



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y AMBIENTALES

“Re-refinación de Aceites Lubricantes Usados mediante procesos físico-químicos”

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Previa la obtención del Título de

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

KEVIN DAVID MORAN ROBLES

GUAYAQUIL-ECUADOR

2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mi Madre.

A mi familia.

A mi director de tesis.

DEDICATORIA

A mi madre, por sus
sacrificios en todos mis años,
por brindarme el apoyo
incondicional, por ser mi
fortaleza y por haberme
formado como un hombre de
bien, por siempre creer en mí,
por darme la vida.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Oswaldo Valle
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Raúl Serrano
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Jenny Venegas
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Kevin David Moran Robles

RESUMEN

Uno de los principales problemas de la actualidad son los desechos producidos por productos a base de petróleo y en especial los aceites lubricantes, usados en la industria en general para prevenir el desgaste de las máquinas.

Ésta investigación “Re-refinación de aceites lubricantes usados mediante procesos físico-químicos” es una tesis realizada en un laboratorio de aceites lubricantes, que tiene como propósito tratar un aceite lubricante usado para devolverlo a sus condiciones de base lubricante virgen y poder usarlo como materia prima en la elaboración de un aceite lubricante nuevo. Para esto, se utiliza un tratamiento con peróxido de hidrógeno y arcillas activadas para la eliminación de contaminantes como son los metales de desgaste presentes en el aceite y tener como residuo un lodo que pueda ser tratado por un proceso de biorremediación para poder ser devuelto a la tierra.

Debido a los diferentes contaminantes presentes en el aceite lubricante, se le realizó un pretratamiento de filtración para eliminar partículas de mayor tamaño y posteriormente eliminar

el agua ligada comúnmente. El aceite es calentado hasta una temperatura de 135°C para permitir la evaporación del agua existente y compuestos volátiles. Posteriormente se desarrolló el tratamiento con el peróxido de hidrógeno y las arcillas activadas, logrando dejar al aceite en condiciones de base lubricante que puede ser usado en la elaboración de un nuevo aceite lubricante.

Este proyecto muestra una alternativa de solución ambiental para la disposición final de los aceites lubricantes usados provenientes de la industria y del sector automotriz.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	IX

INTRODUCCIÓN

1. Generalidades	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Definición del problema	4
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Justificación	6
1.5. METODOLOGIA GENERAL	12
2. Generalidades Teóricas	15
2.1. Aceites lubricantes.....	15
2.1.1. Obtención.....	16
2.2. Propiedad de los lubricantes	19
2.2.1. Color.....	19
2.2.2. Viscosidad	20
2.2.3. Índice de viscosidad.....	21
2.2.4. Punto de Inflamación.....	21
2.2.5. Punto de Congelación.....	22
2.2.6. Número Total Acido (TAN)	23
2.2.7. Demulsibilidad.....	24
2.2.8. Densidad o peso específico.....	25
2.3. Clasificación de los aceites lubricantes.....	25

2.3.1.	Según normas API	25
2.3.2.	Según normas SAE	27
2.3.3.	Según normas ISO	31
2.4.	Aditivos	32
2.4.1.	Aditivos detergentes	32
2.4.2.	Aditivos antidesgaste	32
2.4.3.	Otros	32
2.5.	Contaminación y degradación del aceite lubricante	33
2.6.	Aceite lubricante usado	34
2.7.	Factores que deterioran un aceite lubricante	36
2.7.1.	Temperatura de operación	36
2.7.2.	Agua	37
2.7.3.	Sólidos y polvo	37
2.7.4.	Combustibles	38
2.8.	Propiedades afectadas por la degradación del aceite	39
2.8.1.	Oxidación del aceite	39
2.8.2.	Contaminantes químicos	41
2.9.	Problemas ambientales por aceites lubricantes usados	42
2.9.1.	Contaminación del agua	42
2.9.2.	Contaminación del suelo	43
2.9.3.	Contaminación del aire	44
2.9.4.	Efectos sobre la Salud Humana	45
2.10.	Métodos de regeneración de aceites lubricantes usados	46
2.10.1.	Proceso convencional Ácido-Arcilla	48
2.10.2.	Proceso Meinken	48
2.10.3.	Proceso selecto propano ácido-arcilla	49
2.10.4.	Proceso selecto propano-hidroterminado	49
2.10.5.	Proceso K.T.I.	50
2.10.6.	Proceso Berk	51
2.10.7.	Proceso PROP	51
2.10.8.	Destrucción térmica	52
2.11.	Uso del peróxido de hidrógeno en tratamientos de remoción de metales.	52
3.	Metodología del proyecto.....	55

3.1.	Metodología.....	55
3.1.1.	Obtención de las muestras de aceites lubricantes usados.....	56
3.1.2.	Análisis inicial del aceite lubricante usado	56
3.2.	Análisis característico del aceite base	66
3.3.	Diseño experimental del proyecto	66
3.3.1.	Etapa de Pre-tratamiento:	66
3.3.2.	Etapa de Regeneración:	67
3.3.3.	Etapa de Acabado	68
3.3.4.	Análisis final del aceite usado regenerado	70
4.	Resultados	72
4.1.	Análisis Inicial	72
4.2.	Análisis del pre-tratamiento.....	75
4.3.	Tratamientos con peróxido de hidrógeno	76
4.4.	Tratamiento con arcillas activadas y Cal hidratada.	77
4.5.	Evaluación de los resultados por parámetros	79
4.6.	Interpretación de espectros por FTIR	82
4.7.	Rendimiento del proceso	85
5.	Conclusiones y Recomendaciones	88
5.1.	Conclusiones.....	88
5.2.	Recomendaciones	90
	Referencias.....	91

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FCNM	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
MAE	Ministerio de Ambiente del Ecuador
pH	Potencial de hidrógeno
RAOHE	Reglamento ambiental de las operaciones hidrocarburíferas del Ecuador
TBN	Número básico total
TAN	Número ácido total
PCB	Policloruros de bifenilos

SIMBOLOGIA

%	Porcentaje
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
mgKOH/g	Miligramos de Hidróxido de potasio por gramo de sustancia
g/cm ³	Gramos por centímetro cúbico
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Ag	Plata
Cu	Cobre
V	Vanadio
Al	Aluminio
Pb	Plomo
Fe	Hierro
Sn	Estaño

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla I. Composición de una base de aceite lubricante.....	17
Tabla II. Tabla de composición de una aceite lubricante.	18
Tabla III. Clasificación API para aceites lubricantes de transmisión	29
Tabla IV. Clasificación de los aceites lubricantes según norma SAE	30
Tabla V. Clasificación de los aceites lubricantes según ISO	31
Tabla VI. Concentraciones de contaminantes en un aceite usado.....	35
Tabla VII. Posibles causas de degradación del aceite	40
Tabla VIII. Posibles causas de degradación del aceite	41
Tabla IX. Análisis inicial del aceite usado.....	73
Tabla X. Resultados de metales de desgaste en el aceite lubricante usado	73
Tabla XI. Análisis del pre-tratamiento.	75
Tabla XII. Resultados de los tratamientos con H ₂ O ₂	76
Tabla XIII.- Resultados de los metales de desgaste en el aceite re-refinado	78
Tabla XIV.- Límites permisibles en aceites lubricantes	¡Error! Marcador no definido.
Tabla XV.- Comparación de parámetros	79
Tabla XVI. Comparación de concentración de metales de desgaste	81
Tabla XVIII. Peso finales de las muestras de aceite re-refinado	85
Tabla XVIII. Rendimientos para cada muestra	86

INDICE DE GRAFICOS

	Página
Gráfico 4.1.- Espectro del aceite lubricante usado sin tratamiento.....	833
Gráfico 4.2.- Espectro del aceite lubricante tratado con H ₂ O ₂	83
Gráfico 4.3.- Espectro del aceite lubricante usado tratado con H ₂ O ₂ y arcillas activadas.....	83

CAPITULO 1
GENERALIDADES

1. Generalidades

1.1. Antecedentes

El crecimiento del sector industrial lleva consigo un aumento del uso y demanda de los recursos naturales y sus derivados y con esto el aumento del empleo de maquinarias. Es impensable operar máquinas con piezas móviles sin aceites lubricantes.

Es clara la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de reciclaje y nuevas alternativas para componentes que no son amigables con el ambiente, como lo es un aceite lubricante usado.

En la actualidad, los desechos aceitosos de lubricantes se encuentran expandiendo en el medio ambiente, en varios lugares manejados por la sociedad, tales como: talleres mecánicos, lavadoras automotrices, concesionarias de vehículos, industrias en general, incluyendo la hidrocarburifera, siendo ésta una de las mayores impacto.

A pesar de que existen reglamentos ambientales y ordenanzas municipales relacionadas directamente con el manejo de estos desechos, no es menos cierto que los aceites lubricantes usados constituyen un peligro ambiental. Un estado responsable de la salud de su población y protección de la riqueza medioambiental debe manejar un sistema integral sobre la gestión de los aceites lubricantes usados.

Los aceites lubricantes tienen en su composición sustancias contaminantes de alto impacto para la salud humana, especialmente de naturaleza cancerígena. Estos compuestos se caracterizan por ser sustancias que se mantienen de forma estable en plantas y suelo, hasta llegar finalmente al cuerpo humano desarrollando influencia en la salud humana. Por estas razones, los desarrollos tecnológicos buscan siempre concentrar estos contaminantes en las formas más estables posibles y disponer de ellos en forma tal, que puedan liberarlos nuevamente a un ambiente desde el cual puedan reiniciar su ciclo de vida. Estas tecnologías demandan gran cantidad de dinero y trabajo, por lo que siempre se busca minimizar la generación de los

residuos finales provenientes de aceites lubricantes usados buscando acciones de acción inmediata.

En el presente trabajo se propone un método para la re-refinación de los aceites lubricantes usados mediante el uso de peróxido de hidrógeno y arcillas activadas, logrando devolver al aceite usado a sus condiciones iniciales como base lubricante, tratando de generar al mismo tiempo, un mínimo de lodos o productos contaminantes.

