo de la estructura cristalina de la cual se partió, por lo tanto el sólido queda en un estado metaestable de menor energía de activación, lo cual lo vuelve más reactivo.

Además, la arcilla puede ser regenerada múltiples veces antes de ser considerada como desecho, cabe mencionar que el desecho no es tóxico debido a que la evaluación final de la arcilla después de ser sometida al proceso de combustión controlada vuelve a recuperar sus propiedades aunque no de manera apropiada para el tratamiento. La arcilla mejora el color y olor del aceite, además de remover azufre. De esta manera, el producto terminado se clasificaría de acuerdo a la API en el Grupo I, puesto que no remueve compuestos insaturados por lo que no cumple con las especificaciones del Grupo II.³¹

De acuerdo a lo anterior para poder adaptarse a la situación actual que demanda el mercado, se tiene que agregar un tratamiento con disolventes de hidrocarburo corriente arriba del tratamiento con arcilla, de esta manera se tendría la eliminación de azufre, compuestos nitrogenados, así como la eliminación de compuestos aromáticos y el incremento de los compuestos saturados en el aceite lubricante, clasificándose en la API del Grupo II.⁶⁴

11.- Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación: El desarrollo de procesos químicos para la química verde está basado en la premisa “*tú no puedes controlar lo que tú no puedes medir*”, por lo que las técnicas son desarrolladas en tiempo real durante todo el proceso y de esta forma poder efectuar los cambios en el mismo; al respecto, el avance del proceso debe evaluarse mediante lo que indican los métodos ASTM correspondientes (Cromatografía de gases y líquidos, microcoulometría oxidativa, tecnología de microondas, etc.), de tal manera de determinar un buen control y seguimiento del proceso, previo a la formación de sustancias peligrosas.

De esta manera, para alcanzar un desarrollo sostenible y, evaluando en que principios de la química verde se tiene incidencia, se puede diseñar una nueva tecnología para la manufactura y aplicación de los productos químicos de manera tal de prevenir y reducir los productos contaminantes generados durante el proceso de reutilización de aceites lubricantes usados, para de esta forma generar, inherentemente, un menor riesgo para la salud humana y el ambiente. Las contribuciones propuestas a la tecnología Mohawk se muestran en la Figura 6.4.

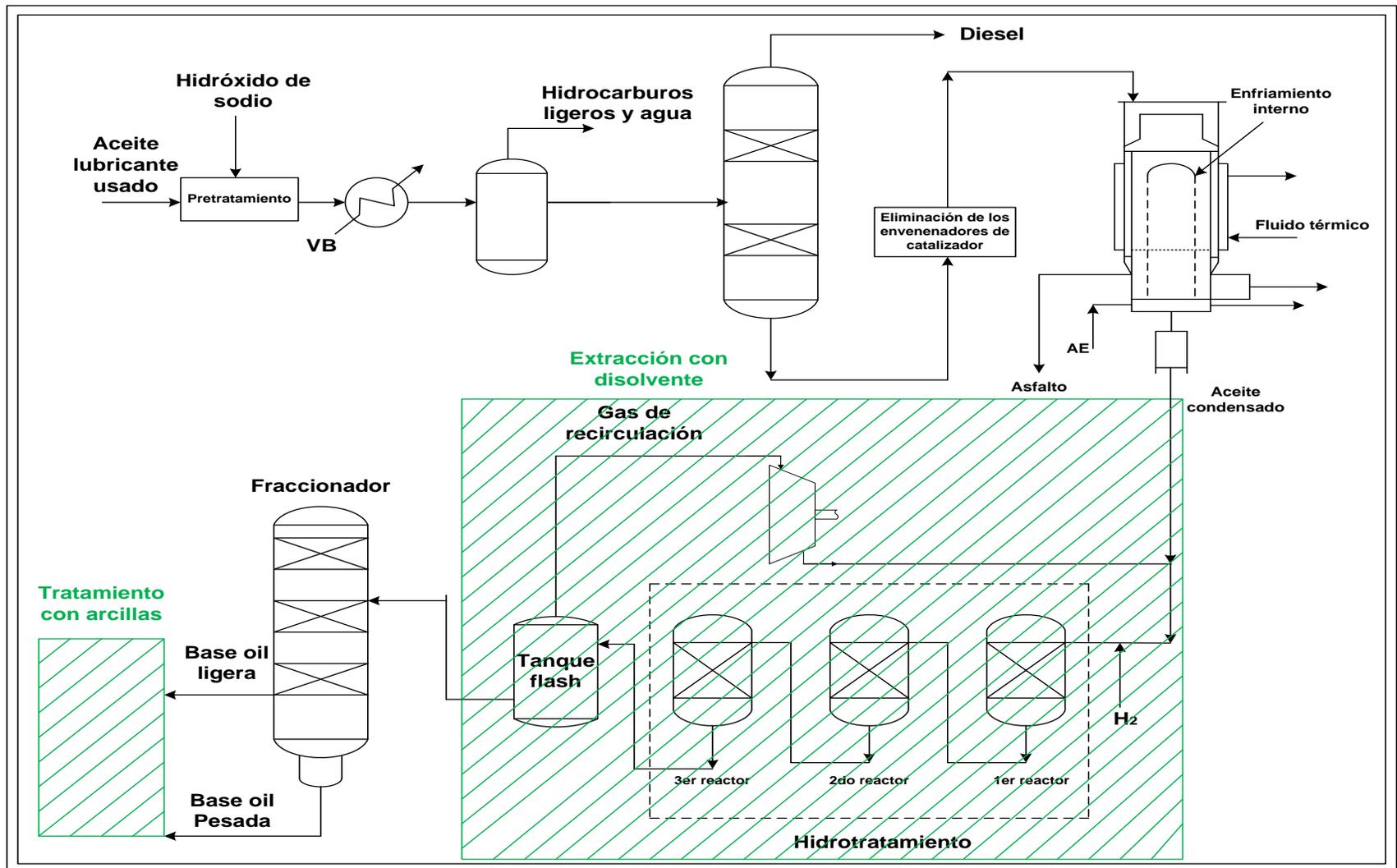


Figura 6.4. Diagrama de proceso señalizando modificaciones a la tecnología Mohawk.

