

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA RECUPERACIÓN DE BASES
LUBRICANTES CONTENIDAS EN LOS ACEITES LUBRICANTES
INDUSTRIALES USADOS**

**JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZA
ANDRES FELIPE MALDONADO RODRIGUEZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA RECUPERACIÓN DE BASES
LUBRICANTES CONTENIDAS EN LOS ACEITES LUBRICANTES
INDUSTRIALES USADOS**

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
Ingeniero químico**

**JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZA
ANDRES FELIPE MALDONADO RODRIGUEZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente de jurados

CLAUDIO ALBERTO MORENO
Jurado

JUAN CAMILO CELY
Jurado

Bogotá, febrero de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMÁN(E)

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de ingeniería

Ing. LEONARDO DE JESUS HERRERA GUTIERREZ

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a mi director de proyecto el Ing. Marco Rodríguez, por ofrecerme su gran apoyo durante el desarrollo del proyecto y su gran interés por él.

A Lubrisol de Colombia y al Ing. Daniel Rodríguez. Por el apoyo financiero y el asesoramiento del proyecto.

Al Ing. Fernando por su seguimiento y guía en este proyecto de grado.

En especial este agradecimiento va dirigido a todos los profesores que me educaron y me transmitieron los conocimientos y valores esenciales para su desarrollo.

A mi familia le agradezco mucho por su apoyo incondicional, a mis padres y hermanos, en especial a mi hermano Jhoan Hernández quien me ayudo en todo lo que necesité para culminar esta etapa.

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional en toda mi carrera universitaria a mi abuela y mi familia por todo su apoyo a la profesora Sandra Liliana mesa por su excelente trabajo como docente de la universidad

A mis hermanas Diana ferro y Mónica ferro por su guía y apoyo para finalizar mi carrera universitaria

Una dedicatoria especial a mi amiga lima Paola Alarcón mora este logro es de los dos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES	22
1.1 ACEITES LUBRICANTES	22
1.2 MANUFACTURA DE ACEITES LUBRICANTES	23
1.3 FORMULACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES	23
1.4 COMPOSICIÓN DE LOS ACEITES LUBRICANTES	26
1.5 CLASIFICACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES	27
1.5.1 CLASIFICACIÓN API	28
1.5.2 CLASIFICACIÓN SAE	28
2. ACEITES LUBRICANTES USADOS	30
2.1 DEGRADACIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE	31
2.2 FACTORES IMPORTANTES EN LA DEGRADACIÓN	32
2.2.1 OXIGENO	32
2.2.2 TEMPERATURA	32
2.2.3 CONTAMINACIÓN	32
2.3 COMPOSICIÓN DE UN ACEITE USADO	34
2.4 SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE ACEITES	35
2.5 DIAGNOSTICO	35
2.5.1 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE	36
2.6 PUNTO DE CHISPA Y PUNTO DE INFLAMACIÓN	37
2.7 DENSIDAD	39
2.8 GRAVEDAD API	41
2.9 ÍNDICE DE VISCOSIDAD	42
2.10 COLOR	46
2.11 CONTENIDO DE METALES DE DESGASTE	51
2.12 TABLAS REFERENCIAS	55
3. DISEÑO Y SELECCIÓN	58
3.1 TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN	58
3.2 PRINCIPALES PROCESOS DE RE-REFINACIÓN	58
3.2.1 PROCESOS TIPO KTI	59
3.2.2 PROCESO TIPO MOHAWK	60
3.2.3 PROCESO PROP	60
3.2.4 PROCESO TIPO IFP	61
3.2.5 TECNOLOGÍA UOP DCH	62
3.2.6 PROCESO DE ÁCIDO-ARCILLA	63
3.2.7 EXTRACCIÓN POR SOLVENTE	64

3.8 TABLA COMPARATIVA	65
3.9 MATRIZ PUGH	69
4. METODOLOGIA DE LA EXPERIMENTACION	73
4.1 METODOLOGIA PROCESO ARSILLA/SOLVENTE	73
4.2 ANALISIS Y RESULTADOS	83
4.3 DE CHISPA Y PUNTO DE INFLAMACIÓN	83
4.4 DENSIDAD	84
4.5 GRAVEDAD API	85
4.6 VISCOSIDAD	86
4.7 ÍNDICE DE VISCOSIDAD	89
4.8 COLOR	91
4.9 ANALISIS DE METALES:	92
4.10 METODOLOGÍA PROCESO ACIDO/ARCILLA	93
4.11 ANÁLISIS Y RESULTADOS	99
4.12 PUNTO DE CHISPA Y PUNTO DE INFLAMACIÓN	99
4.13 DENSIDAD	100
4.14 GRAVEDAD API	101
4.15 VISCOSIDAD	101
4.16 ÍNDICE DE VISCOSIDAD	104
4.17 COLOR	105
4.18 ANALISIS DE METALES	107
5. DISEÑO DE PLANTA PILOTO ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO:	109
.1 DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	110
5.2 DIAGRAMA OPERACIONAL DE PLANTA PILOTO	112
5.3 RECEPCION Y ZONA DE ALMACENAMIENTO DE MATERIALES	113
5.4 ANÁLISIS PREVIOS AL PROCESO	113
5.5 FASE DE EVAPORACIÓN	114
5.6 FASE DE MEZCLADO	115
5.7 SEDIMENTACION	116
5.8 CENTRIFUGADO	119
5.9 DESTILACION	118
6. VIABILIDAD FINANCIERA DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE BASE LUBRICANTE	119
6.1 INVERSION	119
6.2 INVERSIÓN EN EQUIPOS	119
6.3 EVALUACION FINANCIERA INCIDADORES ECONOMICOS	119
6.4 OBTENCION DE MATERIAS PRIMAS EGRESOS	120
6.5 DEPRECIACIÓN DE EQUIPOS	120
6.6 MANTENIMIENTO DE EQUIPOS	121

6.7 COSTOS DE SERVICIOS INDUSTRIALES (ENERGÍA Y AGUA)	122
6.8 SUELDO OPERARIO	123
6.9 INGRESOS	125
6.10 FLUJO DE CAJA NETO	126
6.11 INDICADORES	126
6.11.1 VPN	127
6.11.2 TIR	128
7. CONCLUSIONES	129
8. RECOMENDACIONES	131
BIBLIOGRAFIA	132
ANEXOS	135