1.2. Definición del problema

La disposición final inadecuada de los residuos de aceites lubricantes usados, compuestos por hidrocarburos de petróleo, aromáticos policíclicos, metales y otros compuestos contaminantes– ocasionan un deterioro en el medioambiente y la salud humana por sus efectos cancerígenos, tóxicos y venenosos.

Por estas razones, los desarrollos tecnológicos buscan siempre concentrar estos contaminantes en las formas más estables posibles

y disponer de ellos en forma tal, que queden completamente aislados de aquellas circunstancias que puedan liberarlos nuevamente a un ambiente desde el cual puedan reiniciar su ciclo de vida. Estas son tecnologías que demandan mucho esfuerzo en recursos económicos y trabajo, por lo que siempre se busca minimizar la generación de los residuos finales provenientes de aceites lubricantes usados y se considera que cualquier acción tendiente a ello debe acometerse sin demoras y con la mayor eficiencia.

Los lubricantes usados poseen atractivas posibilidades de aprovechamiento, sea como energéticos en procesos de combustión, como insumo para la regeneración de las bases lubricantes o como insumo para otras industrias en sectores tan variados como caucho, fundición, cerámicas y otras.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Eliminar contaminantes por degradación de un aceite lubricante usado mediante procesos físico-químicos controlados.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar un aceite de motor usado mediante análisis de laboratorio
2. Caracterizar un aceite re - refinado mediante análisis de laboratorio
3. Determinar la relación aceite/peróxido de hidrógeno necesaria para el tratamiento del aceite usado

1.4. Justificación

Los aceites lubricantes son usados en numerosas tareas y como una de las principales está la lubricación de maquinarias evitando el contacto metálico y reduciendo de esta manera la fricción y desgaste de estas piezas, además los aceites lubricantes permiten lograr el enfriamiento de las piezas móviles presentes en un motor.

Los aceites lubricantes están sujetos a deterioro debido a su exposición al oxígeno en la atmósfera. Aunque esto puede producirse durante su fabricación y almacenamiento, la mayoría se produce durante el uso. El problema es que una vez que el aceite ha sido oxidado puede no alcanzar el estándar requerido de rendimiento establecidos por los fabricantes de motores. El aceite tiene que realizar muchas funciones físicas y químicas, cualquiera de las cuales, si no se cumplen, pueden llevar al fracaso del motor. La más importante de estas tareas, es la capacidad de lubricar a las superficies en movimiento, y si el aceite está severamente oxidado, dejarán de hacerlo.

Los aceites lubricantes contienen aditivos que le permiten mejorar su rendimiento y prolongar su vida útil. Los aditivos sólo retrasan el inicio de la grave alteración del aceite y, una vez consumidos los aceites lubricantes usados presentan una oxidación más acelerada en comparación con la del aceite base.

La tasa de oxidación del aceite se ve afectado por:

- 1.- Disponibilidad de oxígeno,
- 2.- La temperatura,
- 3.- La presencia de catalizadores
- 4.- La composición de la materia prima de base o aceite lubricante básico.

La disponibilidad de oxígeno para la reacción química aumenta a medida que el aceite captura oxígeno al circular por el sumidero o reservorio del mismo en el motor. El debilitamiento de los empaque en los anillos del pistón permite el ingreso de una mayor cantidad de oxígeno dentro del motor que entra en contacto con el aceite, acelerando el proceso de oxidación.

Como principal generador de los aceites usados tenemos a la industria automotriz. Según datos del INEC, en el Ecuador hasta el año 2012 se han matriculado 1'509.458 vehículos. Teniendo en cuenta, que en promedio un auto recibe 4 de cambios de aceite por

año, y que cada cambio requiere en promedio de 1 galón de aceite, entonces tenemos que al año en el Ecuador, aproximadamente se consumen 6'037.832 galones de aceite lubricante.

Un estudio de Eficácitas – INEC estimó que el sector industrial de Guayaquil (542 industrias de manufactura) produce los tipos de contaminación que se muestran en la TABLA 1.

Tabla 1. Contaminantes producidos en el sector industrial Guayaquil

Aire	
Partículas	186.18 ton/año
SO₂	1.448.62 ton/año
NO_x	585.88 ton/año
CO	45.9 ton/año
Agua	
Descargas de aceite y grasa	613.62 ton/año
Suelo	
Descargas de lodos	1,022.03 ton/año
Descargas de escoria	10,562.86 ton/año

Fuente: *Eficácitas-INEC. Contaminación Industrial en Guayaquil*

En la actualidad, el aceite lubricante usado se vende a pequeñas empresas o a gestores de desechos para hacer uso del poder energético en procesos de combustión. El costo de un tanque de 55 galones de aceite usado está alrededor de \$10 a \$12, precio que es mucho más económico al combustible comercial, y de esta manera se obtiene una mayor ventaja competitiva en el mercado.

Además, por la mala manipulación, un galón de aceite usado puede contaminar 1, 000,000 de galones de agua. El aceite usado que se vierte en el agua produce una película impermeable delgada de 0.2 – 1 mm que de rápida propagación. Esta película afecta la vida microbiológica en el agua por el incremento de la demanda química de oxígeno (> 120 mg/L).

El Ministerio de Ambiente del Ecuador (MAE) en el TULSMA. Libro VI. Título V, ha planteado acuerdos que indican el manejo, control y disposición final de los desechos peligrosos, como lo son los aceites lubricantes usados[1]. (Ecuador, 2011)

De acuerdo a esto y otros reglamentos, como el Acuerdo Ministerial 048 del MA. Registro Oficial N° 439 del 3 de mayo del 2011, expresa el Coprocesamiento De Desechos Peligrosos En Hornos Cementeros[2]. (Ecuador, Acuerdo Ministerial 048, mayo 2011). En base a esto han proporcionado licencias a ciertas empresas para que sean gestores de los aceites usados. Cada uno de estos organismos está en el deber de reportar a los organismos seccionales las cantidades de desechos lubricantes recolectados y la disposición final dada.

Los lubricadores, así como las empresas automotrices están en la obligación de reportar a los departamentos del MAE las ventas de aceites lubricantes que han tenido

El MAE además vigila el cumplimiento de capacitaciones técnicas ambientales por parte de comercializadoras y productoras de aceites lubricantes a las empresas expendedoras, lubricadoras y mecánicas.

Para reducir esta problemática por malas prácticas de disposición final de estos lubricantes usados, en el mundo se han desarrollado nuevas metodologías para el reciclaje y minimización de estos residuos.

En este caso el destino final es llevarlos a un proceso de regeneración, para su reutilización como materia prima en la elaboración de nuevos aceites lubricantes.

1.5. METODOLOGIA GENERAL

En base a la investigación bibliográfica, se ha establecido la siguiente metodología de trabajo:

1. Toma de muestras
2. Análisis de la muestra de aceite lubricante usado
3. Eliminación de residuos mediante procesos físicos como centrifugación y filtración en la muestra de aceite.
4. Tratamiento químico con Peróxido de Hidrógeno

5. Determinación de condiciones óptimas para el tratamiento
6. Tratamiento de la muestra tratada con arcillas activadas.
7. Evaluación de la muestra final como base lubricante.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES TEÓRICAS

2. Generalidades Teóricas

2.1. Aceites lubricantes

Se conoce como lubricante a toda sustancia capaz de reducir el rozamiento, la fricción, el desgaste y facilitar el movimiento entre dos piezas en movimiento trabajando a altas temperaturas y presiones, ya sea lubricante de origen animal, mineral o sintético. Estas sustancias pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas. Tienen entre sus funciones mantener limpias las piezas del motor, formar una película continua y resistente y permitir la evacuación de calor [3].

Las características físicas del lubricante permiten llenar las superficies irregulares de las partes metálicas e impedir el escape de combustible en motores y tener un mejor aprovechamiento de la energía. Los lubricantes líquidos arrastran la suciedad y permite mantener limpio los circuitos de lubricación. Ciertos lubricantes, como son los hidráulicos, permiten transferir la potencia de elementos de un sistema a otro.

2.1.1. Obtención

Los aceites lubricantes están compuestos por un 75 % de base lubricantes que provienen de la refinación del crudo de petróleo y un 25% de aditivos que le dan las propiedades a cada tipo de lubricante [4]. De acuerdo a su base lubricante, estos se pueden clasificarse en mineral o sintético.

2.1.1.1. Aceites Minerales

Son aquellos con base lubricante que proceden del petróleo. Sabiendo que el petróleo posee varios componentes con los cuales se pueden obtener distintas clases de productos, el crudo parafínico es el ideal para la elaboración de Aceites Lubricantes.

En la tabla I se muestra la composición de una base lubricante de origen mineral:

Tabla I. Composición de una base de aceite lubricante.

TIPO DE SUSTANCIA	HIDROCARBUROS	PORCENTAJE EN PESO
Parafina	Alcanos	45 – 76%
Naftenos	Cicloalcanos	13 – 45%
Aromáticos	Aromáticos	10 – 30 %

Fuente: Lubrication Fundamentals Mobil 1980, J. George Wills, page 10

2.1.1.2. Aceite Sintético:

No provienen directamente del crudo de petróleo, sino que son elaborados a partir de derivados del petróleo que pasan por diferentes procesos. Su elaboración es más compleja pero presentan mejores ventajas comparados con el aceite

mineral, como es la temperatura de operación a la que estos pueden trabajar, así como su resistencia a la oxidación.

Las principales propiedades que tienen los aditivos es el de darle al aceite la capacidad antioxidante, detergente, anticorrosivo, antiespumante y antiséptico.

La tabla II muestra la composición de cada tipo de aditivo:

Tabla II. Tabla de composición de una aceite lubricante.