6.4 Ingeniería verde

En la última década, la química verde ha demostrado convincentemente como las metodologías científicas han sido ideadas y aplicadas para proteger al ambiente y a la salud humana de una manera económicamente benéfica. Además, avances significativos se han puesto en marcha en áreas clave de investigación: biosíntesis, ingeniería bioquímica, biocatálisis, fotocátalisis, catálisis heterogénea, diseño de químicos seguros y disolventes ambientalmente benignos, sonoquímica, polimerización vía microondas y desarrollo de materias primas renovables.⁶⁶ Sin embargo, la búsqueda para reducir los impactos al medio ocasionados por plantas industriales, diseños erróneos, procesos y productos económicamente no viables, entre otros, ha tenido como consecuencia el surgimiento de una gran área de investigación como lo es la ingeniería verde.

La química verde y la ingeniería verde provocan cambios en la peligrosidad de un producto a nivel molecular. Los tipos de peligros que son de interés por su impacto ambiental, así como a la salud humana, pueden ser vistos simplemente como las propiedades físicas o químicas de las sustancias siendo usadas. Por lo que la estructura molecular de una sustancia química es un factor determinante en sus propiedades. Así, el profesionista en el área de la química e ingeniería verde se centra en modificar estas propiedades intrínsecas, para reducir o eliminar el peligro. Es por esta razón que la química verde e ingeniería verde, son capaces de lograr sus objetivos a lo largo del ciclo de vida de un producto o proceso; las propiedades de una sustancia inherentemente no cambian al recorrer las etapas en un ciclo de vida. Por lo que existen dos conceptos fundamentales que los diseñadores deben de integrar: *ciclo de vida e inherencia*.

Por lo tanto, innovaciones en el ciclo de vida, es reconocer que mediante el diseño de las propiedades fundamentales de las sustancias usadas en etapas particulares del ciclo de vida, la química e ingeniería verde tienen la capacidad de impactar en todo el ciclo de un producto o proceso, haciéndolo más sostenible y ambientalmente seguro. Así, inherencia es “evitar fallas”, es decir, controlando las condiciones de un sistema basándonos en un sistema tecnológicamente controlado, existe la posibilidad de una falla, que puede

significar un riesgo a un sistema natural o a la salud humana. Sin embargo, con un diseño inherentemente más benigno a pesar de los cambios en las condiciones o circunstancias, la naturaleza intrínseca del sistema no fallará. En los casos donde la naturaleza del sistema es predefinida, resulta, en lo general, realizar cambios para el mejoramiento del sistema. Aunque factores tecnológicos y económicos puedan evitar la adquisición del diseño alternativo que es más benigno.

Así, la ingeniería verde se enfoca en cómo lograr la sostenibilidad a través de la ciencia y la tecnología. Basándose en doce principios los cuales son concomitantes con los de la química verde, proporcionando un marco estructurado para científicos e ingenieros a la hora de diseñar nuevos materiales, productos, procesos y sistemas que son benignos para el ambiente y la salud humana.^{66,7}

Principios de la ingeniería verde

1. **Inherente en lugar de circunstancial:** Los diseñadores se esforzaran para asegurar que todas las entradas y salidas de materia y energía sean tan inherentemente inocuas como sea posible.
2. **Prevención en vez de tratamiento:** Es mejor prevenir un desperdicio que tratarlo o limpiarlo una vez generado.
3. **Diseñar para separar:** Las operaciones de separación y purificación deberían ser diseñadas para minimizar el consumo de energía y el uso de materiales.
4. **Maximizar la eficiencia en el uso de materia, energía, tiempo y espacio:** Los productos, procesos y sistemas deberán diseñarse para maximizar la eficiencia en el uso de materia, energía y espacio.
5. **Producción bajo demanda “output pulled” más que hacia el agotamiento de la alimentación “input pushed”:** Los productos, procesos y sistemas deberán estar orientados hacia la producción bajo demanda más que hacia el agotamiento de la alimentación.
6. **Conservar la complejidad:** La entropía y la complejidad inherentes deben ser consideradas como una inversión al elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar como residuo final.

7. **Durabilidad en vez de inmortalidad:** Diseñar para la durabilidad, no para la inmortalidad.
8. **Satisfacer la necesidad minimizando el exceso:** Diseñar para la capacidad requerida no para capacidades innecesarias.
9. **Minimizar la diversidad de materiales:** La diversidad de material en productos multicomponentes debe reducirse al mínimo para promover el desmontaje y el valor de retención.
10. **Cerrar los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible:** Los diseños de los procesos, productos y sistemas deben incluir integración e interconectividad con los flujos de materia y energía disponibles.
11. **Diseñar para la reutilización “afterlife”:** Los procesos, productos y sistemas deben ser diseñados para la reutilización de componentes tras el final de la vida útil del producto.
12. **Renovables en vez de agotables:** Las entradas de materiales y energía deberán ser renovables en vez de agotables.

La amplitud de aplicación de los principios mencionados es fundamental cuando se diseñan arquitecturas, ya sea, una arquitectura molecular requerida para construir compuestos químicos, para crear un automóvil, para construir una ciudad, etc. Al respecto, los principios de la ingeniería verde deben ser aplicables, efectivos y apropiados, de otra manera, estos no serían considerados principios, si no, una simple lista de técnicas útiles que han sido demostradas bajo condiciones específicas.

Así, los doce principios de la ingeniería verde proveen una estructura para crear y evaluar los elementos relevantes de diseño para maximizar la sostenibilidad. Los ingenieros pueden usar estos principios como guía para asegurarse que el diseño de productos, procesos o sistemas tengan los componentes fundamentales, condiciones y circunstancias necesarias para ser más sostenibles.

6.5 Propuesta de una Industria más sostenible con base en los principios de la Ingeniería verde

La ingeniería verde la cual identifica el impacto medioambiental global de un proceso usando conceptos de ciclo de vida y mejoras en los diseños de los procesos, se guía en la aplicación en mayor o menor grado de los doce principios de la ingeniería verde. Un diseño basado sobre los doce principios va más allá de la seguridad y calidad de las especificaciones de ingeniería base para considerar factores ambientales, económicos y sociales. Debe tenerse en cuenta, que el objetivo real no es la aplicación total de los principios (situación ideal), sino la del mayor número de éstos (mayor acercamiento verde), de esta forma se encontró incidencia en los siguientes principios:

2.-Prevención en vez de tratamiento: Este principio se enfoca en la expresión “*la mejor forma de limpiar es no manchar*”, un punto importante frecuentemente pasado por alto y es el concepto de que es desperdicio del humano. Aunque parezca obvio que la generación de desperdicio debe ser impedido o evitado donde sea posible, existen muchos casos donde es por inadvertencia generado, o bien la generación de residuo es inconscientemente diseñado dentro del proceso. La generación de estos residuos además de ser peligrosos o ambientalmente no benignos, demandan tiempo, esfuerzo, dinero y manejo de materiales.