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Formulación de aceites lubricantes	24
Tabla 2: composición de aceites vírgenes	25
Tabla 3: categorías de aceites básicos API	26
Tabla 4: Clasificación API motores a gasolina	27
Tabla 5: Clasificación API motores a diésel	27
Tabla 6: Clasificación SAE aceites mono grado	28
Tabla 7: Composición de aceite lubricante usado	34
Tabla 8: Valores de punto de chispa e inflamación de aceites base y aceite Usado	39
Tabla 9: Valores de densidad de bases vírgenes y aceite usado	41
Tabla 10: Clasificación de aceites de acuerdo a gravedad API	42
Tabla 11: Tiempo registrado a 40 °C	45
Tabla 12: Tiempo registrado a 100 °C	45
Tabla 13: Tabla comparativa de viscosidad de bases lubricante y aceite usado	46
Tabla: 14 valores críticos aceite	55
Tabla 15: valores metales de desgaste por espectrometría	55
Tabla 16: propiedades fisicoquímicas de aceites vírgenes	56
Tabla 17: Criterios relevantes para la selección de proceso	69
Tabla 18. Alternativas para sistemas de re-refinación de aceites	70
Tabla 19: Matriz de selección de proceso de re-refinación	71
Tabla 20 tabla comparativa para selección de procesos	76
Tabla 21: Punto de ebullición y precio de solventes	76
Tabla 22: Valores de punto de chispa e inflamación de aceites base y aceite recuperado	84
Tabla 23: Valores de densidad de bases vírgenes y aceite recuperado	85
Tabla 24: Clasificación de aceites de acuerdo a su gravedad API	86
Tabla 25: Tiempo registrado a 40 °C	88
Tabla 26: Tiempo registrado a 100 °C	88
Tabla 27: comparativa de viscosidad de bases lubricante y aceite recuperado	89
Tabla 28: valores L y H para índice de viscosidad	90
Tabla 29: Resultados metales de desgaste por absorción atómica	93
Tabla 30: Valores de punto de chispa e inflamación de aceites base y aceite recuperado	100
Tabla 31: Valores de densidad de bases vírgenes y aceite recuperado	101
Tabla 32: Clasificación de aceites de acuerdo con su gravedad AP	101
Tabla 33: Tiempo registrado a 40 °C	103
Tabla 34: Tiempo registrado a 100 °C	103
Tabla 35: comparativa de viscosidad de bases lubricante y aceite recuperado	104
Tabla 36: valores L y H para índice de viscosidad	104
Tabla 37: Resultados metales de desgaste por absorción atómica acido/arcilla ver anexos	106
Tabla 38: Referentes de diagrama de relaciones para planta piloto.	110

Tabla 39. Maquinaria y equipos necesarios.	119
Tabla 40: precio de materias primas fuente propia	120
Tabla 41: Costo de las materias primas durante los próximos 5 años	120
Tabla 42: depreciación de equipos fuente autores	121
Tabla 43: Costo mantenimiento de equipos.	121
Tabla 44: Consumo de energía anual	122
Tabla 45: Valores de consumo de agua	123
Tabla 46: sueldo mensual y anual de operario	124
Tabla 47: Sueldo del operario próximos 5 años	125
Tabla 48: ingresos por año de la planta piloto	128

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Obtención bases lubricantes	23
Figura 2: Gráfico de viscosidad-temperatura para algunos aceites mono Grados y multigrados	29
Figura 3: Punto de inflamación de la muestra de aceite usado	28
Figura 4: Valores L y H para índice de viscosidad	48
Figura 5: Efecto de diversos ácidos sobre las propiedades del aceite usado	95

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1: Generación de aceite residual según C. Kajdas	30
Imagen 2: Muestra aceite usado	31
Imagen 3: Sistema de recolección de aceite quemado	35
Imagen 4: Muestra aceite usado	36
Imagen 5: Análisis de punto de chispa y de inflamación a aceite usado	37
Imagen 6: Densímetro	40
Imagen 7: Medición de densidad con densímetro	40
Imagen 8: Medición de viscosidad en baño a 40°C	43
Imagen 9: Viscosímetro Cannon – Fenske	44
Imagen 10: Medición de viscosidad a 100°C	44
Imagen 11: Muestra de aceite usado 15 ml	49
Imagen 12: Colorímetro	50
Imagen 13: Colorimetría para aceite usado	50
Imagen 14: Espectrofotómetro por emisión atómica	54
Imagen 15: Proceso acido arcilla	64
Imagen 16: Proceso solvente – arcilla	73
Imagen 17: Recolección de aceite usado	74
Imagen 18: Solubilidad y constante dieléctrica de solventes	75
Imagen 19: Efecto de diferentes mezclas de disolventes sobre el refinado de aceites usados	75
Imagen 20: montaje de filtrado	76
Imagen 21: Filtración de aceite usado	76
Imagen 22: Evaporación atmosférica	77
Imagen 23: Mezcla y agitación de solventes	78
Imagen 24: Mezcla aceite de alimentación / Solvente	78
Imagen 25: Extracción con solvente	79
Imagen 26: Centrifugación de mezcla	79
Imagen 27: Destilación atmosférica para recuperación de solventes	80
Imagen 28: Mezcla bencina de petróleo / aceite extraído	80
Imagen 29: Mezcla con arcilla perform 5000	81
Imagen 30: Extracción y blanqueo con arcilla perform 500	82
Imagen 31: Destilación y recuperación de solvente	82
Imagen 32: Determinación de punto de chispa e inflamación	84
Imagen 33: Densímetro	85
Imagen 34: Viscosímetro Cannon – Fenske	87
Imagen 35: Medición de viscosidad a 40°C y 100°C	88
Imagen 36: Colorímetro orbeco-hellige	91
Imagen 37: Colorimetría para aceite recuperado	92
Imagen 38: Proceso acido / arcilla	94
Imagen 39: Extracción con ácido sulfúrico 98%	96
Imagen 40: Sedimentación y eliminación de lodos ácidos	97

Imagen 41: Filtración con arcilla perform 5000	98
Imagen 42: Determinación de punto de chispa e inflamación	100
Imagen 43: Medición de viscosidad a 40°C y 100°C	102
Imagen 44: Colorimetría para aceite recuperada	105

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1: proceso Tipo kit	60
Diagrama 2: proceso Tipo PROP	61
Diagrama 3: proceso Tipo IFP	62
Diagrama 4: proceso tipo DHC	63
Diagrama 5: Diagrama de bloques de ácido arcilla	109
Diagrama 6: Diagrama de arcilla solvente fuente autores	110
Diagrama 7: Diagrama de relaciones de actividades planta piloto.	111
Diagrama 8: Esquema de distribución de la planta de re-refinación de bases lubricantes	112
Diagrama 9: Diagrama de planta piloto nivel operacional	113

GLOSARIO

ADITIVOS: pequeños porcentajes de diferentes materiales solubles en aceites se agregan éstos, de tal manera que les importan características que no se obtienen por el proceso de refinamiento. A esos materiales se les llama comúnmente aditivos y existen varios tipos, Los aceites usados para lubricar los motores de combustión interna pueden contener uno o más de los diversos tipos de aditivos, dependiendo del diseño de la máquina y de las condiciones de funcionamiento.

ANTI-HERRUMBRE Y ANTICORROSIÓN: la herrumbre es producida por la humedad y la condensación del agua. La corrosión se forma debido a los ácidos orgánicos originados durante la combustión y por los contaminantes del lubricante

ACEITES MONOGRADO: el aceite monogrado es aquel que tiene un solo grado viscosidad y su índice de viscosidad no es muy alto.

ACEITES MULTIGRADO: los aceites multigrado se identifican por tener la letra W (Winter) debido a que están diseñados para trabajar donde los cambios de temperatura son considerables y se caracterizan por tener un alto índice de viscosidad.

BASE LUBRICANTE: las bases lubricantes son uno de los productos en la destilación del crudo y son la principal materia prima para la formulación de aceites lubricantes.

BENTONITA: la bentonita es una arcilla de grano muy fino del tipo de montmorillonita que contiene bases y hierro. Tiene aplicaciones en cerámica y es utilizada como arcilla filtrante gracias a sus características.

COLOR: esta característica se expresa por medio de la luz transmitida la cual se mide en un valor numérico basada en una comparación en serie de colores estándar, Los aceites minerales presentan un color oscuro mientras que los sintéticos un color claro

COMPOSICIÓN HIDROCARBONADA (SÓLO PARA BASES CONVENCIONALES): la composición hidrocarbonada marca las propiedades de la base. Lo deseable es un alto contenido en hidrocarburos saturados (lineales y ramificados) que proporcionan un alto IV. Los aromáticos presentan bajos IV y su volatilidad es mayor que la de los saturados.