Propiedad	Compuestos
Antioxidante	Ditiofosfatos, fenoles, aminos
Detergentes	Sulfonatos, fosfonatos, fenolatos (de bario, magnesio, zinc, entre otros)
Anticorrosivos	Ditiofosfatos de zinc y bario, sulfonatos
Antiespumantes	Siliconas, polímeros sintéticos
Antisépticos	Alcoholes, fenoles, compuestos clorados

Fuente: *Lubrication Fundamentals Mobil 1980, J. George Wills, page 15*

2.2. Propiedad de los lubricantes

Un producto terminado que comprende de una base lubricante más aditivos se denomina como aceite lubricante. Los lubricantes pueden ser clasificados en distintos tipos por medio de sus propiedades físico químico. Esto, permite distinguir y seleccionar el lubricante para distintas pruebas, máquinas, y servicios a los que puede ser sometido. Tales propiedades son:

2.2.1. Color

El color de los aceites lubricantes puede variar de negro a transparente. El color no es un parámetro que puede determinar la eficiencia o desempeño del lubricante, pero es un parámetro que marca la calidad de refinación del aceite, pero la estabilidad del color del aceite es la parte importante a tomar en cuenta.

2.2.2. Viscosidad

La viscosidad es el parámetro más importante dentro de la industria del lubricante. Es aquel que puede determinar de manera general si el lubricante sirve o no para la actividad designada. La mayoría de los sistemas de clasificación de los aceites lubricantes dependen de esta propiedad.

La viscosidad se define como la resistencia que tiene el líquido a fluir y está directamente relacionada con la fricción interna molecular del líquido. Un aceite muy viscoso necesita de mayor consumo de energía en una maquina y una mayor temperatura de trabajo y un aceite de baja viscosidad facilita el movimiento entre las piezas metálicas pero puede provocar un desgaste de las piezas por la película insuficiente de lubricante que se forma.

La viscosidad afecta al enfriamiento de los engranajes y cojinetes, a la generación de calor dentro la máquina y a la formación de la

película lubricante. También, el consumo de aceite depende en gran parte de que tan alta o bajo es la viscosidad.

Como la viscosidad es un factor que es afectado por la temperatura, es importante considerar las temperaturas de operación a las que se va a someter al aceite al momento de la selección del mismo.

2.2.3. Índice de viscosidad

Es una medida adimensional que mide la relación de la variación de la viscosidad a diferentes temperaturas. Mientras más alto sea el valor de la viscosidad, menor va a ser la variación de la viscosidad.

2.2.4. Punto de Inflamación

Se conoce como el punto de inflamación a la temperatura mínima en la cual el aceite emite una cantidad suficiente de vapores capaces de inflamarse en presencia de una llama.

Este parámetro depende de la composición del crudo con el que fue elaborado el aceite y nos indica la presencia de componentes livianos en la mezcla del aceite. Mientras más bajo sea la temperatura del punto de inflamación, el aceite tendrá mayor tendencia a inflamarse.

El punto de inflamación nos indica la calidad del aceite. En los aceites industriales el punto de inflamación suele estar entre 180°C y 232 °C, y en los empleados en la automoción entre 260 y 354°C.

2.2.5. Punto de Congelación

El punto de inflamación es la medida de la temperatura a la cual el aceite deja de fluir. El aceite normalmente es una sustancia líquida, pero mientras más baja es la temperatura, la viscosidad del aceite aumenta y el aceite prácticamente pasa a un estado “sólido”. En un aceite de clase parafínica se debe principalmente a la cristalización de sustancias parafínicas.

2.2.6. Número Total Acido (TAN)

Los aceites generalmente poseen aditivos antioxidantes, y el TAN permite medir el agotamiento de estos aditivos y el deterioro de la reserva alcalina con el tiempo. Existen dos tipos de acidez en un aceite:

- Acidez mineral, originada por ácidos residuales del refino.
- Acidez orgánica, originada por productos de la oxidación y los aditivos.

Debido a las altas temperaturas y a los esfuerzos mecánicos a los que es sometido el aceite, hay una degradación y oxidación progresiva dentro de la composición del aceite. Esto produce la formación de lodos y depósitos de carbono, reducción de la viscosidad y desgaste en las piezas metálicas. Por esto, la medición de este parámetro es un muy importante para determinar el nivel de protección del aceite. El producto de una

oxidación en los hidrocarburos de las bases lubricantes produce productos como cetoácidos corrosivos.

2.2.7. Demulsibilidad

Es la capacidad que tiene un aceite para separarse de agua que se encuentra en forma de emulsión en el aceite. Si el aceite no es capaz de eliminar el agua, este conlleva al desgaste y a la corrosión de las piezas metálicas. La oxidación del aceite, reduce la capacidad demulsificadora del aceite.

Este es un parámetro muy importante cuando se trata de aceites hidráulicos o aceites que trabajan en procesos de grandes esfuerzo como es maquinaria industrial o turbinas.

2.2.8. Densidad o peso específico

Esta propiedad analiza la relación del peso de un volumen de aceite dado en relación a la misma cantidad de volumen de agua. Depende mucho de la calidad de crudo con el cual fue elaborado.

Uno de los principales términos que se escuchan en la industria petrolera son los grados API (American Petroleum Institute) que guarda relación con el peso específico medido a 60°F .

2.3. Clasificación de los aceites lubricantes

2.3.1. Según normas API

Una de las principales formas de clasificar al aceite lubricante es por medio del tipo de motor en el que va a ser usado.

La API (American Petroleum Institute) diseño ciertas nomenclaturas dependiendo del motor.

Cada motor necesita de un tipo de lubricante que pueda satisfacer sus necesidades de diseño y condiciones de operación, por eso la API, junto con la SAE (Society of Automotive Engineers) y ASTM (American Society for Testing of Materials) han realizado varios ensayos y pruebas para definir el uso de cada tipo de aceite.

Analizando los tipos de automotor que existen en el mercado y cada clase de servicio, se han clasificado los motores en “Service” y “Comercial”, a los cuales se les ha asignado las letras “S” y “C” respectivamente.

Los motores “Service”, son aquellos de motores naftenos que son para autos de pasajeros y camiones livianos, y los motores “Comercial”, se refiere a los vehículos comerciales, agrícolas, de la construcción y todo terreno que operan con combustible diesel.

Para ambos tipos casos, luego de indicar la letra que indica el motor en el que va a ser usado el aceite, se le agrega una segunda letra comenzando por la "A", que indica las exigencias del mercado siendo "A" la de menor exigencia y se continua en orden alfabético mientras aumentan las exigencias. Cuando se define un nuevo nivel API, el anterior queda categorizado como obsoleto.

También API desarrollo una clasificación aparte de lubricantes usados en motores de transmisión, reconocidos por la sigla "GL", seguido de la numeración, empezando desde 1 en adelante. La clasificación es especificada en la siguiente tabla III.

2.3.2. Según normas SAE

La organización SAE (Society of Automotive Engineers) también desarrollo una clasificación especial para los aceites según su rango de viscosidad en centistokes (cst), medidos a temperaturas de 100°C y los divide en dos grandes grupos : Norma SAE J300d y Norma SAE J306c. La norma SAE J300d abarca los aceites

lubricantes para cárter y la norma SAE J306c abarca los aceites para transmisión.

Estas clasificaciones dividen a los lubricantes en 6 tipos para viscosidades de bajas temperaturas o grados invierno que son representados por la letra W (por Winter) y 5 grados de viscosidades para altas temperaturas o grados de verano que solo están representados por un número.

Mientras más elevado sea el número mejor es el desempeño y el mantenimiento de la viscosidad del aceite a altas temperaturas, y mientras menor sea el número, mejor es la fluidez del aceite a bajas temperaturas y en los momentos de arranque del motor.

Cuando un aceite está diseñado para trabajar a un solo ambiente de trabajo se lo conoce aceite monógrado, y los aceites para que puedan trabajar a los dos tipos de ambiente, invierno y verano se los conoce como aceites multigrados.

Tabla III. Clasificación API para aceites lubricantes de transmisión

CLASIFICACIÓN API PARA LUBRICANTES PARA TRANSMISIÓN		
Identificación	Especificación	Aplicación
GL-1	Aceites minerales puros	Transmisiones manuales de tractores y vehículos industriales
GL-2	Aceites que contienen minerales grasos	Transmisiones industriales para tornillos sin fin.
GL-3	Aceites con aditivos antidesgaste	Transmisiones manuales, engranajes cónicos sometidos a poco esfuerzo.
GL-4	Aceites con media aditivación EP (Extrema Presión)	Transmisiones manuales, engranajes hipoides medianamente sometidos a esfuerzos.
GL-5	Aceites con alta aditivación EP (Extrema Presión)	Engranajes hipoides muy sometidos a esfuerzos. Pueden ser usados en transmisiones manuales.

Fuente: *Guía para la condición del aceite, 2003, Shell-Ecuador.*

Tabla IV. Clasificación de los aceites lubricantes según norma SAE

Tipos de Lubricantes según NORMA SAE	
SAE	VISCOSIDAD CINEMATICA A 100°C
0W	3.8
5W	3.8
10W	4.1
15W	5.6
20W	5.6
25W	9.3
20	5.6 a 9.3
30	9.3 a 12.5
40	12.5 a 16.3
50	16.3 a 21.9
60	21.9 a 26.1

Fuente: *Guía para la condición del aceite, 2008, Shell-Ecuador.*

2.3.3. Según normas ISO

Al igual que la SAE, la ISO clasifica a los aceites por su viscosidad en Centistokes, pero a 40°C.

La identificación de la clasificación ISO, es un número que es seguido por el nombre del lubricante. En la tabla V se especifican los diferentes grados de viscosidad en el sistema ISO.

Tabla V. Clasificación de los aceites lubricantes según ISO

GRADO ISO	Viscosidad mínima a 40°C (cst)	Viscosidad máxima a 100°C (cst)
15	13.5	16.5
22	19.8	24.2
37	33.3	40.7
46	41.4	50.4
68	61.2	74.8
100	90	110
150	135	165
220	198	242
320	288	352
460	414	504

Fuente: *Guía para la condición del aceite, 2008, Shell-Ecuador.*

2.4. Aditivos

2.4.1. Aditivos detergentes

La función principal de estos aditivos es la dispersar la materia particulada y de esta manera mantener limpio el área de operación.

2.4.2. Aditivos antidesgaste

Como su nombre lo dice, estos aditivos previenen el desgaste de las piezas metálicas producidas por el rozamiento de las piezas, presencia de abrasivos y ataque de ácidos corrosivos. Estos aditivos contienen compuestos de fósforo, azufre, aditivos alcalinos como fenatos básicos, sulfonatos y fosfatos de zinc.