Las tecnologías que sean dirigidas hacia un diseño libre de desperdicio, están basadas en el concepto fundamental de que las entradas sean parte de la salida deseada. Este concepto es conocido a escala molecular como “*economía atómica*” y “*economía de material*” solo si es ampliado a escalas de diseño.⁷ En la tecnología Mohawk, este principio es aplicado aunque las entradas no sean parte de la salida de donde la base del aceite es extraída, ya que existen tres subproductos: gasolina, diesel y asfalto, los cuales pueden ser vendidos como producto, siempre y cuando la gasolina y el diesel no sean usados como combustibles de planta evitando la liberación de los productos de una combustión química. Evitando así, la generación de un desperdicio el cual no pueda ser aprovechado para un uso benéfico.

3.-Diseñar para separar: Si bien, la producción de la base del aceite lubricante a partir de la tecnología Mohawk requiere solamente la mitad de energía que sería requerida en la producción de aceite lubricante a partir de un barril de aceite crudo.³¹ Partiendo de lo

mencionado en el principio número seis de la química verde, en donde la tecnología Mohawk podría ser modificada, cambiando el ciclo de vida del proceso de la sección de hidrotratamiento por una extracción con disolventes de hidrocarburo, en donde se disminuirían drásticamente los requerimientos energéticos debido a que el tratamiento de la base del aceite se realiza a condiciones ambientales, reduciendo también los costos operacionales.⁶⁴ Además, la tecnología utiliza un tanque preflash antes de la torre de destilación, evaporándose los componentes con presiones de vapor elevadas con el fin de reducir el tamaño y por ende los requerimientos energéticos de esta sección. Por otra parte, el TFE minimiza el consumo de materiales, debido a que el aceite evaporado es enfriado dentro del mismo recipiente en vez de ser condensado corriente abajo en un enfriador.

4.-Maximizar la eficiencia en el uso de materia, energía, tiempo y espacio: Evaluando la tecnología Mohawk, este principio resultó ser aplicado debido a que el proceso cuenta con una eficiencia del 83 % en la obtención de la base del aceite lubricante, además, es un proceso continuo, evitando así paros de equipos y contratiempos en la producción del mismo, los cuales conllevan a iniciar una operación y esperar el tiempo necesario en lo que se alcanzan las condiciones de proceso, es decir, primero existe un estado no estacionario hasta llegar al equilibrio del proceso, el estado estacionario, en donde las variables del proceso son las requeridas para la obtención del producto. Sin embargo, aplicando las propuestas del principio número tres al proceso Mohawk, la eficiencia aún es alta teniendo del 75 al 79 %, ⁶⁴ lo cual cambiaría el impacto medioambiental del producto en su ciclo de vida, además de que en el proceso sería disminuida el área total requerida para su instalación.

5.-Producción bajo demanda “output pulled” más que hacia el agotamiento de la alimentación “input pushed”: Este principio es basado sobre el principio de Le Châtelier, el cual explica que cuando una tensión es aplicada a un sistema en equilibrio, el sistema se reajusta para compensar la tensión aplicada, siendo una tensión, cualquier factor impuesto tal como: temperatura, presión, gradiente de concentración y volumen. El cual altera el balance entre el avance y el retroceso de los productos de transformación.⁶⁶

Por ejemplo, incrementado la entrada de nuestra producción en el proceso Mohawk, este causará una tensión, el cual será ajustado con un incremento en la generación del producto. A menudo una reacción o transformación es impulsada hasta su finalización basada sobre este principio, agregando más energía o materiales para alterar el equilibrio y generar la salida deseada. Sin embargo, este mismo efecto puede ser logrado diseñando transformaciones en donde las salidas son minimizadas o removidas del sistema y la transformación sea a su vez retirada, sin la necesidad de un exceso de energía y materiales.

De esta manera, la remoción de los productos como diesel, gasolina y asfalto, nos ayuda a minimizar el consumo energético que sería necesario para la obtención del producto. Además, el proceso de fabricación de la base del aceite lubricante sería basado solamente en la producción “*just in time*”; así, solamente se requerirá que el equipo, recursos y otras labores estén disponibles en las cantidades y tiempo requerido para hacer el trabajo, eliminando sobreproducciones, inventarios, tratamientos más largos, etc. Por lo tanto, aproximándonos al diseño a través del principio de Le Châtelier, se minimizan la cantidad de recursos consumidos para la transformación de entradas hacia el producto de salida.

6.-Conservar la complejidad: Este principio, si bien es enfocado a nuestra base del aceite lubricante, debido a la alta complejidad que es necesaria para la obtención del mismo y que se encuentra asociada como función de los gastos de materiales, energía y tiempo. Cabe mencionar en este punto, que estos gastos serían incrementados, si se partiera de un barril de petróleo crudo, debido a la alta complejidad de los tratamientos en las operaciones unitarias para la obtención del aceite base, por lo que el aceite lubricante es una sustancia considerada de alta entropía, puede ser contraproducente y sacrificar su valor, si no se reúsan estos materiales; por otra parte, las sustancias de baja o mínima complejidad se deben de reciclar cuando sea posible.^{7,68}

8.-Satisfacer la necesidad minimizando el exceso: Es importante anticipar la agilidad necesaria del proceso Mohawk y la flexibilidad del producto en la etapa del diseño. Aquí, es apropiado tener en cuenta que, los costos involucrados en el uso materia y energía por sobrediseños conlleva a capacidades inutilizables y puede ser muy alto.

Debido a que en el desarrollo de una ingeniería convencional, existen criterios de diseño los cuales siguen la tendencia en diseñar procesos para diferentes escenarios como el llamado “*worst-case*”, optimizando así rendimientos para condiciones extremas o irrealistas, lo cual requiere incorporar y subsecuentemente eliminar o tratar componentes de los cuales su función no será realizada bajo la mayoría de las condiciones de operación.^{68,7} Por lo que se propone que en la tecnología Mohawk, estos criterios no sean aplicados y se limite a la ingeniería verde, la cual no contempla factores de ignorancia o de casos no convencionales, donde solamente intervienen factores necesarios para el dimensionamiento, por ejemplo en el de una bomba, se contemplaría:

- Bombas: El caudal de operación solo debe incrementarse tomando en cuenta factores de incertidumbre como lo son: error en las correlaciones de cálculo de pérdida de carga, diferencias entre diámetro nominal y diámetro interior real de las tuberías, suciedad, discrepancia entre válvulas y accesorios reales, seleccionar el impulsor inmediato superior, no el mayor de todos.