CONDENSACIÓN: es el cambio de estado de la materia que se encuentra en forma gaseosa y pasa a estado líquido.

CICLOPARAFINAS: las cicloparafinas son hidrocarburos alicíclicos en los que tres o más átomos de carbono de cada molécula se unen formando una estructura en anillo y cada uno de los átomos de carbono del anillo se unen a dos átomos de hidrógeno o grupos alquilo.

DESTILACIÓN: es un proceso utilizado para separar los componentes de una mezcla a partir de la ebullición selectiva y condensación.

EMULSIBILIDAD: esta es la propiedad de un líquido no soluble en agua para formar una emulsión, se le llama emulsión en este caso a la mezcla de agua y aceite, esta se considera estable si persiste a la acción que la originó durante el reposo y un tiempo esperado, hay factores que la favorecen como la alta viscosidad del aceite, la tensión superficial en el aceite sea baja, presencia de contaminantes, siempre se debe eliminar el agua en estos aceites ya que es su enemigo se desea que formen emulsiones inestables esto se desea especialmente en los aceites para máquinas a la intemperie.

ÍNDICE DE VISCOSIDAD: el índice de viscosidad es la constante física que determina la variación de viscosidad de un aceite lubricante respecto a la temperatura.

LUBRICANTES USADOS: los lubricantes usados son aquellos productos de desecho que quedan después de funciones como lubricación, corte, transferencia de calor en procesos industriales.

LUBRICANTES: un lubricante líquido está compuesto por un aceite base, más un porcentaje de aditivo. En la práctica la cantidad de aceite que posee el lubricante oscila entre el 24 y el 95%, mientras que el aditivo es el complemento del cien por ciento, es decir varía entre el 5 al 20%.

MONTMORILLONITA: la montmorillonita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas.

MOLECULAS SATURADAS: Son cadenas de átomos de carbono unidos por enlaces sencillos y en donde los electrones restantes están unidos a hidrogeno como los alcanos.

PUNTO DE INFLAMACIÓN: esta propiedad es la que nos indica cuando los vapores generados por los aceites inflaman por la proximidad de una llama. Esto puede ocurrir en ambientes de altas temperaturas donde el calor puede generar más vapores de lo normal

PUNTO DE CHISPA: el punto de chispa es la temperatura a la que un líquido combustible debe ser calentado para emitir suficientes vapores y formar

momentáneamente una mezcla inflamable con el aire, cuando una pequeña flama es aplicada bajo condiciones especificadas.

PARAFINAS: el nombre común de un grupo de hidrocarburos alcanos de fórmula general C_nH_{2n+2} , donde n es el número de átomos de carbono.

SOLVENTE: sustancia química en la cual se diluye un soluto formando una solución y se encuentra en una mayor proporción que el soluto.

VISCOSIDAD: se conoce como la resistencia a fluir de los líquidos, esta nos indica que tanto puede fluir un aceite a una temperatura dada, se debe tener en cuenta que estos se vuelven menos viscosos al aumentar la temperatura y más viscosos a baja temperatura.

VISCOSIDAD CINEMÁTICA: la viscosidad cinemática se define como la resistencia a fluir de un fluido bajo la acción de la gravedad. Se puede definir también como el tiempo requerido para que un fluido definido por acción de la gravedad fluya a través de un capilar, junto a la viscosidad aparente esta no depende del fluido si no las condiciones ambientales que se ve afectado el fluido.

RESUMEN

Para llevar a cabo la realización de este proyecto se realizó la evaluación del proceso para la recuperación de bases lubricantes y esto se realizó en los laboratorios de la Empresa Lubrisol de Colombia Ltda. Por lo tanto, para dar comienzo se realizó la determinación de propiedades físicas y químicas a la muestra de aceite usado de acuerdo a la norma NTC 3382 las cuales son: viscosidad a 40°C, viscosidad a 100°C, densidad, gravedad API, punto de chispa, punto de inflamación, índice de viscosidad, color, contenido de metales de desgaste.

Posteriormente se evaluó el proceso más adecuado para la recuperación de la base lubricante a través de una investigación detallada de los procesos existentes para la recuperación de bases encontrados en la literatura y en las bases de datos como knovel, scince direct, one petro entre otras, a partir de esto se realizó una matriz pugh de los procesos encontrados y se tomaron dos de acuerdo a los criterios seleccionados como costo, riesgos, materia prima, para llevar a cabo el proceso seleccionado a nivel experimental en el laboratorio de la empresa soporte.

Luego de realizar el proceso experimental se determinaron las propiedades físicas y químicas de la base recuperada para hacer una comparación entre los resultados de las propiedades determinadas al aceite usado y las de una base lubricante virgen.

Se buscaron los parámetros de operación para llevar a cabo el proceso en una planta piloto y por medio de la investigación de los procesos usados para la recuperación de bases, se realizó el diagrama PFD básico correspondiente a los procesos seleccionados, Por último, se determinó la viabilidad financiera del proceso para la recuperación de bases lubricantes mediante indicadores financieros.

Los procesos ácido/arcilla y solvente/arcilla resultaron ser procesos eficaces para la remoción de lodos y para remoción de metales de desgaste, sin embargo, el proceso ácido/arcilla resulta ser un proceso peligroso debido al manejo de ácido sulfúrico además de ser un proceso que genera una alta contaminación debido a los lodos ácidos de desecho y el color obtenido del aceite recuperado no es aceptable ya que es demasiado oscuro. El proceso solvente/arcilla resalto al obtener un color de aceite mucho más aceptable al ser amarillo además es un proceso ambientalmente responsable debido a que los solventes usados pueden ser recuperados y no son tan peligrosos los lodos de desecho ya que pueden ser tratados, a partir de este proceso se logró recuperar un 75% de base lubricante mientras que por el proceso de ácido se recuperó un 70% de base lubricante.

INTRODUCCIÓN

Las bases lubricantes son uno de los componentes más valorados en la destilación del crudo, ya que son esenciales para la producción de aceites lubricantes, los cuales se necesitan para el mantenimiento y lubricación de máquinas industriales. En Colombia para el 2016 se tuvo un consumo de 2'770.708 gal/mes y el 13% (360.192 gal/mes)¹ de esta cantidad la aportan diferentes empresas colombianas. Sin embargo, para abastecer el consumo total de aceites lubricantes se debe importar otra cantidad, de países como Estados Unidos, Venezuela entre otros. Según Emerson Salazar² consultor de mercadeo de lubricantes industriales de Exxon Mobil Colombia, el consumo para los próximos años está asociado al comportamiento de los diferentes sectores de la economía, como la minería, la industria automotriz y la manufactura en general.

El aceite lubricante usado es el desecho que queda después de aplicaciones en lubricación, corte, transferencia de calor, energía hidráulica entre otras y durante su uso este puede mezclarse con limaduras de metales debido a la erosión de las máquinas, impurezas, agua o productos químicos, o gracias a la degradación de los aditivos del aceite³. Los aditivos desgastados y el hollín contenidos en el aceite usado, reducen de manera significativa la calidad del aceite.