2.4.3. Otros

Para mejorar la eficiencia de los aceites, estos pueden contener agentes dispersantes, antioxidantes, inhibidores de espuma, depresores de pour point y mejoradores de índices de viscosidad.

2.5. Contaminación y degradación del aceite lubricante

Debido al modo de trabajo del aceite, es muy común que el aceite entre en contacto con impurezas propias del desgaste de las piezas mecánicas que lubrica, el polvo del ambiente y además de los productos contaminantes formados por la propia degradación del aceite como son los solventes clorados que se forman durante la reacción de las bases lubricantes son los compuestos halogenados de los aditivos, entre estos tenemos tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno [7].

Además de la contaminación por agua, combustible y ácidos. Esta contaminación es la que produce la degradación del aceite, alterando las propiedades físicas y químicas de los lubricantes, que además de degradar al aceite, produce el deterioro del motor.

2.6. Aceite lubricante usado

Se considera un aceite usado, a todo aceite que haya pasado por el proceso de lubricación y ha sido contaminado durante el tiempo de operación, afectando sus propiedades y degradando sus principales componentes [8].

Después de su uso, el aceite lubricante adquiere grandes concentraciones de metales, originados por el propio desgaste metálico del motor y de las piezas lubricantes que estuvo lubricando. Entre estos metales podemos encontrar cadmio, cromo, plomo, magnesio, entre otros. Además de estos contaminantes, también se encuentran compuestos clorados, que provienen del proceso de refinación del crudo.

La tabla VI Muestra la concentración media de los contaminantes en un aceite usado.

Tabla VI. Concentraciones de contaminantes en un aceite usado

Contaminante	Aceite lubricante en motor a diésel	Aceite lubricante en motor a gasolina	Aceite industrial
Cadmio	1.1	1.7	6.1
Plomo	29.0	2.2	217.7
Cromo	2.0	9.7	36.8
Zinc	332	951	373.3
PCB'S	20.7	20.7	957.2
Cloro total	3600	3600	6100

Fuente: www.shellglobalsolutions.com/base_oils/library/library.htm

La presencia de metales en el aceite, puede dar rastros de donde está ocurriendo el desgaste del motor, por lo general, la presencia de silicio indica suciedad en el motor, mientras que la presencia de sodio nos puede dar alerta de contaminación con agua o de algún refrigerante. Otros elementos pueden ser originados por la descomposición de los aditivos del aceite.

2.7. Factores que deterioran un aceite lubricante

Mientras cumplen el ciclo de operación, los aceites sufren una descomposición y degradación de sus componentes como son los aditivos, por lo cual, el aceite tiene un tiempo de uso útil y tiene que ser cambiado. El único componente del aceite que no se degrada es la base lubricante, solo se contamina.

Cuando se realiza el cambio de aceite de un motor, éste entra disolviendo los lodos generados por el aceite anterior, formando el primer factor que comienza afectando al aceite nuevo. Mientras más metales de desgaste estén presentes en este lodo, los aditivos sufrirán mayor degradación provocando el aumento de la velocidad de oxidación del aceite [9].

2.7.1. Temperatura de operación

A mayor temperatura, mayor es la descomposición de las cadenas de hidrocarburos, lo que provoca que el aceite se oxide. Los productos formados a partir de este proceso son ácidos que se emulsionan cuando están en presencia con agua y que afectan directamente a las piezas metálicas. Mientras mayor es la

concentración de estos ácidos, mayor es la formación de lodos insolubles. Cuando el aceite trabaja a temperaturas menores a 50°C, la velocidad de oxidación del aceite es muy baja, lo cual no influye en la duración del aceite.

2.7.2. Agua

El agua presente en un aceite usado, proviene de la condensación de las partículas de agua del ambiente, o también puede provenir de alguna fuga presente en los sistemas de enfriamiento. El agua se mezcla con el aceite en forma de emulsión, provocando un debilitamiento en la película de lubricación, provocando el contacto entre las superficies metálicas y permitiendo el desgaste de estas piezas. Cuando la presencia de agua en el aceite sobrepasa el 0.2 %, se condensa al aceite.

2.7.3. Sólidos y polvo

Estos contaminantes provienen del ambiente donde se encuentren las máquinas, y entran en contacto con el aceite por

los sellos y empaques en mal estado. Las partículas metálicas provienen del desgaste de piezas y el hollín formado proviene de la mala combustión dentro de la máquina[10].

El hollín es un residuo insoluble de la combustión incompleta que es disuelta en el aceite y solo es encontrado en aceites para motor, ya sea a diesel o gasolina. Son el residuo de las cadenas largas de hidrocarburos, que se descomponen formando cadenas más pequeñas además de compuestos poliaromáticos.

El hollín es uno de los principales contaminantes que eleva la viscosidad del aceite, ya que el hollín se mantiene en suspensión dentro del aceite, tornándolo de color negro y aumentando el porcentaje de cenizas en el motor.

2.7.4. Combustibles

La presencia de combustible proviene del paso de este hasta la cámara de combustión y hasta el cárter, lo que provoca en el

aceite una dilución del mismo, que afecta de manera brusca a la viscosidad.

2.8. Propiedades afectadas por la degradación del aceite

Los diferentes tipos de contaminación, afectan al aceite de maneras distintas y algunas de estas contaminaciones son propias del uso del aceite, por lo que hay límites permisibles [11].

2.8.1. Oxidación del aceite

La oxidación es un proceso que ocurre cuando la reserva alcalina en el aceite comienza a agotarse, y elementos como el azufre entran en contacto con el oxígeno del ambiente y comienzan a oxidarse, formando los óxidos de azufre que luego en presencia de agua forman ácidos. Este ácido es el que causante del deterioro del motor.

Cuando la temperatura de operación del aceite supera los 50°C, aumenta el proceso de oxidación del aceite. Se ha estudiado que por cada 10°C por arriba de los 50°C, la tasa de oxidación se duplica[12].

En la tabla VII se muestran las causas para la degradación del aceite y los límites permisibles en un aceite de motor.

Tabla VII. Posibles causas de degradación del aceite

PARAMETRO	CAUSAS DE DEGRADACION	LIMITES
Viscosidad	Una disminución de puede ser provocada por una dilución por combustible o emulsión de agua. Un aumento puede provocarse por oxidación del aceite y acumulación de hollín.	Se acepta un incremento de la viscosidad de hasta un 20% y una reducción de la viscosidad de hasta un 15%. Pasado esto, el aceite debe ser cambiado.
Contenido de agua	La presencia de agua puede deberse por fugas en el sistema de refrigeración o condensación de vapor de agua.	Hasta un 0.4%se permite de contaminación por agua.
TBN	La disminución de TBN se puede producir por la oxidación del aceite, sobrepresión y temperatura del motor.	Alerta: 5 - 15% Crítico: < 40 - 50% del valor original

Fuente: Guía para la condición del aceite, 2008, Shell-Ecuador.

2.8.2. Contaminantes químicos

Debido a la combustión que se produce dentro del motor, es inevitable la formación de compuestos químicos, formados a partir de elementos propios del aceite. En la tabla VIII Se muestran los principales contaminantes químicos del aceite:

Tabla VIII. Posibles causas de degradación del aceite

CONTAMINANTE QUÍMICOS	FUENTES
Óxido nítrico (NO) Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Combustión del nitrógeno atmosférico
Dióxido de Azufre (SO ₂) Trióxido de Azufre (SO ₃)	Azufre de la combustión del combustible
Olefinas R ₂ C=CR ₂ Diolefinas R ₂ C=CH-CH=CR ₂ Aromáticos R-Aromático Hidrocarburos R ₃ C-CR ₃	Productos de la Combustión incompleta
Formaldeídos H-CHO Superior aldeídos R-CHO Acetona R-CO-P Ácidos R-COOH	Combustión parcial

Fuente: *Guía para la condición del aceite, 2008, Shell-Ecuador*

2.9. PROBLEMAS AMBIENTALES POR ACEITES LUBRICANTES USADOS

Los aceites lubricantes, debido a su composición, son altamente peligrosos en el ambiente. Cuando estos se encuentran regados en el suelo o agua, tienden a esparcirse y ocupar grandes cantidades superficiales, bloqueando de esta manera la luz solar y obstaculizando el proceso de la fotosíntesis. Además de que un aceite usado, tiene en su composición grandes cantidades de metales de desgaste, tienden a liberar contaminantes que son tóxicos y algunos compuestos orgánicos volátiles.

2.9.1. Contaminación del agua

Es muy notable que el aceite es un gran contaminante del agua. Estos aceites por poseer cadenas de hidrocarburos, entran en contacto con la moléculas de agua, logrando así depositarse en el fondo, dañando la calidad del suelo marino, degradando y el alimento para muchos seres acuáticos y de esta forma destruyendo la flora y fauna que existe [13].

Los aceites lubricantes usados, poseen compuestos saturados que no se pueden biodegradar y su persistencia puede durar hasta 20 años. Se ha estudiado que 1L de aceite lubricante usado puede contaminar hasta 1'000.000 de litros de agua y puede expandirse hasta cubrir una superficie de 400m² en el agua.

Los metales que están presentes en los aceites usados, se disuelven fácilmente con el agua, y entran en contactos con el suelo, contaminando de esta forma hasta el agua subterránea.

2.9.2. Contaminación del suelo

El aceite fácilmente se adhiere al suelo, acumulándose. Los compuestos ligeros del aceite, se lo logran evaporar mientras que los más pesados permanecen sin degradarse. Cuando ocurren las lluvias, estos compuestos son fácilmente arrastrados, filtrándose a través de la tierra o escurriéndose contaminando la vegetación, alterando la capacidad física del suelo.

Además, los aceites obstaculizan el crecimiento de las plantas y reducen el poder de reproducción vegetal. Eliminan el oxígeno y los nutrientes necesarios para los animales y plantas por el crecimiento de microorganismos que no son propios del suelo.

Otro de los problemas graves dentro de esta contaminación, es el fin de estos contaminantes. Algunos de los aditivos de estos aceites, pueden ser absorbidos por vegetales y plantas, de esta manera llevando estos compuestos hasta el consumo humano.