10.-Cerrar los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible: Este principio sería aplicado a la tecnología Mohawk debido a que debe ser diseñado para aprovechar los flujos de energía y materiales existentes dentro de las operaciones unitarias. Por lo que, tomando ventajas de los flujos existentes de energía y materia, la necesidad para generar energía y procesar el flujo de materiales es minimizada, lo cual nos trae grandes ventajas respecto a los ahorros energéticos, beneficiando así el ciclo de vida del proceso.

También, se estaría reduciendo el tamaño de la adquisición de sistemas de trigeneración de energía, los cuales pueden ser aplicados para generar electricidad, agua fría y vapor simultáneamente para incrementar la eficiencia. No obstante, otros análisis como el análisis “*pinch*”, debe ser desarrollado, ya que este análisis permite optimizar el uso de corrientes calientes o con alto contenido energético que hay que enfriar, mediante el calentamiento de corrientes frías que es necesario calentar, minimizando así las inversiones de capital.

11.-Diseñar para la reutilización “afterlife”: El que una unidad de producto de aceite lubricante haya alcanzado el final de su vida útil, no significa que todos sus componentes lo hayan hecho. Estos deben poder ser recuperados para seguir realizando una función por sí mismos o en otro producto.⁶⁸ Es así, que dentro del contexto verde, este principio se puede asociar con el principio número cuatro de la química verde, debido a que “*la base del aceite lubricante no se degrada*”, es decir, posee las mismas propiedades al final de su uso en el motor de combustión interna,³ por lo cual es factible el reúso del mismo, puesto que los aditivos son los únicos compuestos que presentan degradación, además en el proceso Mohawk se eliminan compuestos tóxicos como: azufre, compuestos clorados, metales pesados, óxidos metálicos, ácidos provenientes de los gases de combustión de azufre, etc.^{15,22}

12.- Renovables en vez de agotables: Este principio ligado con el principio once de la ingeniería verde y con el número siete de la química verde en el uso de la materia prima ha sido abordado. Sin embargo, se desconoce el origen de la fuente de energía de la tecnología Mohawk, aunque sabemos que es la tecnología que consume más kWh/t (Tabla 6.3), entonces, para que la tecnología pueda llegar a ser más sostenible deberá de contar con una fuente de energía renovable que provea de energía sostenible, permaneciendo inalterable a través del tiempo, puesto que sin duda lo que vuelve no renovable el consumo de un recurso, no es solo su naturaleza, sino también el ritmo de ese consumo en relación con la velocidad de regeneración por la naturaleza. Proponiendo así, el uso de una fuente de energía geotérmica o energía eólica, ya que estas son las más eficientes actualmente. Además, la tecnología Mohawk no hace mención del medio de calentamiento del aceite lubricante corriente arriba de la entrada a las torres, generalmente en las refinerías se utilizan hornos, en donde el medio que suministra la energía de calentamiento son combustibles fósiles. Por lo que los combustibles renovables están obligados a remplazar gradualmente los combustibles fósiles. Así, el desarrollo de biorefinerías marcará una evolución histórica en una sociedad sostenible en el cual alimentaciones biológicas constituirán los principales pilares de la economía.⁶⁹ Entonces, el uso de un recurso renovable como combustible sería propuesto tomando en base el combustible con mayor poder calorífico, resultando ser el biodiesel,^{69,70} Tabla 6.5 y 6.6.

Tabla 6.5. Contenido energético del combustible biodiesel.

Tipo de biodiesel	Poder calorífico (MJ/kg)
Soya metilo	39.8
Soya etilo	40.0
Soya butilo	40.7
Girasol metilo	39.8
Canola metilo	40.1
Canola etilo	41.4

Tabla 6.6. Comparación de las especificaciones de los combustibles fósiles y renovables.

Propiedad	Diesel	Biodiesel
Prueba	ASTM D975	ASTM D6751
Composición	HC ^a (C10-C21)	FAME ^b (C12-C22)
Viscosidad cinemática @ 313K	1.9-4.1	1.9-6.0
Gravedad específica, g/mL	0.85	0.88
Punto Flash, K	333-353	373-443
Punto de escurrimiento, K	238-258	258-289
Agua, % vol	0.05	0.05
Carbón, % peso	87	77
Hidrógeno, % peso	13	12
Oxígeno, % peso	0	11
Azufre, % peso	0.05	0.05
Número de cetano	40-55	48-60

^aHidrocarburos

^bEsteres metílicos de ácidos grasos

Así, evaluando en que principios de la ingeniería verde se tiene incidencia, se puede diseñar una nueva tecnología la cual no se limita a los criterios de una ingeniería base, para de esta manera alcanzar un desarrollo sostenible, para la manufactura y aplicación de los productos químicos, previniendo y reduciendo los productos contaminantes generados durante el proceso de reutilización de aceites lubricantes usados, para de esta forma generar, inherentemente, un menor riesgo para la salud humana, el ambiente y además considerar factores económicos. Las contribuciones propuestas a la tecnología Mohawk se muestran en la Figura 6.5, la cual además engloba aquellas propuestas definidas por la química verde y el arreglo típico de un sistema de vacío.