El problema principal tiene que ver con la eliminación inadecuada de los aceites lubricantes usados ya que estos son extraídos y desechados por incineración o guardados en depósitos. Estos aceites representan un producto altamente tóxico, según, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC), ha determinado que es posible que ciertos aceites combustibles (la fracción más pesada) produzcan cáncer en seres humanos⁴ además de ser sustancia peligrosa y contaminante para los suelos y agua, puesto que por cada litro de aceite se contaminan al menos 25.000 litros de agua gracias al contenido de componentes como, azufre, cloro, níquel, plomo, cadmio entre otros agentes que aceleran la contaminación de agua, suelos y aire⁵.

Por lo tanto, existe en la actualidad varias alternativas para el aprovechamiento de los aceites usados y es a través de su recuperación o re-refinación para extraer la base lubricante, que sirve en la formulación de nuevos aceites. Los principales

1 Serna Marilyn, Barrera Isabel, 2017 Trabajo de grado "Global oil Aceite lubricante para vehículos y uso industrial" Bogotá, Colombia.

2 Revista dinero noticias de economía [en línea] (2014) <https://www.dinero.com/especiales-comerciales/articulo/lubricantes-industriales-colombia/192490>

3 H. Bridjanian, M. Sattarin, 2006," Modern Recovery Methods In Used Oil Re-Refining" Research Institute of Petroleum Industry, Iran

4 Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR) [en línea] "https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts75.html "

5 H. Bridjanian, M. Sattarin, (2006)" Modern Recovery Methods In Used Oil Re-Refining" Research Institute of Petroleum Industry

procesos de re-refinación mencionados por Avilino Sequeira Jr en el apartado 10 de su libro "Lubricant base oil and wax processing"⁶ son:

Por lo tanto, existe en la actualidad varias alternativas para el aprovechamiento de los aceites usados y es a través de su recuperación o re-refinación para extraer la base lubricante, que sirve en la formulación de nuevos aceites. Los principales procesos de re-refinación mencionados por Avilino Sequeira Jr en el apartado 10 de su libro "Lubricant base oil and wax processing"⁷ son:

- Proceso de ácido-arcilla
- Proceso tipo IFP
- Proceso tipo KTI
- Proceso de Mohawk
- Proceso Phillips de re-refinación de petróleo (PROP)
- Proceso BETC
- Proceso UOP DCH
- Proceso de gasificación Texaco

A partir de estos procesos se genera la oportunidad de la recuperación de bases lubricantes para la formulación de nuevos aceites industriales de esta forma se logra disminuir el impacto ambiental generado por la mala disposición de los aceites usados o aceites de desecho y se les da un nuevo ciclo a los aceites

6 Sequeira Jr, Avilino, (1994) "Lubricant base oil and wax processing" New York, Estados Unidos

7 Sequeira Jr, Avilino, (1994) "Lubricant base oil and wax processing" New York, Estados Unidos
IARC de sus siglas Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la recuperación del base lubricante contenido en los aceites industriales usados, para la empresa Lubrisol de Colombia Ltda.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar las propiedades físicas y químicas de los aceites lubricantes usados suministrados por la empresa soporte.
2. Seleccionar el proceso de recuperación de bases lubricantes por medio de un desarrollo experimental.
3. Establecer los requerimientos técnicos del proceso de recuperación de la base lubricante a nivel de planta piloto.
4. Realizar la viabilidad financiera del proceso de recuperación.

1. GENERALIDADES

Durante este capítulo se realiza la introducción a los aceites lubricantes, se describen procesos de manufactura, composición de bases lubricantes y su clasificación. También se enfoca en los aceites usados, su composición y recolección, se describen los factores más importantes en su degradación y se presentan los problemas ambientales generados por la mala disposición de los aceites usados.

1.1 ACEITES LUBRICANTES

Los aceites lubricantes son aquellos productos petroquímicos que están compuestos principalmente por bases lubricantes, las cuales, se obtienen a partir de diversos procesos de refinación, que incluyen tanto la refinación del petróleo crudo como la refinación de los aceites usados⁸ y estas componen de un 80 a 95 % del aceite lubricante. El otro componente de los aceites son los aditivos, los cuales son productos que le agregan propiedades específicas a los aceites de acuerdo al tipo de trabajo al que se vayan a someter, tales como propiedades antidesgaste, detergente, modificador de viscosidad entre otras. La función principal de los lubricantes es reducir la fricción entre dos superficies y evitar el desgaste de las piezas, para extender los tiempos de ejecución y de vida de estas⁹, también los aceites lubricantes son usados para la industria metalmecánica en funciones de corte debido a que evita que la pieza metálica sufra fracturas por las altas temperaturas, son utilizados en procesos de transferencia de calor en donde se necesita mantener temperaturas altas.

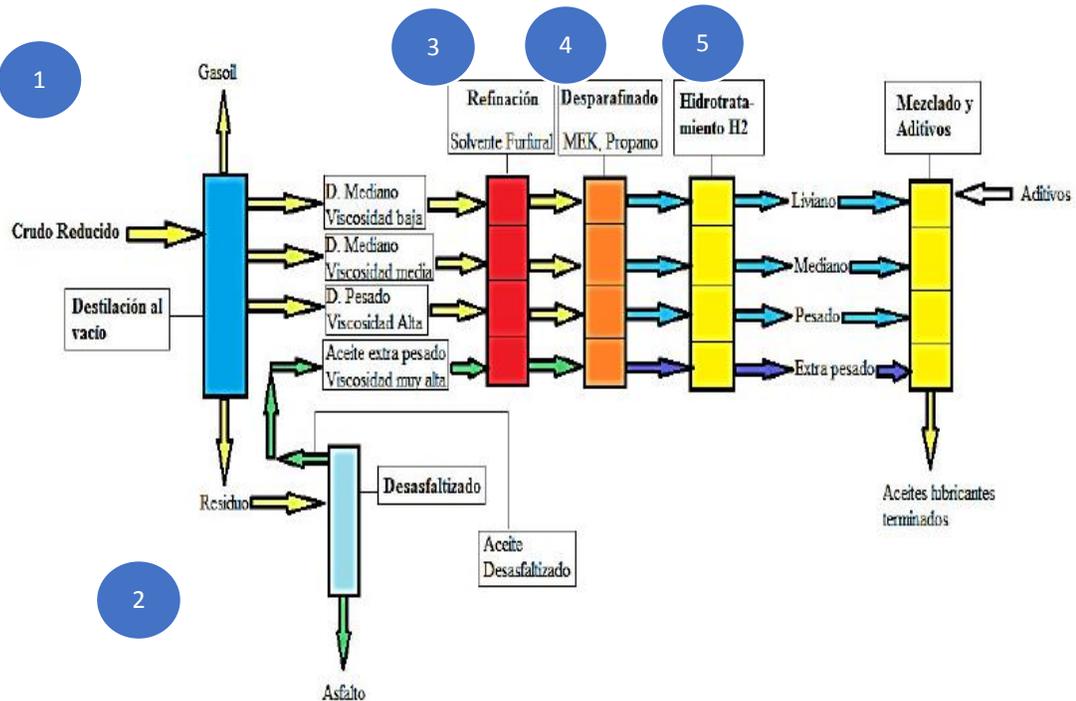
1.2 MANUFACTURA DE ACEITES LUBRICANTES

El proceso para la obtención de bases lubricantes consiste en 5 pasos básicos que se pueden apreciar en la figura 1 a continuación:

8 Rand, Salvatore J (2010). "Significance of Tests for Petroleum Products (8th Edition)"

9 Mang, Theo; Dresel, Wilfried (2017) "Lubricants and Lubrication, 2 Volume Set (3rd Edition)"

Figura 1. Destilación de crudo para la obtención de bases lubricantes



Fuente: TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

- 1) Destilación
 - 2) Des asfaltado
 - 3) Refinamiento con solvente o hidrógeno
 - 4) Tratamiento solvente o des parafinado catalítico
 - 5) Filtración por arcilla para mejora de color la estabilidad y la calidad de *las bases lubricantes*¹⁰, estos pasos
- Luego del proceso de refinación la base obtenida es usada para producir lubricantes de alto grado como:

Aceites de transmisión
 Aceites hidráulicos
 Aceites industriales
 Aceites para motor
 Grasas

¹⁰ TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

Aceites especiales
Aceites para engranajes

1.3 FORMULACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES

La formulación de aceites lubricantes se realiza por medio de la adición de aditivos a las bases obtenidas en los procesos de refinación ya mencionados. Estos aditivos le aportan o mejoran propiedades específicas a los aceites, mejorando su índice de viscosidad, también le agregan propiedades antioxidantes o Anti-herrumbre a los aceites que le ayudan a proteger el deterioro del aceite, otros aditivos comúnmente usados en la formulación de aceites son los detergentes que ayudan a la limpieza de la sección donde se usa el aceite ya que evita que se depositen partículas que causan ensuciamiento tanto en las piezas como en el aceite.¹¹ En la tabla 1 se observa los aditivos más comunes usados en la industria para la formulación de aceites lubricantes

Tabla 1 Formulación de aceites lubricantes

FORMULACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES	
ACEITE BASE	80-95%
ADITIVOS	5-20%
TIPO DE ADITIVO	%
DISPERSANTE	(40-50)
DETERGENTE	(15-20)
ACEITE DILUYENTE	(10-20)
ANTIDESGASTE	(8-12)
INHIBIDOR DE CENIZAS	(5-15)
MODIFICADOR DE FRICCIÓN	(1-2)
MODIFICADOR DE VISCOSIDAD	(0-20)
REDUCTOR DE PUNTO DE ESCURRIEMENTO	(0-1)

Fuente: TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

11 Torres Cobos, Pablo Andrés, (2014) "Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador

Como se había mencionado los aceites lubricantes están compuestos por una base lubricante, la cual puede ser mineral, sintética o vegetal siendo la base mineral la de mayor uso en la producción de aceites¹².

Los aceites minerales son una mezcla de hidrocarburos diferentes los cuales son sometidos a un proceso de refinación para obtener una base con la calidad necesaria y puede ser clasificado generalmente como naftenico o parafínico.

Las bases sintéticas son fabricadas por procesos diferentes a la refinación para desarrollar funciones específicas, son ideales para trabajo en condiciones extremas de temperatura.

Los aceites vírgenes son todos aquellos aceites que no han sido sometidos a un proceso de re-refinación es decir que no han sido usados en la industria y contienen cantidades considerables de carbono e hidrógeno, pequeñas cantidades de azufre, oxígeno, nitrógeno y sales inorgánicas en cantidades muy pequeñas. En la tabla 2 se observan los porcentajes que componen el aceite.

Tabla 2 Composición de aceites

COMPONENTE	%
CARBONO	(83-87)
AZUFRE	(0-3)
OXÍGENO	(0-0,5)
HIDRÓGENO	(11-14)
NITRÓGENO	(0-1)
METALES	(0-0,02)

Fuente: TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

Los principales tipos de hidrocarburos presentes en los aceites consisten en:

12 TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en liena]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

- Parafinas normales
- Parafinas ramificadas (iso-parafinas)
- Ciclo parafinas (naftenos)

Casi todos los lubricantes utilizados hoy en día empezaron como aceite base y estos son clasificados por API en cinco grupos de acuerdo a su pureza o características. En la tabla 3 se expone las categorías de aceites bases según American Petroleum Institute (API)¹³.

Tabla 3. categorías de aceites básicos API

	Categoría	Proceso	Azufre (%)		Moléculas saturadas (%)	índice de viscosidad
Mineral Sintético	Grupo I	Ref. con solvente	> 0,03	y/o	< 90	80 a 120
	Grupo II	Hidrotratado	< 0,03	Y	> 90	80 a 120
	Grupo III	Hidrotratado	> 0,03	Y	> 90	> 120
	Grupo IV	PAO – Polialfaoleina				
	Grupo V	todos los aceites no incluidos en grupos I, II, III, IV				

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Base de datos institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.api.org/>

1.3 CLASIFICACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES

En 1.970 el Instituto Americano del Petróleo en colaboración con la SAE (Society of Automotive Engineers) y la ASTM (American Society for Testing of Materials), se creó la actual clasificación de aceites a los que se han realizado, numerosos ensayos relacionados con el uso real y diario. Este sistema permite a los usuarios seleccionar fácilmente el aceite correcto para su aplicación y comparar rápidamente los productos ofrecidos por las petroleras. Es muy utilizada actualmente por todos los fabricantes de aceites lubricantes y de vehículos, por lo que aparece reflejada en todos los envases de aceites junto con la clasificación SAE.¹⁴

1.4.1 Clasificación API. El Instituto Americano del Petróleo (API) es la única asociación comercial nacional que representa todas las facetas de la industria del gas natural y el petróleo,¹⁵ Este instituto contacta con los fabricantes de motores y vehículos para evaluar el rendimiento de los aceites existentes en el uso cotidiano, y para predecir los requerimientos futuros.

El Instituto Americano del Petróleo establece que existen 2 fracciones de crudo que caen dentro de intervalos de ebullición de aceite base típica. De ellos se consideran

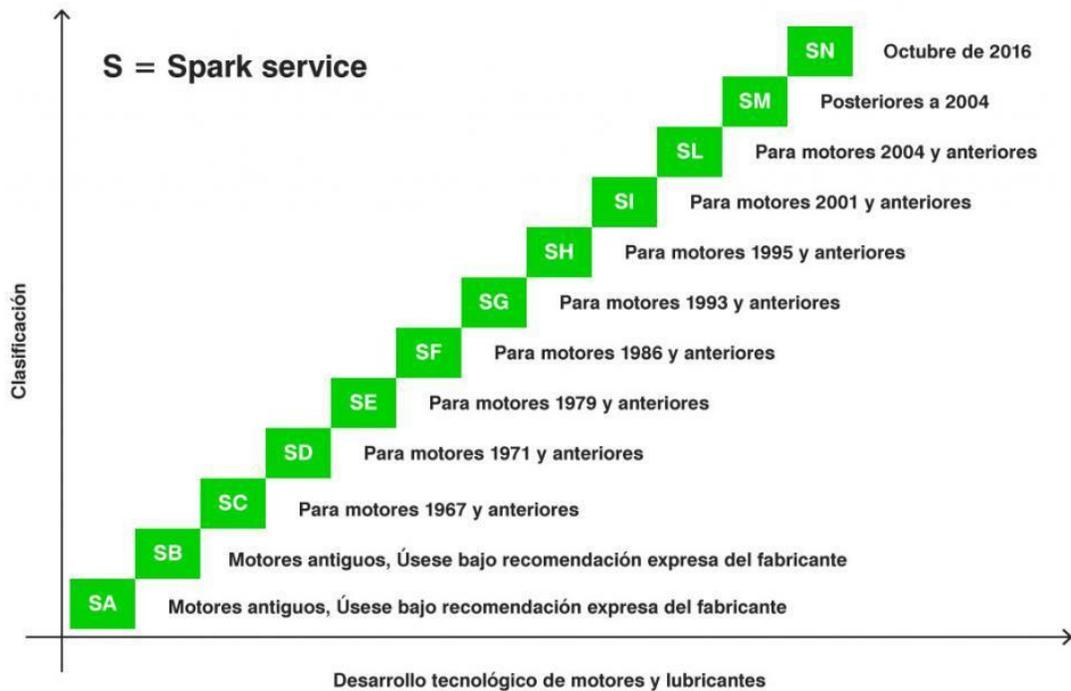
¹³ API de sus siglas “American Petroleum Institute”