2.9.3. Contaminación del aire

Los componentes más peligrosos dentro de los aceites usados son los metales de desgaste que estos poseen, Cr, Cd, Pb. Estos componentes son liberados en el aire cuando el aceite usado es usado como combustible alternativo. Debido a su poder calorífico, muchas industrias compran el aceite usado para usarlos en los hornos y reactores que necesitan de una gran cantidad de energías para poder funcionar. De esta manera y por la mala

combustión, los tóxicos son liberados al ambiente, contaminándolo y produciendo daños en la salud de las personas.

2.9.4. Efectos sobre la Salud Humana

La combustión de aceites producen gases tóxicos que contienen compuestos orgánicos como cetonas, aromáticos, aldehídos y poseen compuestos como Cl, NO₂, SH₂, Sb, Cr, Ni, Cd, Cu que irritan el aparato respiratorio, produciendo bronquitis, daños pulmonares, cáncer [14]. La presencia de metales como el plomo y magnesio pueden llegar a acumularse dentro del cuerpo humano produciendo cáncer de riñón, hígado y próstata.

Hay varias formas en que los humanos pueden estar expuestos a la presencia de aceite usado, como por ejemplo al nadar en lagunas o lagos donde el aceite usado ha llegado por derrame o comunicación con suelos contaminados [15]. Hoy en día, la empresa automovilística tiene bastante territorio sobre el mercado, por lo que el mantenimiento de carro es otra forma de exposición.

La construcción de urbanizaciones y ciudadelas cerca de industrias cementeras, es otra forma de exposición. Las industrias cementeras usan los aceites lubricantes usados como fuente de poder para sus grandes hornos. La falta de disposición de estos gases que se generan es el principal factor que afecta a la población cercana.

2.10. METODOS DE REGENERACION DE ACEITES LUBRICANTES USADOS

Los aceites usados pueden someterse a un proceso de regeneración, para devolverles sus propiedades como base lubricante. La mayoría de los aceites pueden ser regenerados, dependiendo del grado de contaminación, lo cual puede dificultar el proceso. Los procesos de regeneración de aceites usados constan de 3 fases: Pretratamiento, regeneración y acabado [16].

El proceso de Pretratamiento consiste en eliminar los contaminantes macromoleculares, agua, hidrocarburos ligeros. Para esto, se

requieren procesos de centrifugación, filtración y calentamiento dependiendo del caso .

El proceso de regeneración se utiliza para eliminar los metales de desgaste, y los restos de aditivos que todavía quedan del aceite nuevo. Este proceso es diferente para cada forma de re-refinación, y se utilizan diferentes químicos que faciliten el proceso. Al final se obtiene un aceite libre de sustancias contaminantes pero con apariencia de un aceite usado.

Por último se tiene el proceso de acabado, donde el aceite pasa por un proceso de decoloración y regulación de pH, para que pueda ser usado nuevamente en un proceso de elaboración de aceite nuevo.

A través del tiempo, se han desarrollados varios procesos para la eliminación de estos aceites usados, viéndose afectado cada uno por los costos de tratamientos o por los residuos que se producen al tratar de eliminar los compuestos contaminantes, haciéndolos

procesos inviables para la industria [17]. Entre estos procesos tenemos los siguientes:

2.10.1. Proceso convencional Ácido-Arcilla

El aceite a ser tratado es sometido a temperaturas de hasta 110°C para eliminar los compuestos ligeros y volátiles así como el agua presente. Luego es tratado con concentraciones de ácido sulfúrico para la eliminación de los metales y al final es filtrado mediante arcillas para decolorarlo y con cal para regular el pH. Este rendimiento tiene una eficiencia del 70% en peso y como producto secundario un lodo altamente contaminante que no puede ser devuelto a la tierra.

2.10.2. Proceso Meinken

El aceite usado pasa por un proceso de deshidratación y eliminación de componentes volátiles. Luego se lo trata mediante un proceso de “termocracking”, que es un proceso que elimina los contaminantes mediante una destilación. El producto de este proceso es tratado con ácido sulfúrico, dando un aceite-acido, que pasa por un proceso de

eliminación de gas oil, y finalmente se lo filtra y neutraliza. El rendimiento de este proceso es del 70%, obteniéndose como producto secundario gas oil, que es usado como combustible. Este es uno de los procesos más costosos del mercado.

2.10.3. Proceso selecto propano ácido-arcilla

Este proceso es una modificación del proceso ácido-arcilla, disminuyendo el uso del ácido sulfúrico mediante la adición del propano. Se obtiene una eficiencia de 80%, y como productos secundarios gas oil a un 6% y lodo contaminado hasta un 5%.

2.10.4. Proceso selecto propano-hidroterminado

Este proceso, produce una base lubricante de mayor calidad, sin producir los lodos contaminantes de los anteriores procesos. Pasa por el mismo proceso de pre-tratamiento que los otros procesos, y luego es tratado con propano, mediante un proceso de destilación. Al final pasa

por el proceso de hidrotratamiento para hidrogenar el aceite, y finalmente se lo filtra. Se tiene una eficiencia del 85% en peso y como productos secundarios se obtiene gas oil, y residuos de hidrocarburos pesados y livianos que pueden ser usados como combustible.

2.10.5. Proceso K.T.I.

Este proceso es uno de los más eficientes que existe porque no produce desechos. El aceite pasa por el proceso de Pretratamiento y destilación al vacío. Luego pasa a una torre de destilación al vacío para separar los compuestos livianos de los pesados, que son extraídos por el tope y fondo de la torre respectivamente. Finalmente pasa por el proceso de hidrogenación. Para este proceso, es necesario el diseño de una torre que permite el mínimo arrastre de compuestos asfálticos y evitar la acumulación de coque. El producto del fondo puede ser usado en la elaboración de asfalto.

2.10.6. Proceso Berk

Luego de que el aceite pase por el proceso de deshidratación, el resultado es sometido a un tratamiento con solvente de 2 -propanol-metilcetona-1-butanolen relación de 3 a 1. Finalmente el aceite es tratado con arcilla para la decoloración y eliminación de olor. Finalmente, pasa por un proceso de hidrotratamiento, que genera un mínimo de producto secundario. Con este proceso se puede obtener una eficiencia de hasta el 95%.

2.10.7. Proceso PROP

El aceite usado se trata con una solución de $\text{NH}_4 \text{H}_2\text{PO}_4$ (fosfato diamónico), que reacciona con los metales del aceite produciendo fosfato que son insoluble con el agua y aceite. El aceite sale emulsionado y pasa por un proceso térmico que degrada estos compuestos fosforados y aglomera los sólidos que se encuentran disperso, para luego ser eliminados por filtración. Luego este aceite es tratado con hidrógeno caliente, usando níquel y molibdeno para remover

compuestos de cloro, nitrógeno y azufre. Finalmente para por un proceso de filtración con arcillas. Este proceso no produce lodos generados por ácidos o solventes, por lo que no contamina al ambiente.

2.10.8. Destrucción térmica

Esta opción es tomada en consideración cuando el proceso de regeneración no es viable, que puede ser por el alto grado de contaminación del aceite o puede tratarse de un tema económico. La disposición final del aceite, son hornos donde el aceite es incinerado y usado como combustible [18].

2.11. Uso del peróxido de hidrógeno en tratamientos de remoción de metales.

El peróxido de hidrógeno ya ha sido estudiado en procesos de regeneración de aceites lubricantes. El proceso de la radiación ionizante es conocido en los efluentes tratamientos industriales

debido a su alta eficiencia en la degradación de compuestos orgánicos y en la eliminación de metales por la acción de los radicales OH^- y H^+ provenientes del peróxido de hidrógeno.

Muestras de aceites lubricantes han sido tratados por el proceso de radiación ionizante para la eliminación de metal y la degradación de compuestos orgánicos. Las muestras se irradiaron con distintas dosis de radiación y se determinaron elementos como Mg, Al, P, S, Cl, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Nb, Cd, Sn, Ba, Bi y Pb, antes y después de la irradiación, por técnica de fluorescencia de rayos X y el perfil orgánico se obtuvo por espectroscopia infrarroja obteniéndose rendimientos de hasta el 70% en remoción de los metales de desgaste [19].

CAPITULO 3

METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. Metodología del proyecto

3.1. Metodología

8. Esta investigación tiene un proceso esquematizado que ayudará en el cumplimiento de los objetivos propuestos. Antes de comenzar con el tratamiento, se realizaron análisis iniciales que sirvieron como valores referenciales (valores testigo) para poder dar las respectivas conclusiones. Una vez tomados los datos iniciales, se procedió con la eliminación de residuos mediante filtración, eliminando la mayoría de las impurezas presentes en el aceite, luego se trató el aceite con distintas concentraciones de peróxido de hidrógeno a distintos tiempos de contactos para poder determinar la dosis y tiempo ideal para la investigación. Determinadas las condiciones idóneas, se trató la muestra con arcillas activadas y cal para poder así eliminar los agentes contaminantes dentro del aceite que por medio de la filtración no se eliminaron y finalmente se evaluación de la muestra final como base lubricante.

3.1.1. Obtención de las muestras de aceites lubricantes usados

Se obtuvieron las muestras de aceites lubricantes usados de una fábrica de aceites lubricantes en la ciudad de Guayaquil que realiza análisis de los aceites durante su uso en maquinarias y equipos, para darle seguimiento y garantizar la vida útil de las maquinarias y poder definir el tiempo en el que debe ser cambiado el aceite usado por uno nuevo.

Con la finalidad de contar con un solo patrón de tratamiento, se mezclaron varias muestras de aceite usado para tener valores de contaminación generales, similares a las mezclas de aceites usados provenientes de diferentes proveedores.

3.1.2. Análisis inicial del aceite lubricante usado

Antes de comenzar con el tratamiento al aceite usado, se realizó una caracterización de la mezcla, a través de análisis de laboratorio para determinar el estado en el que se encontraba el aceite.