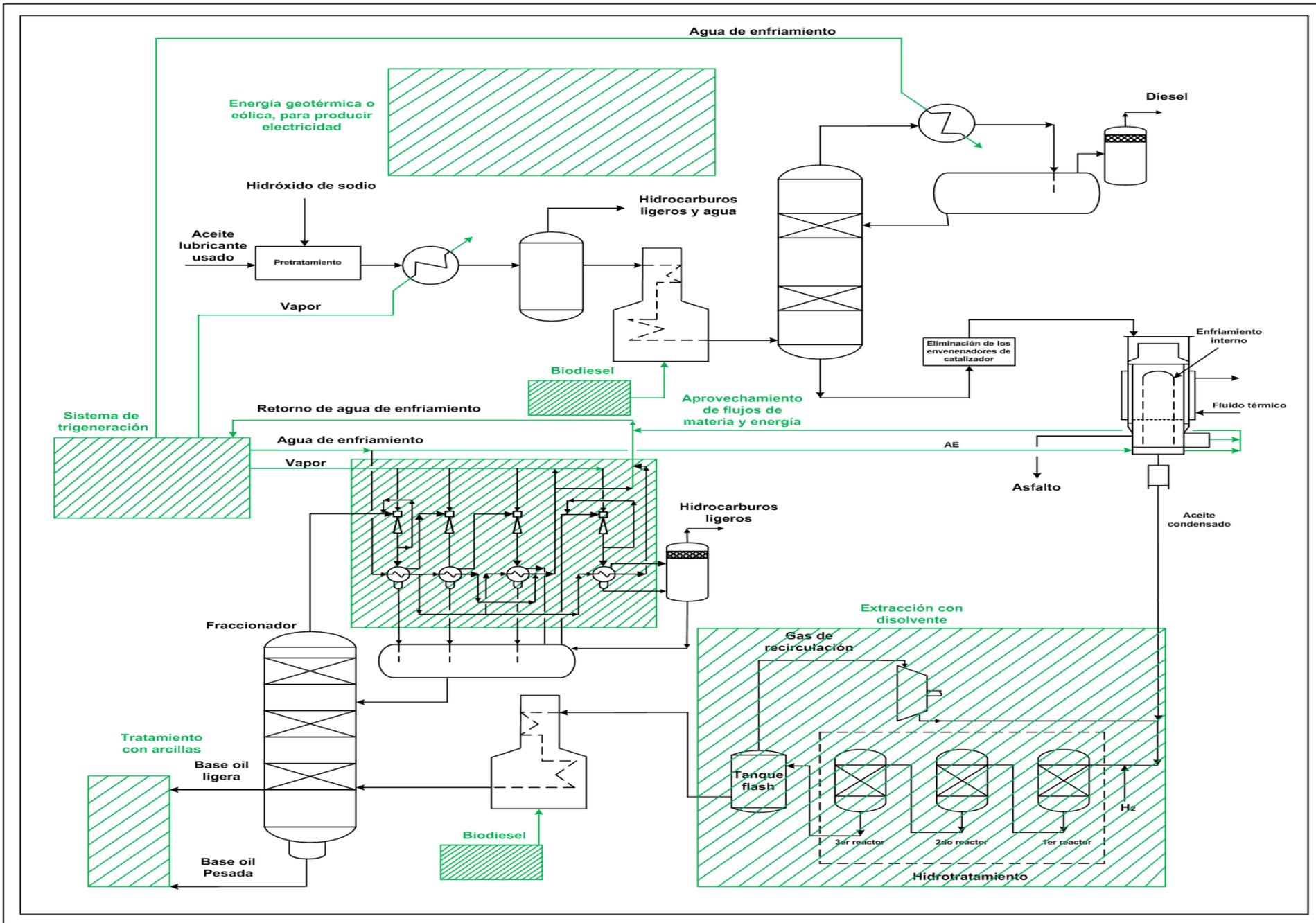


Figura 6.5. Diagrama de proceso señalando modificaciones a la tecnología Mohawk.

Conclusiones

En el presente trabajo se logró la selección de una tecnología de proceso para la reutilización de los aceites lubricantes usados a través de una comparación cualitativa, en donde la tecnología Mohawk resultó ser la más adecuada para la reutilización del aceite usado, la cual, se comprobó que es necesario el uso de esta tecnología para reusar el aceite lubricante, debido al estudio de mercado realizado, en donde el volumen sin regenerar resultó ser muy alto. Además, se enunciaron las grandes ventajas que conlleva el re-refinamiento del aceite base, para minimizar principalmente la contaminación ambiental y la importación del mismo. De esta manera, se enunciaron las bases de ingeniería que son típicas de una ingeniería básica convencional, en las cuales se exponen los requerimientos, criterios e información para el desarrollo de la ingeniería de básica y de detalle para el diseño de las instalaciones.

Por otra parte se logró proponer modificaciones a la tecnología seleccionada, a partir de los principios de la Química e Ingeniería verde, en los cuales es adecuado resaltar la incidencia de los mismos:

Química verde:

Principio 1. Prevención

Principio 5. Uso de disolventes seguros o auxiliares

Principio 6. Diseño de la eficiencia energética

Principio 7. Uso de materia prima renovable

Principio 9. Catálisis

Principio 11. Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación

Ingeniería verde:

Principio 2. Prevención en vez de tratamiento

Principio 3. Diseñar para separar

Principio 4. Maximizar la eficiencia en el uso de materia, energía, tiempo y espacio

Principio 5. Producción bajo demanda "output pulled" más que hacia el agotamiento de la alimentación "input-pushed"

Principio 6. Conservar la complejidad

Principio 8. Satisfacer la necesidad minimizando el exceso

Principio 10. Cerrar los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible

Principio 11. Diseñar para la reutilización "afterlife"

Principio 12. Renovables en vez de agotables

De esta manera, la aplicación de estos principios para el diseño de la tecnología nos permitiría tener un proceso verde, en el cual se lograría un desarrollo más sostenible en la producción de la base del aceite lubricante. Así, tecnologías podrían ser modificadas a partir de evaluaciones verdes, como se aprecia en la Figura 6.5, la tecnología Mohawk, si bien, resultó ser la mejor, esta podría aún mejorarse adaptando las propuestas definidas para tener un desarrollo sostenible. Por lo que tanto como el químico y el ingeniero verde actualmente deben de aplicar estos principios para el desarrollo de nuevos materiales, productos, procesos y sistemas para que puedan ser diseños más benignos para el medio ambiente y la salud humana.

Apéndice A. Propiedades de los hidrocarburos

Tabla A.1 Propiedades de los hidrocarburos parafínicos, nafténicos, y aromáticos.

Propiedad	ASTM	Parafínico	Nafténico	Aromático
Viscosidad a 313K/ $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$	D445	40	42	36
Viscosidad a 313K/ $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$	D445	6.2	5.0	4.0
Índice de viscosidad (Adimensional)	D2270	100	-15	-185
Densidad a 293K/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	D4052	0.8628	0.9100	0.9826
Temperatura de inflamación/K	D92	502	453	433
Temperatura de escurrimiento/K	D97	258	237	249
Color	D1500	L 0.5	2.5	D 8.0
Peso molecular/ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	D2503	440	320	246
% Carbonos aromáticos	D3238	2	14	41
% Carbonos nafténicos	D3238	32	41	36
% Carbonos parafínicos	D3238	66	45	23

Fuente: Brock, D.V. 1998, *Lubricant base oils*, Lubricating Engineering, 184-185pp.

Tabla A.2 Características de los aceites básicos.