¹⁴ American Petroleum Institute, página web “<https://www.api.org/>”

¹⁵ American Petroleum Institute, página web “<https://www.api.org/>”

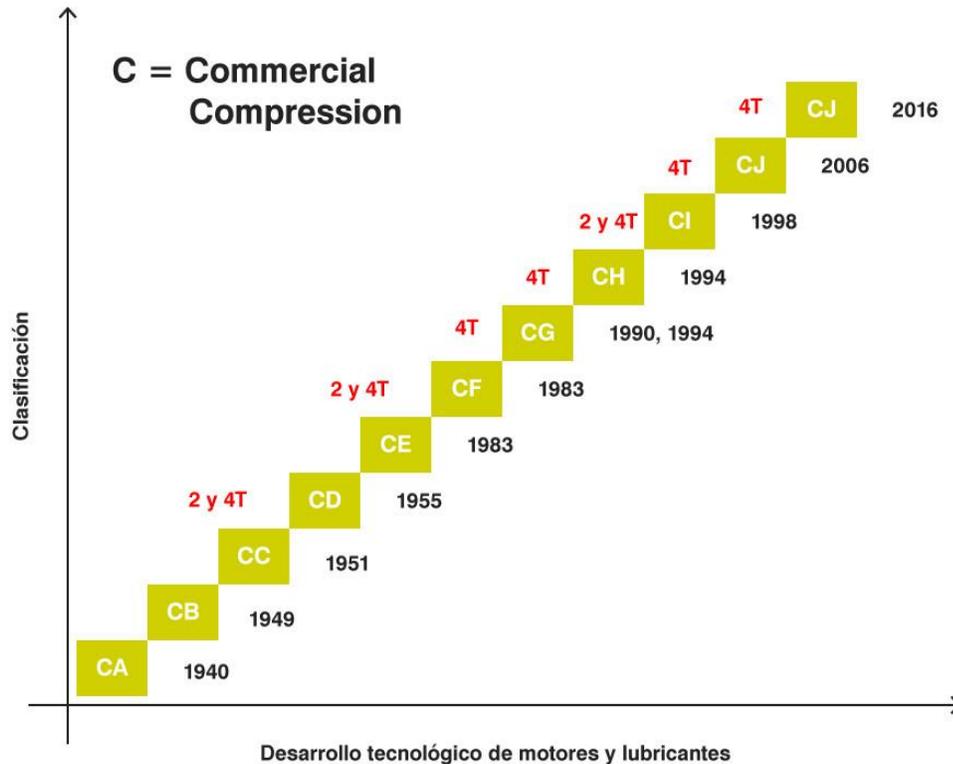
naftenico si tienen gravedades API < 33 para un intervalo de ebullición entre 250 y 275 °C y < 20 para un intervalo de ebullición desde 275 hasta 300 C a 1 atm. Los aceites parafínicos para los mismos intervalos de ebullición proporcionan las gravedades API > 40 y > 30, respectivamente. En la tabla 4 y tabla 5 se observa la clasificación API para aceites de motor a gasolina y aceites de motor diésel respectivamente.

Grafica 4 Clasificación API motores a gasolina



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Base de datos institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.api.org/>

Grafica .5 Clasificación API motores a diésel



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Base de datos institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.api.org/>

1.4.2 clasificación sae. por otra parte, el sistema de clasificación de viscosidad SAE clasifica los aceites según la viscosidad a baja temperatura que es un indicador de la capacidad de arranque en climas fríos. Las mediciones de viscosidad a 100 °C están relacionadas con la temperatura de funcionamiento normal del motor 100 °C. Los aceites sin un sufijo "W" se denominan "aceites monogrado", ya que solo cumplen con un grado SAE y están diseñados para trabajar a una temperatura específica o en un rango muy cerrado de temperatura. En el mercado se pueden encontrar aceites monogrado SAE 10, SAE 20, SAE 30 y SAE 40. La tabla 6 relaciona las viscosidades a 25 y 100 °C de los aceites monogrado medidos en cSt (centistokes).

Tabla 6 Clasificación SAE aceites monogrado

	rango de viscosidad a 25° C en cSt	rango de viscosidad a 100° C en cSt
SAE 10	60 - 90	5,75 - 4,19
SAE 20	90 – 180	9,65 - 5,75
SAE 30	180 – 280	13 - 9, 65
SAE 40	280 - 450	16,83 – 13

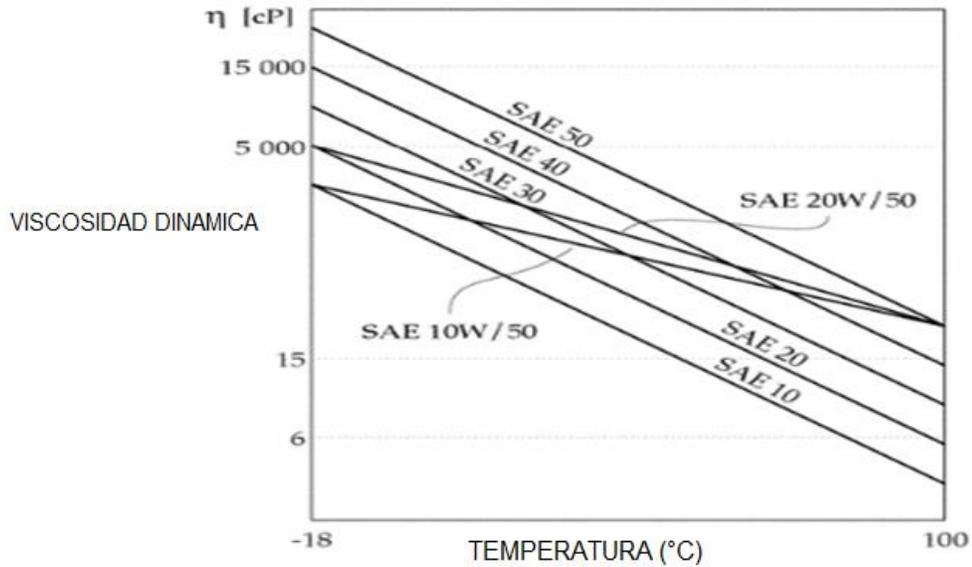
Fuente: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

Los aceites con un sufijo "W", que significa "Winter", tienen buenas capacidades de arranque en frío. Para climas en los que la temperatura desciende regularmente por debajo de cero grados centígrados.

Los aceites del motor y la transmisión se formulan de tal manera que brindan una baja resistencia al inicio, es decir, su viscosidad es baja a la temperatura inicial. Tales aceites tienen un índice de viscosidad más alto, que se logra al agregar mejoradores de viscosidad (aditivos poliméricos) al aceite y se denominan "aceites multigrado". Por ejemplo, SAE 20W / 50 tiene una viscosidad de SAE 20 a -18 ° C y viscosidad de SAE 50 a 100 ° C. En la figura 2 se puede observar una gráfica donde se relaciona viscosidad dinámica con respecto al cambio de temperatura de los aceites monogrado y multigrado.¹⁶

16: TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

Figura 2 Gráfico de viscosidad-temperatura para algunos aceites monogrados y multigrados



I
institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019.Disponible en <https://www.sae.org/>

Sin embargo, el problema asociado con el uso de aceites multigrado es que generalmente se adelgazan, es decir, su viscosidad disminuye significativamente con el aumento de las tasas de esfuerzo cortante, debido a los aditivos poliméricos.