Tales pruebas fueron:

- Viscosidad a 100°C
- Viscosidad a 40°C
- Índice de Viscosidad
- TBN
- Densidad
- Color
- Punto de inflamación
- pH
- Determinación del contenido de metales de desgaste
- Cenizas simples

Basándonos en los resultados, se pudo apreciar que la muestra a usarse en el proyecto, si es una muestra con suficiente contaminación que pueda dar valores representativos al momento de realizar el tratamiento.

3.1.2.1. Determinación de viscosidad a 100°C:

Para la determinación de la viscosidad se procedió a seguir la norma ASTM D 445 – 11A. Para hallar el valor de la viscosidad se mide el tiempo de un volumen fijo de líquido a fluir bajo la gravedad a través del capilar de un viscosímetro en un baño de aceite a una temperatura controlada a 100°C. La viscosidad es el producto del tiempo de flujo medido y la constante de calibración del viscosímetro. Dos de tales determinaciones son necesarios para calcular la viscosidad.

Para este análisis se usó un baño de viscosidad a 100°C y un capilar con un diámetro de 1mm con constante de calibración $C= 1.24328$

3.1.2.2. Determinación de viscosidad a 40°C:

Para la determinación de la viscosidad se procedió a seguir la norma ASTM D 445 – 11A. Para hallar el valor de la viscosidad se mide el tiempo de un volumen fijo de líquido a fluir bajo la gravedad a través del capilar de un viscosímetro en un baño de aceite a una temperatura controlada a 40°C. La viscosidad es el producto del tiempo de flujo medido y la constante de calibración del viscosímetro. Dos de tales determinaciones son necesarios para calcular la viscosidad.

Para este análisis se usó un baño de viscosidad a 40°C y un capilar con un diámetro de 5mm con constante de calibración $C= 5.57320$

3.1.2.3. Determinación de índice de viscosidad.

Para determinar el índice de viscosidad se usó la norma ASTM D2270-98. Para hallar el valor del índice de viscosidad, son necesarios los valores de viscosidad a 40°C y a 100°C.

Se calcula el índice de viscosidad de la muestra como sigue:

$$IV = \frac{L - U}{L - H} \times 100$$

Donde:

- IV es el índice de viscosidad
- U es la viscosidad cinemática a 40°C en centistokes

- L y H son los valores definidos en por la norma ASTM.

3.1.2.4. Determinación de TBN.

Para determinar el TBN, se consideró la norma ASTM D 2986 B. Para determinar este parámetro, fue necesario pesar una muestra de 0.25 gr del aceite usado y disolverlo en 60 ml de una solución de Clorobenceno y Ácido Acético (2:1), con agitación magnética constante. Luego mediante el uso de un equipo Titroprocesador marca Mitsubishi, se determinó el valor del TBN en mgKOH/gr de solución.

3.1.2.5. Determinación de densidad

Se determinó el valor de la densidad mediante la norma ASTM D 1298-99 Mediante el uso de un

densímetro automatizado marca Anton Paar, se determinó el valor de la densidad en g/cm^3 .

3.1.2.6. Determinación de color

Se determinó el valor del color mediante la norma ASTM 1500 Se usó un equipo LICO 100 marca Koehler que cumple con la norma anteriormente mencionada. Usando una fuente de luz estándar, la muestra líquida es colocada en un recipiente y se compara con el disco de vidrio coloreado dentro de una clasificación de un valor desde 0,5 a 8,0.

3.1.2.7. Determinación del punto de inflamación

Para la determinación del punto de inflamación se siguió la norma ASTM D 93 que indica el uso de un sistema de copa cerrada. Se colocó aceite

usado en el vaso metálico, el cual es tapado y por una abertura se sumergió el termómetro sin que este toque el fondo del recipiente y se procedió a calentar la muestra. Controlando la temperatura con el uso del termómetro, y teniendo noción del rango en el que debería estar el punto de ebullición, se abrió un pequeño orificio donde se flameaba una pequeña llama sobre los vapores emitidos por el calentamiento del aceite. Se realizó esta acción hasta que los vapores emitidos se encendieran, produciendo una llama de color azul y se leyó inmediatamente la temperatura. Esto nos indicó el punto de inflamación en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$).

3.1.2.8. Determinación de pH

Para determinar el pH del aceite, fue necesario colocar una muestra suficiente de aceite en un vaso de precipitación y por medio del uso de un electrodo que contiene una solución de cloruro de plata se pudo medir el pH.

3.1.2.9. Determinación de metales de desgaste

Para la determinación de los metales de desgaste, se usó un equipo espectrómetro "SPECTROIL" que cumple con la norma ASTM 6595. Los valores de los metales fueron obtenidos en partes por millón (ppm)

3.1.2.10. Determinación de cenizas simples

Se determinó el valor de las cenizas simples por medio de la norma ASTM D 482. Se calentó un crisol limpio en una mufla a temperatura de 775°C por media hora, luego se dejó enfriar en un desecado por 20 minutos y se pesó el crisol frío. Este es el peso 1. Luego se pesó en el crisol una muestra representativa de aceite usado. Se pesó aproximadamente 3 gramos. Se calentó la muestra usando un mechero Bunsen por 2 horas hasta que la muestra dentro del crisol dejara de humear. Se procedió a colocar el crisol con los

restos de la muestra dentro de la mufla a temperatura de 775°C por 30 minutos. Pasado el tiempo de quema, se enfrió el crisol en un desecador por 30 minutos y finalmente se pesó el crisol . Este es el peso 2 . El valor del porcentaje de ceniza se determinó mediante el uso de la siguiente fórmula :

$$\%Cenizas\ simples = \frac{(Peso\ 2 - Peso\ 1)}{Peso\ muestra} \times 100$$

3.2. ANALISIS CARÁCTERÍSTICO DEL ACEITE BASE

Se analizó una base lubricante con la que está elaborado el aceite lubricante usado bajo los mismos parámetros de laboratorio para poder comparar el aceite lubricante usado regenerado y poder determinar si este aceite regenerado podría ser utilizado en formulaciones de aceites lubricantes como “base lubricante”.

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROYECTO

El diseño del proyecto se basó en tres etapas básicas para la re-refinación de un aceite lubricante usado que son: Pre-tratamiento, Regeneración y Acabado.

3.3.1. Etapa de Pre-tratamiento:

En esta etapa se filtró el aceite lubricante usado por medio de una tela filtro de 0.5 micras para remover los contaminantes o cualquier suciedad mayor a este diámetro para que no afecte el tratamiento posterior. Luego, el aceite ya filtrado, se calentó hasta

una temperatura de 135°C por un tiempo promedio de 2 horas para eliminar el agua ligada al aceite así como cualquier compuesto volátil, producto de la contaminación.

3.3.2. Etapa de Regeneración:

La re-refinación o recuperación, trata de devolver al aceite lubricante usado las características que tenía antes de su uso. Durante esta etapa se realizaron cuatro tratamientos con sus respectivas réplicas, es decir, se tomaron 8 muestras de 200 ml de aceite filtrado. Cada muestra fue pesada para al final poder determinar la eficiencia del tratamiento en porcentaje peso.

Se consideraron 4 niveles de dosificación para el peróxido de hidrógeno, por lo que las muestras fueron separadas en grupos de 2 para que cada ensayo tenga su respectiva réplica. Los niveles de aplicación de peróxido de hidrógeno fueron 5%, 10%, 15%, 20%, expresado como porcentaje en volumen sobre la cantidad de aceite usado, basado en el uso de ácido sulfúrico en tratamientos de aceites lubricantes usados [20]. Para la

dosificación fue necesaria la agitación de cada muestra a 750 rpm por un lapso de 20 minutos. Luego de esto se dejó reposar por 48 horas midiendo cada 12 horas el volumen de lodos formados y de esta manera determinar el tiempo en que se alcanzaría la sedimentación óptima de los lodos generados.

Una vez establecida la dosificación y el tiempo de reposo ideales, para la siguiente etapa, sólo se trabajó con los aceites tratados, en los procesos donde se obtuvo la mejor dosificación del peróxido de hidrógeno y el tiempo ideal de sedimentación.

La calidad de los aceites tratados se analizó por FT-IR para verificar los niveles de oxidación, nitración y sulfatación.

3.3.3. Etapa de Acabado

El aceite libre de sedimentos y agua es tratado con las arcillas activadas y con cal para regular el pH, mejorar el color del aceite

y remover cualquier partícula que no haya sido retirada en la etapa de regeneración.

Para esto se mezclaron 2 gramos de arcillas activadas con 0.1 gramos de cal hidratada, dosis basado en investigación con arcillas activadas en tratamientos similares [21]. Esta dosis es la que se va a usar en cada tratamiento.

Cada muestra de aceite es puesta en contacto con la mezcla arcilla-cal y agitada manualmente, para lograr que todo el aceite entre en contacto con estos sólidos. Enseguida, la mezcla es calentada hasta alcanzar una temperatura de 110°C y ser filtrada usando filtros de tela de 0.5 micras. La filtración usando una bomba que permite una filtración al vacío, a una presión de 275 mmHg.

3.3.4. ANÁLISIS FINAL DEL ACEITE USADO REGENERADO

Una vez realizada la filtración, se analizaron los parámetros de viscosidad a 100°C y 40°C, TBN, densidad, cenizas, color, determinación de metales de desgaste y pruebas de infrarrojo, decir las mismas pruebas que se le hizo al aceite lubricante usado sin tratar y a la base lubricante de referencia. De esta manera se determina la eficiencia del tratamiento.

CAPITULO 4

ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION

4. Resultados

4.1. Análisis Inicial

Los análisis iniciales y de acompañamiento en las diferentes etapas del tratamiento fueron realizados en un laboratorio de la ciudad de Guayaquil que ofrece el servicio de control de calidad de sus aceites y servicio post-venta de control de degradación del aceite por el uso.

El aceite lubricante usado en esta investigación es un aceite usado proveniente de los motores de una termoeléctrica del país.

Finalizado el desarrollo de la investigación, y tomando en consideración los resultados obtenidos en los análisis del aceite refinado, se realizó la evaluación de los resultados que serán presentados en este capítulo.

Tabla IX. Análisis inicial del aceite usado.