Característica	Nafténico en general	Nafténico refinado	Parafínico en general	Parafínico refinado
Densidad	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Índice de viscosidad	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Residuo de carbón	Débil	Débil	Duro	Débil
Contenido de aromáticos	Alto	Bajo	Moderado	Muy bajo
Estabilidad térmica	Baja	Ligeramente alta	Ligeramente alta	Muy alta
Estabilidad de la degradación	Baja	Ligeramente alta	Ligeramente alta	Muy alta

Fuente: HVI and MVI locomotive diesel engine oils-open forum, Lubricating engineering, 577-591pp.

Tabla A.3 Propiedades de los hidrocarburos.

Tipo de hidrocarburo	Densidad específica a 15°C/ 10 ³ kg/m ³	Temperatura de inflamación/K
Aromático	1.000	494
Nafténico	0.934	505
Parafínico	0.876	575

Fuente: Pérez, D., *Lubricantes su selección y empleo*, CEAC, Barcelona, España.

Apéndice B. Normas de referencia, datos de recolección de aceites lubricantes usados e identificación de residuos peligrosos

Tabla B1. Referencias para la NOM-058-SEMARNAT-1993.

Norma Oficial Mexicana	Objeto
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establecer las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-053-SEMARNAT-1993	Establecer el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen un residuo peligroso, por su toxicidad al ambiente.
NOM-054-SEMARNAT-1993	Establecer el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos.
NOM-055-SEMARNAT-2003	Establecer los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto de los radiactivos.
NOM-056-SEMARNAT-1993	Establecer los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado e residuos peligrosos.
NOM-057-SEMARNAT-1993	Establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.

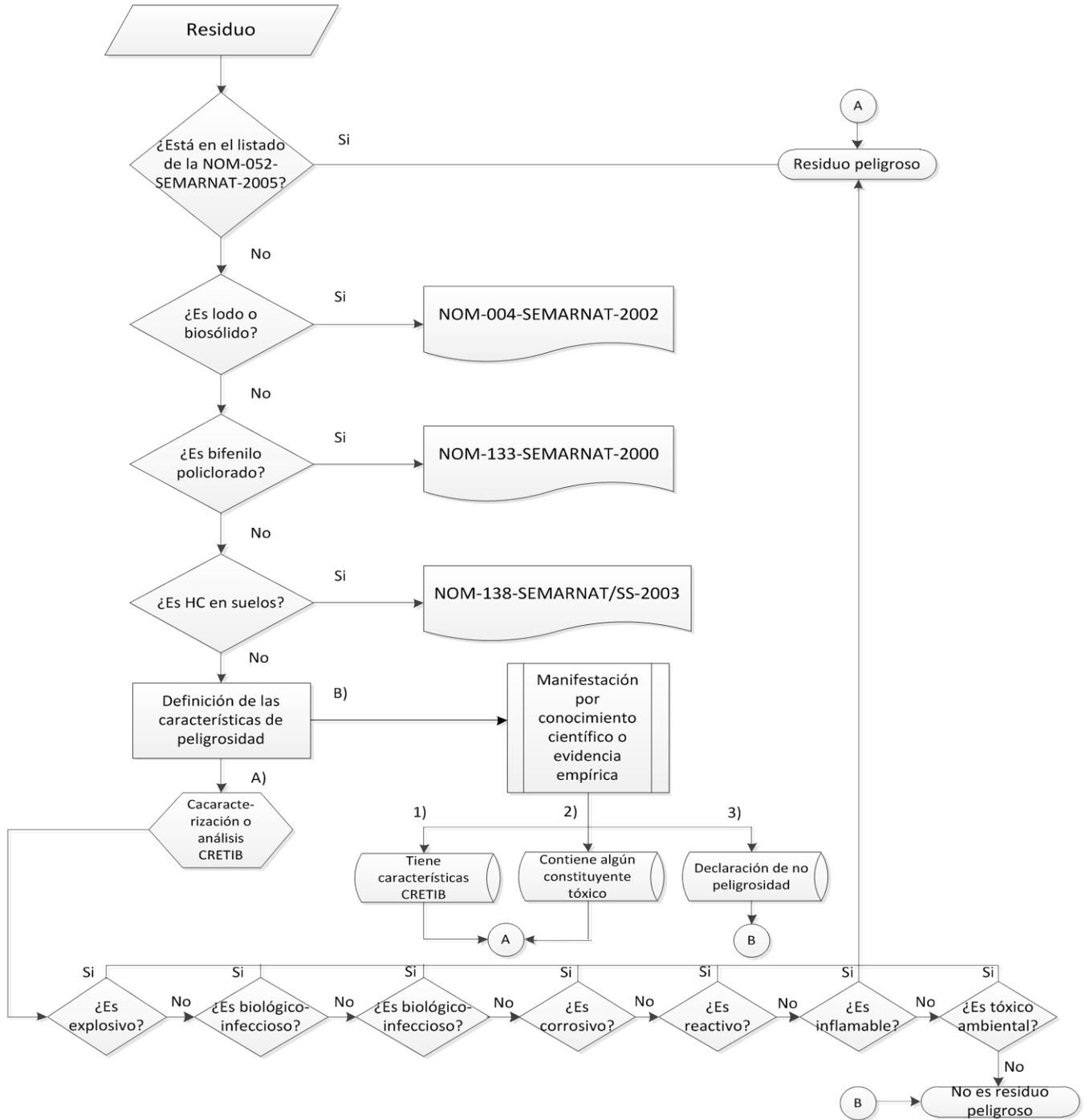
Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Tabla B2. Índice de recolección de aceite usado.

País	Recolección de aceite lubricante usado (%)
Austria	76
Bélgica	59
Dinamarca	89
Finlandia	94
Alemania	84
Francia	82
Grecia	67
Irlanda	90
Italia	58
Luxemburgo	99
Holanda	92
Portugal	91
España	87
Suecia	89
Reino Unido	81

Fuente: EURITS, Special waste in good hands, 2013.

Figura B1. Diagrama de flujo para identificar la peligrosidad de un residuo.



Fuente: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Apéndice C. Importaciones y exportaciones

Tabla C1. Importaciones de aceites lubricantes a base de aceites minerales derivados del petróleo.