La caída en la viscosidad puede ser significativa y puede ocurrir debido a la división de las moléculas en unidades más pequeñas, la pérdida de viscosidad afecta el grosor de la película lubricante y, posteriormente, afecta el rendimiento de la máquina.¹⁷

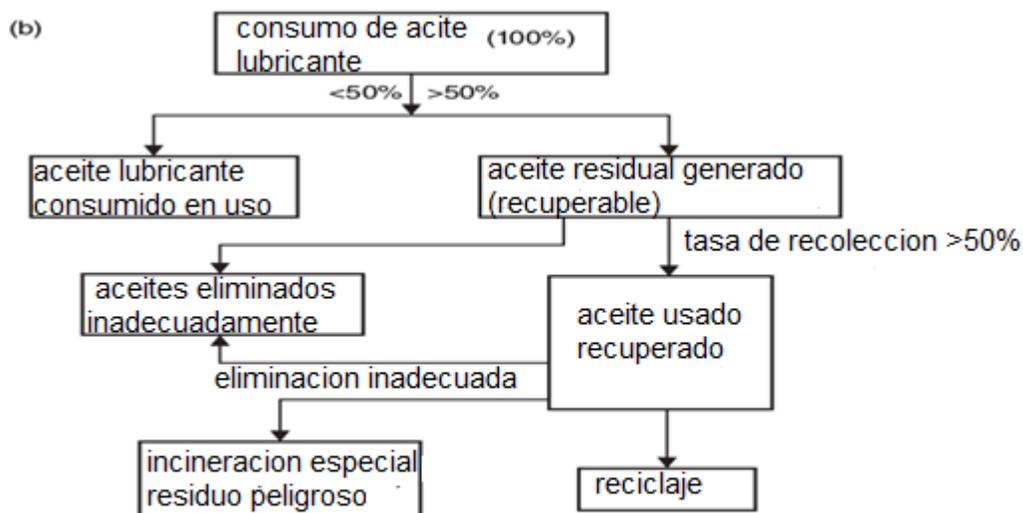
17: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019.Disponible en <https://www.sae.org/>

2. ACEITES LUBRICANTES USADOS

Los aceites usados son aceites lubricantes o aceites especiales que se han vuelto inhábiles para su uso previsto. Sin embargo en la actualidad estos aceites se pueden reciclar mediante procesos de recuperación o refinación para obtener materiales útiles que se utilizan favorablemente en la industria, la mayor parte de estos aceites se reciclan como combustibles después de eliminar las impurezas insolubles lo que nos lleva a problemas de contaminación de acuerdo a las investigaciones realizadas por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM en el año 2013 para productos petroquímicos tales como: aceites base, aceites lubricantes, aceites usados etc..

Algunos aceites también se refinan y se usan como aceites base para la formulación de nuevos lubricantes y la calidad de estas bases tiene características y propiedades similares al de un aceite virgen. En la imagen 1 muestra lo que sucede con los aceites en Europa en donde solo el 50% es re-refinado y el otro 50% es re-utilizado o incinerado generando grandes cantidades de contaminación.

Imagen 1 Generación de aceite residual según C. Kajdas



Fuente: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

Los aceites se oxidan al ser sometidos a altas temperaturas o al estar en contacto con el aire, gracias a esto se da formación de ácidos y compuestos de oxidación que pueden acelerar la reacción de oxidación del aceite, dando lugar a problemas operacionales como: bloqueo de válvulas, sulfatación de circuitos y provocar un mal funcionamiento de los equipos. Además, se debe tener en cuenta que al aumentar la temperatura del aceite también acelera la reacción de oxidación. Adicionalmente

muchos materiales actúan como catalizadores de la reacción. El cobre, precedente del desgaste de rodamientos, tuberías y refrigerantes; compuestos ferrosos formados por la reacción del agua y de algunos compuestos oxidados del aceite; materias extrañas suspendidas en el aceite y otros productos de oxidación, son catalizadores muy activos del proceso de oxidación¹⁸. En la imagen 2 podemos se muestra una muestra de aceite usado o quemado de la empresa Lubrisol de Colombia Ltda.

Imagen 2 Muestra de aceite usado (100 ml) recolectado de barriles de aceite quemado de la empresa Lubrisol de Colombia Ltda



Fuente: elaboración propia

2.1 DEGRADACIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE

Todos los aceites lubricantes ya sean minerales, sintéticos o semi sintéticos tiene una vida útil determinada, esto quiere decir que pierden propiedades importantes para la lubricación por lo tanto no son apropiados para su función y deben ser removidos y remplazados por uno nuevo, esta degradación empieza desde el momento que el contenedor es abierto por primera vez, ya que justo en ese instante existe un contacto directo con el cuerpo de aire circundante, quien es responsable de la oxidación del aceite haciendo que este tome un color más oscuro, aunque no

18 TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

sea en proporciones significativas. Sin embargo, el aceite no pierde propiedades en lubricación¹⁹.

Por otra parte, cuando el aceite lubricante entra en contacto con las piezas a lubricar puede mezclarse con residuos del aceite usado anterior, lo que genera contaminación. Además, los aditivos cumplen con su función de disolver los lodos provenientes del aceite gastado lo que aumenta el grado de deterioro. Cabe resaltar que existen residuos y de acuerdo a Pablo Torres en su tesis "*Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja*" asegura que las *partículas* metálicas como limaduras de hierro, cobre y plomo que se desprenden de las piezas gracias a la fricción que hay entre estas generan un nivel mayor de desgaste en el aceite.

El hollín es el resultado de fricción entre piezas metálicas y el desgaste del aceite, este es el responsable de aumentar la contaminación ambiental, debido a que la combustión de los hidrocarburos es incompleta. Los tamaños de partícula varían entre 0.5 a 1.0 micras y generalmente se encuentran muy dispersas, por lo cual, la filtración es compleja. Existe una reacción de oxidación que provoca la descomposición de los aceites de motor. Esta reacción en los hidrocarburos en fase líquida suele deberse a una reacción de radicales en cadena. La reacción no se inicia hasta pasado un cierto periodo de inducción, el cual corresponde al intervalo necesario para la formación de los peróxidos (que actúan como catalizadores), sin embargo, dado que las altas temperaturas aceleran esta reacción, en el motor la oxidación se produce de forma muy rápida, en particular por la elevada temperatura que alcanzan las piezas próximas a la cámara de combustión.²⁰

2.2 FACTORES IMPORTANTES EN LA DEGRADACIÓN

La degradación de los lubricantes ya sea sintéticos, minerales o semisintéticos afecta directamente a la operatividad de todo tipo de maquinaria industrial. Si no se toman las medidas adecuadas para evitar que este deterioro dañe componentes críticos o la máquina en su conjunto, esto puede implicar elevados costes por paradas no planificadas e incluso catastróficas²¹.

La degradación de los aceites lubricantes está ligada al entorno y al trabajo que este realiza. Algunas de las causas principales es la oxidación debido a que es el

19 SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

20 TORRES Cobos, Pablo Andrés, *Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja*, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de Ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

21 SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

fenómeno más habitual gracias a la presencia de oxígeno en el ambiente circundante y la nitración o la sulfatación dependiendo del elemento químico que lo genere. La degradación no se produce de forma repentina, sino de manera gradual debido a la progresiva generación de ácidos carboxílicos producto de la degradación. Dicho de otra forma, aumenta la acidez del lubricante²².