Parámetro	Unidad	Resultado
• Viscosidad a 100°C	Cst	12.50
• Viscosidad a 40°C	Cst	105.2
• Índice de Viscosidad	U	87
• TBN	mgKOH/g	28.6
• Densidad	g/cm ³	0.88596
• Cenizas simples	%	1.6
• Color	Unidades ASTM	5
• Punto de inflamación	°C	186
• pH	U	6.1

Fuente: K. Morán, 2015

Tabla X. Resultados de metales de desgaste en el aceite lubricante usado

Metales de desgaste	Unidades	Concentración
Cromo	ppm	14
Níquel	ppm	105.7
Plata	ppm	48
Cobre	ppm	32
Vanadio	ppm	148
Aluminio	ppm	21
Plomo	ppm	35
Estaño	ppm	78
Hierro	ppm	68

Fuente: K. Morán, 2015

El resultado del análisis efectuado al aceite lubricante usado a tratar, nos indican que el mismo ha perdido sus propiedades necesarias para realizar una buena lubricación, debido a su alta viscosidad y la presencia de metales de desgaste. Estos son los valores con lo que se comparará al final los resultados del aceite tratado.

4.2. Análisis del pre-tratamiento

Luego del proceso de filtración para remover los contaminantes del aceite, se procedió a la determinación del contenido de agua en el aceite usado, a través del ensayo ASTM D 95, en base a una destilación. Para determinar la cantidad de compuestos insolubles que se removerán en la filtración se usó el ensayo ASTM D 4055, en base a una filtración.

Los resultados de esta prueba se reportan en la tabla XI.

Tabla XI. Análisis del pre-tratamiento.

Parámetro	Unidades	Aceite lubricante usado antes del pre-tratamiento	Aceite lubricante usado luego del pre-tratamiento
Contenido de agua	%	1.20	0.00
Contenido de Insolubles	%	1.05	0.02

Fuente: K. Morán, 2015

Luego de la determinación, se procedió a eliminar el agua ligada y compuestos volátiles, mediante calentamiento a 135°C por 40 minutos. En la misma tabla XI, se reporta el valor de cero (0) de contenido de agua del aceite sometido a calentamiento.

4.3. Tratamientos con peróxido de hidrógeno

Como se explicó en el capítulo 4, luego de pasar por el proceso de pre-tratamiento, se tomaron 8 muestras de 200 ml del aceite filtrado, las cuales fueron pesadas. Las muestras fueron identificadas de tal manera que se las pueda diferenciar por pares.

Las muestras fueron dosificadas en distintas proporciones con su respectiva réplica y se las dejó reposar durante 48 horas para determinar la eficiencia del peróxido de hidrógeno y el tiempo de reposo ideal. La tabla XI indica los resultados obtenidos en esta etapa.

Tabla XII. Resultados de los tratamientos con H₂O₂

Tratamiento	Peso (gramos)	Volumen (ml)	Dosificación con H ₂ O ₂ (%)	Volumen de lodo formado (ml)			
				12 horas	24 horas	36 horas	48 horas
A1	177.20	200	5	5	8	8	9
A2	177.15	200	5	5	8	9	10
B1	177.17	200	10	5	8	9	10
B2	177.12	200	10	5	8	9	12
C1	177.16	200	15	8	9	12	12
C2	177.11	200	15	8	9	12	12
D1	177.13	200	20	9	10	12	12
D2	177.15	200	20	9	10	12	12

Fuente: K. Morán, 2015

A partir de los datos de la tabla XII se puede apreciar que el máximo de lodo que se forma a través de este tratamiento es de 12 ml y con un tiempo de 36 horas como máximo. De esto se desprende que la dosificación y el tiempo de reposo ideal son respectivamente: **Dosificación al 15% y tiempo de reposo de 36 horas de sedimentación.**

Para la siguiente etapa, sólo se trabajó con los tratamientos C1 y C2 donde se obtuvo la mejor dosificación y el tiempo ideal de sedimentación.

4.4. Tratamiento con arcillas activadas y Cal hidratada.

Los tratamientos C1 y C2 fueron tratadas con una mezcla de arcillas activadas y cal especificada, para mejorar el color del aceite y la regular el pH. A la muestra de aceite regenerada a la cual se le determinó la concentración de metales, el análisis de sus propiedades y análisis del espectro por FT-IR.

La tabla XII Nos indica los valores obtenidos para los metales de desgaste y el valor de pH.

Tabla XIII.- Resultados de los metales de desgaste en el aceite re-refinado

Metales de desgaste	C1 Ppm	C2 Ppm
Cromo	0.07	0.05
Níquel	8.86	8.56
Plata	0.00	0.00
Cobre	0.84	0.75
Vanadio	11.47	10.99
Aluminio	0.17	0.13
Plomo	0.00	0.00
Hierro	1.79	1.81
Estaño	0.00	0.00

Fuente: K. Morán, 2015

Los valores del Anexo I, nos indican que el aceite lubricante usado sin tratamiento se encuentra en un estado de precaución, y luego del tratamiento lo podemos considerar en un estado normal.

4.5. Evaluación de los resultados por parámetros

Finalmente a los tratamientos se les realizó los análisis de los parámetros establecidos para evaluar su condición al final del tratamiento y poder compararlo con su base lubricante.

La tabla XV muestra los resultados obtenidos.

Tabla XIV.- Comparación de parámetros

Parámetro	Unidades	Base lubricante	Aceite Usado	Aceite Re-refinado	
				C1	C2
• Viscosidad a 100°C	Cst	11.00	12.5	11.3	11.2
• Viscosidad a 40°C	Cst	101.4	105.2	102.5	102.8
• Índice de Viscosidad	U	93	87	94	94
• TBN	mgKOH/g	<0.05	28.6	<0.05	<0.05
• Densidad	g/cm ³	0.87678	0.88596	0.87639	0.87638
• Cenizas simples	%	0.005	1.6	0.006	0.008
• Color	Unidades ASTM	1.0	5	2	2
• Punto de inflamación	°C	284	185	252	252

Fuente: K. Morán, 2015

Los resultados de las viscosidades a 100°C y a 40°C del aceite lubricante usado mejoraron con respecto a los valores del aceite lubricante usado sin tratar, dando como resultado un mejor índice de viscosidad.

El valor del TBN es casi nulo para los tratamientos C1 y C2, lo que nos indica que los residuos de aditivo que contenía el aceite lubricante usado fueron removidos.

El valor de la densidad disminuyó por la eliminación de los contaminantes sólidos y remoción de los metales de desgaste presentes en el aceite lubricante usado.

Los resultados que presenta el aceite re-refinado comparado con los valores de la base lubricante son muy parecidos, y se puede establecer que el aceite re-refinado está muy cercano a sus condiciones como base lubricante.

Tabla XV. Comparación de concentración de metales de desgaste

Metales de desgaste	Unidades	Base Lubricante	Aceite usado	Aceite re-refinado	
				C1	C2
Cromo	ppm	0.00	14	0.07	0.05
Níquel	ppm	2.52	105.7	8.86	8.56
Plata	ppm	0.00	48	0.00	0.00
Cobre	ppm	0.01	32	0.84	0.75
Vanadio	ppm	8.00	148	11.47	10.99
Aluminio	ppm	0.00	21	0.17	0.13
Plomo	ppm	0.00	35	0.00	0.00
Hierro	ppm	0.59	78	1.79	1.81
Estaño	ppm	0.00	68	0.00	0.00

Fuente: K. Morán, 2015

Evaluando los valores de la tabla XVI, podemos establecer un porcentaje de mezcla en la que se puede usar el aceite lubricante re-refinado con la base lubricante, ya que sus valores son muy cercanos y no afectarían en la formulación de un aceite lubricante nuevo.

Basándonos en la concentración de Níquel que es el metal más alejado con respecto a la base lubricante, mediante una ecuación matemática (Anexo 1) se determina que el porcentaje de mezcla puede ser mayor al 39% para el aceite re-refinado para rebajar la concentración a 5ppm o menor.

4.6. Interpretación de espectros por FTIR

Por medio de la ASTM 2412-04, se pudieron comparar picos para interpretar concentraciones de hollín, oxidación, sulfatación, nitración, presencia de combustible y agua.

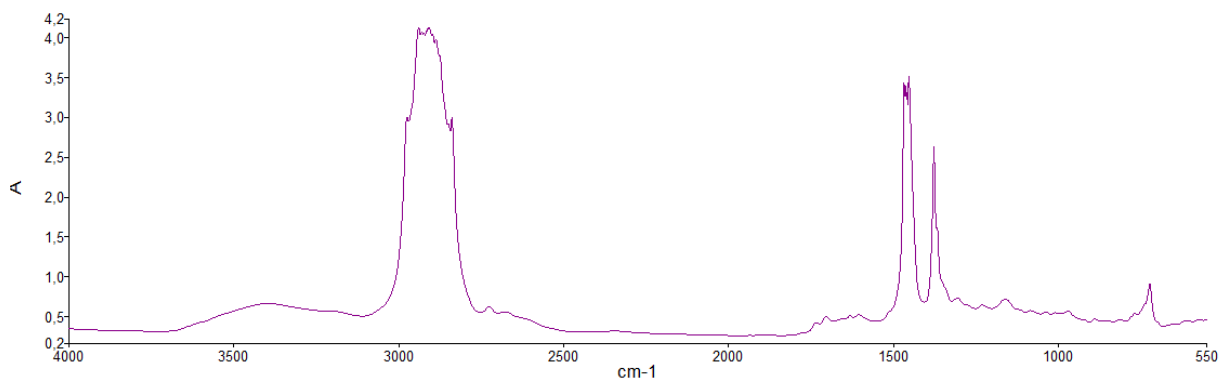


Gráfico 4.1.- Espectro del aceite lubricante usado sin tratamiento

Fuente: K. Morán, 2015

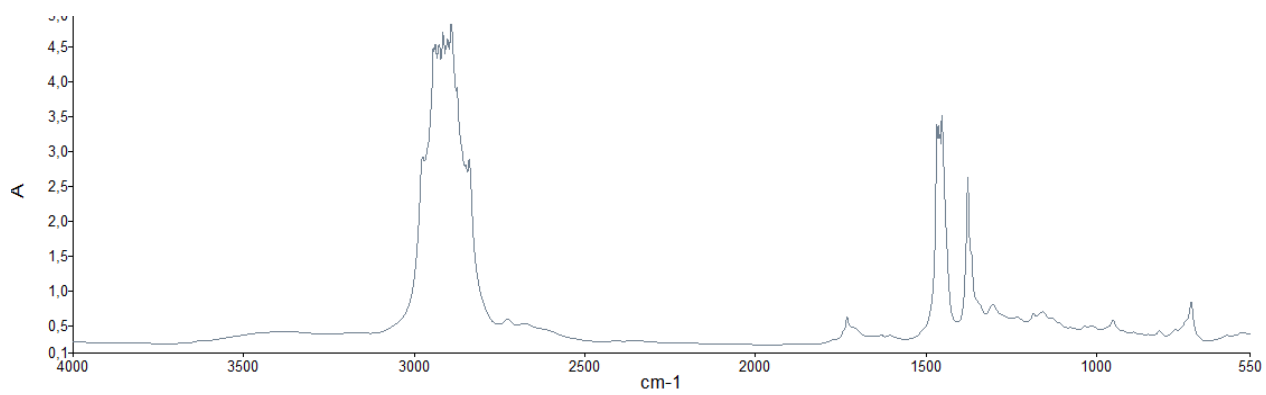


Gráfico 4.2.- Espectro del aceite lubricante tratado con H_2O_2 .