País	Miles de litros
Alemania	1,935,486
Argentina	370,474
Australia	1,270
Austria	5,530
Belice	132
Brasil	9,153
Bélgica	80,347
Canadá	4,183,831
China	54,634
Colombia	232,554
Corea del sur	164,168
España	312,304
Estados Unidos	289,625,805
Francia	941,189
Guatemala	16,016
Japón	3,624,919
Reino Unido	368,298
Suiza	17,890
Total	301,944

Fuente: INEGI, Anuario estadístico del comercio exterior, Importaciones de aceite lubricante.

Tabla C2. Exportaciones de aceites lubricantes a base de aceites minerales derivados del petróleo.

Alemania	59,715
Antigua y Barbuda	28,746
Argentina	10,000
Belice	736,104
Bolivia	815,781
Brasil	303,319
Chile	546,144
Colombia	1,881,742
Costa rica	3,308,749
Cuba	1,103,048
El salvador	1,027,084
Estados Unidos	3,215,537
Guatemala	754,905
Haití	10,008
Honduras	955,841
Jamaica	544,262
Nicaragua	1,071,596
Panamá	986,122
Paraguay	862,265
Perú	542,566
Puerto Rico	85,923
Uruguay	72,543
Total	18,922,000

Fuente: INEGI, Anuario estadístico del comercio exterior, exportaciones de aceite lubricante.

Abreviaturas

ACC	American Chemistry Council
ACS	American Chemical Society
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society of Testing Materials
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BERC	Bartlesville Energy Research Center
BIE	Banco de Información Económica
CEP	Chemical Engineering Partners
DEQ	Department of Environmental Quality
EOLCS	Engine Oil Licensing and Certification System
EPA	Environmental Protection Agency
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPC	Ingeniería Procura y Construcción
KTI	Kinetics Technology Institute
L.B.	Límite de Batería
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos
NIPER	National Institute of Petroleum and Energy Research
NIST	National Institute of Standards and Technology
NOM	Norma Oficial Mexicana
NORA	National Oil Recyclers Association
PAH's	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PCB's	Polychlorinated Biphenyls
PDB	Process Design Basis
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PSOP	Product Stewardship for Oil Program
RTI	Resource Technology Incorporation
SAE	Society Automotive Engineers
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAP	Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
TAN	Total Acid Number
TBD	To be Determined During EPC project Development
TFE	Thin Film Evaporator

Referencias

- [1] Mitsch, W. J., Jorgensen, S.E. *Ecological Engineering and Ecosystem Restoration*, Wiley, New York, **2004**.
- [2] ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *Toxicological Profile for used Mineral-based Crankcase Oil*. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA, **1997**.
- [3] American Petroleum Institute (API), Used Motor-Oil, Collection and Recycling. <www.recycleoil.org>, (Enero de 2014).
- [4] Lin, Q., Mendelsohn, I. A. *The combined effects of phytoremediation and biostimulation in enhancing habitat restoration and oil degradation of petroleum contaminated wetlands*. *Ecol. Eng.* **2010**, 10, 263–274.
- [5] Anastas, P. T., Warner, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, New York, **1998**.
- [6] Lancaster, M. *Green Chemistry: an Introductory Text*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, **2002**.
- [7] Anastas, P. T., Zimmerman, J. B. Design Through the 12 Principles of Green Engineering, *Environ. Sci. Technol.* **2003**, 5, 95-101.
- [8] Double, M., Kruthiventi, A. K. *Green Chemistry and Engineering*, Academic Press, London, **2007**.
- [9] Prince R. J. *Base oil from petroleum, chemistry and technology of lubricants*, 2nd edition, USA, **1997**, pp. 1-132.
- [10] Pérez, D. *Lubricantes su selección y empleo*, CEAC, Barcelona, España, **1999**.
- [11] SAE, Society Automotive Engineering, *Engine oil performance and engine service classifications*. Information report. Washington.
- [12] Haycock, R. E., Hillier, J. E. *Automotive Lubricants Reference Book*, 2nd edition, John Wiley and Sons, USA.
- [13] Benlloch, J. *Lubricantes y lubricación aplicada*, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad la Habana, Cuba.
- [14] Fygueroa, S. S., *Técnicas de análisis de aceites empleadas en el mantenimiento de motores*, Consejo de Publicaciones, Universidad de los Andes, Venezuela, **1997**.

- [15] Magiera, J., Markiewicz, M., Komorowicz, T., Gluszek, A. Used oils a hazardous waste. *Chem. Inz. Ecol.* 10, 51–66.
- [16] Mohamed, F, Taher, A. S., Amal, E. *Fundamentals of Petroleum Refining*, Elsevier, 2009, 1-30 pp.
- [17] Crawford, C. D., Bharvani, P. R., Chapel, D. G. Integrating Petrochemicals into the Refinery, *Hydrocarbon Process.* 2002, 7, 35-38.
- [18] Gary, J. H., Handwerk, G. E. *Petroleum refining Technology and Economics*, 4th ed. Marcel Dekker, New York.
- [19] Rincón, J., Cañizares, P., García, M. T. Regeneration of used oil by polar solvent extraction, *Ind. Eng. Chem.*, 2005.
- [20] Cutler, E. T. *Conserve Lube Oil: Re-refine*, *Hydrocarbon Process.* 2009, 265.
- [21] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Normas mexicanas ordenadas por materia, <www.semarnat.gob.mx> (Febrero 2014).
- [22] GCA Corporation, *The Fate of Hazardous and Nonhazardous Waste in Used Oil Disposal and Recycling*, Report No. DOE/BC/10375-6, for U.S. Department of Energy Washington D.C. October 1996.
- [23] Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación, firmado el 22 de marzo de 1989 y en vigor en México desde el 5 de Mayo de 1992.
- [24] Boughton, B., Horvath, A. Environmental Assessment of used oil management methods, *Environ. Sci. Technol.* 2004, 8, 353-358.
- [25] Agencia para Sustancias Toxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), <www.atsdr.cdc.gov/es> (Febrero 2014).
- [26] EPA, *How to set up a local program to recycle used oil*, publication 530-SW-89-039A, 1989.
- [27] Zenon P., Wieslaw U., Tadeusz K., Michal S. R. Energy conservation through recycling of lube oil. *Ecol. Engineer.* 2010, 36, 1761-1764.
- [28] Hein, K. R. G. *Future energy supply in Europe—challenge and chances*, 2005.
- [29] Kajdas, C. *Major pathways for used oils disposal and recycling*, part 1, 2000, pp. 61–74.