Fuente: K. Morán, 2015

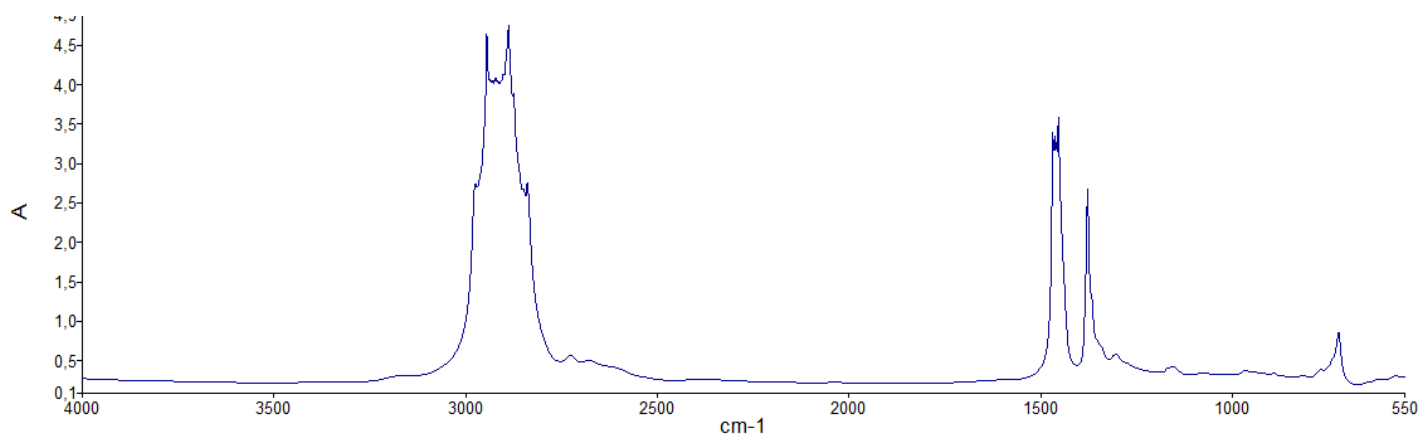


Gráfico 4.3.- Espectro del aceite lubricante usado tratado con H_2O_2 y arcillas activadas

Fuente: K. Morán, 2015

Revisando los espectros de las gráficas I, II, III se puede verificar que:

- En el pico de 3500 donde se determina presencia de agua, en el aceite re-refinado no se presenta pico alguno, por lo que se puede considerar nula la presencia de agua.
- En la longitud de onda de 1900cm^{-1} , el pico de hollín va decayendo a medida que avanza el tratamiento.
- Entre 1900 a 1500 cm^{-1} se puede apreciar los picos de oxidación y nitración, donde se puede ver que en el espectro del aceite con tratamiento de peróxido sin filtración se eleva el pico, lo que nos indica una mayor concentración de compuestos oxidados, que es lo correcto, ya que el peróxido tenía el fin de oxidar y precipitar todos los metales de desgaste que se encontraban en el aceite, y antes de la filtración solo estaban como óxidos.

- Entra las longitudes de onda de 1100 y 550 cm^{-1} , se aprecia el decaimiento total de los compuestos volátiles.

4.7. Rendimiento del proceso

Para la determinación del rendimiento, se consideró realizarla en porcentaje peso, por lo que las muestras antes de pasar por los análisis, se las pesó obteniéndose los datos de la tabla XVIII.

Tabla XVII. Peso finales de las muestras de aceite re-refinado

	Unidades	C1	C2
Peso	gramos	134.8	134.6

Fuente: K. Morán, 2015

Se determinó el rendimiento mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla XVII. Rendimientos para cada muestra

	C1	C2
% Rendimiento	76%	77%

Fuente: K. Morán, 2015

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se ha demostrado que es factible el uso del peróxido de hidrógeno en el tratamiento de re-refinación de aceites lubricantes usados.

La dosis de 15% de peróxido de hidrógeno a 36 horas de sedimentación son las condiciones ideales obtenidas en esta investigación.

El porcentaje de remoción de metales de desgaste es del 95%, que incluye al Cr, Ni, Ag, Cu, V, Al, Pb, Fe, Sn.

Las características del aceite lubricante re-refinado muestran que es un aceite compatible con una base lubricante virgen y se podría usar en la formulación de aceites lubricantes nuevos.

El rendimiento del proceso es del 76% en peso, por lo que es un tratamiento efectivo que podría ser considerado por las entidades del gobierno como el MAE para poner en práctica en el país, para el cambio de la matriz productiva y el ahorro de divisas, reduciendo la importación de materia prima para la formulación de aceites lubricantes nuevos.

El porcentaje de lodos formados en el proceso es del 19% en peso, que es menor al alcanzado en otros procesos como es el del tratamiento con ácido sulfúrico que puede alcanzar porcentajes de 35%. Estos lodos pueden ser usados en la obtención de grasas lubricantes.

Innovación con miras a sustituir el uso del H_2SO_4 , el cual genera siempre riesgos en su manipulación y desde el punto de vista de salud para los trabajadores.

5.2. Recomendaciones

Difundir los resultados obtenidos en esta investigación para que pueda ser considerado como un proceso de regeneración de aceites lubricantes usados.

Promover el uso de esta técnica para la refinación de los aceites lubricantes usados para evitar la quema de los mismos y reducir la emisión de gases contaminantes.

Establecer como tema de investigación el diseño de una planta piloto empleando esta técnica desarrollada y estimar los costos de esta re-refinación a nivel industrial.

La adquisición de un FT-IR para la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas para el estudio de aceites lubricantes y poder realizar otras investigaciones en este campo.

BIBLIOGRAFIA

Referencias

- [1] Ecuador, R. O. (2011). TULSMA. En Libro VI, Titulo V Reglamento para la prevención y Control de la Contaminación por Desechos Peligrosos.
- [2] Ecuador, R. O. (mayo 2011). Acuerdo Ministerial 048. En Coprocesamiento de Desechos Peligrosos en Hornos Cementeros.
- [3] Gobierno del Ecuador, Tratado Unificado de Legislación Secundaria, Medio ambiente, TULSMA, 2003. Obtenida en Junio 2013.
- [4] J. R. Barnes and J. C. Bell, Lubr. Eng., 45, , p 549. 1989
- [5] MARTINEZ, J. y MALLO M, Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos, Fichas temáticas, Tomo I, II. Quito, Ecuador, 2007
- [6] Shell. Used Oil Management: The Cement Kiln Option, A. Separación de aceites de efluentes industriales. España, 2007
- [7] BENAVENTE R, Gonzalo. Aceite Lubricante Usado. Bravo Energy Chile S.A. Boletín N° 2. Junio 1999.
- [8] Albarracín, A.P.: Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz. Medellín, Litocha 2da Ed. 2000. pp. 131-133, pp. 138-139, p. 264.
- [9] Macián, M.V.: Mantenimiento de Motores Diesel. México, Alfaomega. 1ra Ed. 2005.
- [10] Pérez, C.A.: Tecnología de Lubricantes - Tribología La: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento. Quito, Cepe. 1980.

- [11] Recycling of the used automotive lubricating oil by ionizing radiation process” M.A. Scapin, C. Duarte, M.H.O. Sampa, I.M. Sato. Radiation Physics and Chemistry 76 (2007) 1899-1902.
- [12] Margarita Montes Casanova. Re- refinado de aceites usados, 2008.
- [13] Ramírez, J.. Recuperación de aceites lubricantes para automotores a partir de aceites usados y desechados, utilizando procesos físico-químicos. Tesis (Ingeniero químico). Universidad de Antioquia , 1994
- [14] Moya, L., 2009-2010. Desde el aceite lubricante usado hasta su puesta en el mercado tras su regeneración., Master profesional en Ingeniería y gestión ambiental.
- [15] Juan Matias Jones Pawlak Valdivia,. Diseño de un sistema de reciclaje de aceite lubricante usado, Chile, 2007
- [16] Albarracín Pedro, “ Lubricación Industrial y Automotriz Tomo I”, Publicaciones Analíticas, Madrid 1980
- [17] Jiménez Ricardo, Manual de Lubricacion Lubriquem del Norte, México, 1998
- [18] E. Bailey Alton, “Oil and Fat Products”, 1era edición, 1945
- [19] M.A. Scapina, “Recycling of the used automotive lubricating oil by ionizing radiation process”, January 2007
- [20] Abeer M. Shoaib, “Re-refining of Used Lube Oil, II- by Solvent/Clay and Acid/Clay-Percolation Processes”, Dec 2012
- [21] Norris Robert, “Clay contacting process for removing contaminants from waste lubricating oil”, May 1983

Anexos