- [30] State of Utah, Department of Environmental Quality, Division of Solid Hazardous Waste, *Used Oil Management Rules*, **1997**.
- [31] Chemical Engineering Partners, <www.ceptechnology.com/links> (Agosto 2014).
- [32] Clean Harbors, <www.cleanharbors.com> (Febrero 2014).
- [33] Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, <www.normateca.gob.mx/Archivos/66_D_3580_11-11-2013.pdf> (Febrero 2014).
- [34] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México), www.inegi.org.mx/sistemas/bie/ (Febrero 2014).
- [35] PEMEX refinación, Proyecto de conversión de residuales en Salamanca <www.pemex.com/Paginas/default.aspx#.U8KyC0BArFw> (Febrero 2014).
- [36] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México), *Anuario estadístico del comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos: importación en pesos*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México: INEGI, c2010.
- [37] Márquez, A. D. *Reporte Económico*, México <www.vectoreconomico.com> (Marzo 2014)
- [38] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México), *Anuario estadístico del comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos: exportación en pesos*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México: INEGI, c2010.
- [39] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México), XV Censo industrial Industrias Manufactureras, ed. 1999 y 2004.
- [40] Emerson, H.R. *The advantage of used oil re-refining*, for Bartlesville energy Technology Center, Bartlesville, Oklahoma, May **1999**.
- [41] GCA Corporation, *Waste Automotive Lubricating Oil as a Fuel*, Repot No. P241357, for U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. September **1994**.
- [42] Berk, D. S. Recycling System Give Waste Oil New Life, *Plan Engineer*. **1981**, 35, 103-106.
- [43] Mueller Associates, *Waste Oil, Reclaiming Technology*, Utilization and Disposal, U.S., **1989**, pp. 193.
- [44] Brinkman, Dennis, W., Waste Hydrocarbon recycling, *Chemical Engineering Progress* **1986**, 82, 67-70.

- [45] McBain, J. A. *Recent Factors Affecting the Oil Recycling Industry*, Proceedings, Conference on Measurements and Standards for Recycled Oil- IV, NBS Publication No. 674, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland, September 14-16, **1982**.
- [46] François, A. *Waste Engine Oils, Rerefining and Energy Recovery*, 1 ed, Elsevier, Netherlands, **2006**, pp. 319.
- [47] Denis, J., Briant, J, Hipeaux, J.C. *Physico-chimie des lubrifiants*. Analyses et essais. Éditions Technip, Paris, **1997**.
- [48] Chicoine, L.C., *Reuse of Waste Oil at Army Installations*, Technical Report No. N-135, U.S. Army Corps of Engineers, Champaign, Illinois, September **1982**.
- [49] Gautier, T. *Techniques for Physical Separation of Phases*, Petroleum Refining. Materials and Equipment, Editions Technip, Paris, **2000**.
- [50] Robert J. Bigda & Associates, *The BEREC Re-refining process: Comparison of Hydrofinishing Versus Clay Contacting*, report No. BEREC/R1-98/11, for Bartlesville Energy Research Center, Bartlesville, Oklahoma, July **1998**.
- [51] Weinstein, K. D., et al., *Enhanced Utilization of Used Lubricating Oil Recycling Process By-Products*, Report No. DOE/BC/10059-19, for U.S. Department of Energy, Washington, D.C., March **1998**.
- [52] Booth, J., George T. *Used Lubricating Oil Re-Refining Demonstration Plant Data Acquisition- Topical Report I: Environmental Considerations*, Report No. DOE/BC/10562-5, for U.S. Department of Energy, Washington, D.C., January **2002**.
- [53] ADEME, *Recyclage et valorization énergétique des huiles usages. Atouts et faiblesses*. Agence de l'Énvironnement et de la Maîtrise de l'Énergie. Etude ECOBILAN, **2000**. (Waste oil recycling and energy recovery-advantages and drawbacks).
- [54] Dumitru, P. *Design Aspects of Used Lubricating Oil Re-refining*, 1 ed, Elsevier, Netherlands, **2006**, pp. 113.
- [55] ICA Fluor, *Procedimiento de Elaboración Bases de Diseño*, No. BP1-00-06, **2012**, 1-10pp.
- [56] Magnabosco, L. M. *Progress in Mohawk/CEP Technology: Reduction in Catalyst Deactivation*, Seventh International Conference on Used Oil, Recovery and Reuse. Association of Petroleum Re-refiners, Chicago, Illinois, September 27 October 1, **2013**.

- [57] Anastas, P. T., Farris, C. A. Editores *Benign by Design. Alternative synthetic design for pollution prevention*. ACS symposium series 577, **1994**.
- [58] Culler, N. *Apuntes para un cuidado responsable del medio ambiente*. Cámara de la Industria Química y Petroquímica, **2000**.
- [59] De Vito, S. C.; Garret, R. L. Editores *Designing safer chemicals. Green Chemistry for pollution prevention*. ACS symposium series 640, **1996**.
- [60] Gunningham, N.; Sinclair, D. *A Final Report: Barriers And Motivators To The Adoption Of Cleaner Production Practices*. Environment Australia. Australian for Environmental Law. The Australian National University. Canberra, July, **1997**.
- [61] Environmental Protection Agency (EPA), www.epa.gov (Agosto 2014).
- [62] Paul, T. A., Kirchhoff, M. M., Williamson, T. C. Catalysis as a foundational pillar of green chemistry, *App. Catal.*, **2001**, 221, 3-13.
- [63] Rincón, J., Cañizares, P. *Regeneration of used lubricant oil by ethane extraction*, *Supercritical Fluids*, **2007**, 39, 315-322.
- [64] Hamad, A., Al-Zubaidy, E., Muhammad E. F. *Used lubricating oil recycling using hydrocarbon solvents*, *Environmental Management*, **2005**, 74, 153-159
- [65] Fogler, H.S. *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*, 3rd ed., Pearson Education, Naucalpan de Juárez, México, **2001**.
- [66] Sharma, S.K., Mudhoo, A. *Green Chemistry for Environmental Sustainability*, CRC Press, USA, **2010**.
- [67] Gómez, J.I. *Ingeniería verde para la sostenibilidad*, *Medio Ambiente*, **2008**, pp. 168-174.
- [68] Anastas, P.T., Zimmerman, J.B. *Innovations in Green Chemistry and Green Engineering*, Springer, New York, **2013**, pp. 333.
- [69] Bart, J.C., Palmeri, N., Cavallaro, S. *Biodiesel science and technology*, UK, Woodhead Publishing Limited, **2010**, pp. 798.
- [70] Speight, J. G. *The Biofuels Handbook*, UK, Royal Society of Chemistry, **2011**, pp. 514.