No obstante, para controlar la evolución del aceite lubricante, existen una serie de parámetros de laboratorio que indican con su variación el estado del fluido y se utilizan de manera clásica para establecer los períodos de cambio.²³

De acuerdo con la destacada empresa inglesa Kew Engineering ²⁴los principales factores de degradación de un aceite lubricante son:

2.2.1 Oxígeno. El oxígeno es considerado el principal causante de la oxidación de las bases lubricantes causando sedimentos y lodos, además su presencia afecta el desgaste de los aditivos.

2.2.2 Temperatura. La temperatura afecta directamente en la degradación del aceite lubricante debido a que cuando el aceite es sometido a elevadas temperaturas en largos periodos la reacción de degradación se acelera por lo tanto mantenerla a bajas temperaturas prolonga la vida útil del aceite disminuyendo la velocidad de degradación.

2.2.3 Contaminación. Las partículas metálicas o limaduras metálicas de las piezas, son uno de los factores de deterioro del aceite porque estas aceleran la tasa de degradación, también contacto con agua, polvo u otros agentes externos, son catalizadores de la degradación del aceite.

2.3 COMPOSICIÓN DE UN ACEITE USADO

La composición de los aceites usados depende directamente con los factores de desgaste mencionados anteriormente en especial el contacto con agentes externo como partículas metálicas y polvo. En la tabla 7 se observa la composición de un aceite usado según EPA (Environmental Protection Agency).

22 *Att Development* (2017) "Factores que influyen en la degradación de lubricantes sintéticos y minerales"

23 *Att Development* (2017) "Factores que influyen en la degradación de lubricantes sintéticos y minerales" adaptado de "Kew Engineering, Oil Aging and Degradation".

24 *Att Development* (2017) "Factores que influyen en la degradación de lubricantes sintéticos y minerales" adaptado de "Kew Engineering, Oil Aging and Degradation".

Tabla 7 Composición de aceite lubricante usado

Contaminantes	Concentración en ppm		
	Aceites Lubricantes		Aceite Industrial
	Motor Diésel	Motor Gasolina	
Cadmio	1.1	1.7	6.1
Cromo	2.0	9.7	36.8
Plomo	29.0	2.2	217.7
Zinc	332.0	951.0	373.3
Cloro total	3600.0	3600.0	6100.0
PCB's	20.7	20.7	957.2

fuente: TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en: <https://www.bibliotecasdeecuador.com/Record/ir-37000-146>

A partir de la tabla se puede observar que, los aceites automotrices poseen mucha mayor cantidad de plomo y de zinc que los aceites de procedencia industrial, Sin embargo, los aceites usados industriales contienen mayor cantidad de cadmio, cromo, cloro y PCB's (policlorobifenilos o bifenilos policlorados) que tienen una alta toxicidad.

2.4 SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE ACEITES

La eliminación inadecuada de los aceites lubricantes usados es una problemática mundial ya que estos son extraídos y desechados por incineración o guardados en depósitos. Estos aceites representan un producto altamente toxico, según, El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer IARC, ha determinado que es posible que ciertos aceites combustibles (la fracción más pesada) produzcan cáncer en seres humanos²⁵ además de ser sustancia peligrosa y contaminante para los suelos y cuerpos hídricos, puesto que por cada litro de aceite se contaminan al menos 25.000 litros de agua gracias al contenido de componentes como, azufre cloro, níquel, plomo, cadmio entre otros agentes que aceleran la contaminación de agua, suelos y aire.

Debido a esto la empresa Lubrisol de Colombia implementa un sistema de recolección de aceites quemados los cuales son todos los aceites residuo de los procesos de manufactura que están desgastados y no son aptos para su uso, para ello se disponen barriles de 208 litros y se estiban para su posterior proceso de

25 Agencia para sustancias toxicas y el registro de enfermedades (ATSDR) [en línea] Disponible en: "https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts75.html "

análisis. En La imagen 3 se encuentran los barriles de aceite quemado en la empresa Lubrisol de Colombia Ltda.

Imagen 3. Sistema para recolección de aceites usados en barriles de 208 litros



Fuente.elaboración propia

2.5 DIAGNOSTICO

En este apartado se van a describir los métodos de caracterización de los aceites lubricantes según la norma ASTM INTERNATIONAL Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils los cuales nos darán una base necesaria para saber dónde iniciar el punto de partida en cuanto a las características físicas y químicas que queremos tener en nuestro aceite refinado, en comparación al aceite usado y motor, desde color viscosidad y otras que se expondrán a continuación con cada proceso que se realizó, con su debida norma e importancia en el producto final.

2.5.1 métodos de caracterización del aceite. Los aceites de base se fabrican de varios procesos de refino, incluyendo tanto la refinación de petróleo crudo y de la re-refinado de aceites usados. Propiedades del aceite varían en función de la materia prima, proceso de refinación, y los parámetros de fabricación. En este apartado se representa el primer paso en la descripción de propiedades de los fluidos base lubricante que afectan el rendimiento del producto. Los métodos de ensayo han sido identificados para caracterizar la composición y el rendimiento de aceites de base además de verificar su consistencia.²⁶

26 Jennifer D. Hall (2010) "Lubricant Base Oils". C.15

En Colombia El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, es el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993. “ICONTEC es una entidad de carácter privado, sin ánimo de lucro, cuya misión es fundamental para brindar soporte y desarrollo al productor y protección al consumidor. Colabora con el sector gubernamental y apoya al sector privado del país, para lograr ventajas competitivas en los mercados interno y externo”.²⁷

La norma técnica colombiana NTC 3382 establece los requisitos que debe cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse los aceites hidráulicos para aplicación en sistemas hidrostáticos. No cubre los aceites lubricantes de motor que tienen especificación como fluido hidráulico.

En esta norma se establecen los diferentes métodos para la caracterización de aceites lubricantes de acuerdo a las normas ASTM establecidas.

Para la determinación de los principales parámetros de los aceites se tomó una muestra de 120 ml de uno de los barriles de aceite quemado recolectados por la empresa Lubrisol de Colombia Ltda. (ver imagen 2) cantidad suficiente para los análisis requeridos, con el fin de determinar las propiedades físicas y químicas estipuladas en la NTC 3382. Dicho procedimiento abarco la agitación del tambor de aceite quemado para poder homogeneizar la mezcla y tomar de manera correcta la muestra con objeto de evitar errores en los análisis a realizar.

Los análisis a realizar son necesarios para determinar la calidad de un aceite debido a que miden las propiedades más importantes de los lubricantes, de esta manera la industria de aceites y lubricantes maneja el control de calidad de sus productos.

2.6 PUNTO DE CHISPA Y PUNTO DE INFLAMACIÓN

El punto de chispa es la temperatura a la cual un líquido combustible debe ser calentado para emitir suficientes vapores y formar momentáneamente una mezcla inflamable con el aire, cuando una pequeña flama es aplicada bajo condiciones específicas. Mientras que el punto de inflamación es la temperatura a la que el aceite comienza a arder y mantiene la combustión.²⁸

Este análisis consiste en pasar por la parte superior de una copa abierta de acero, que contiene la muestra a ensayar, una pequeña llama a intervalos de tiempo especificados, mientras va aumentando la temperatura de la muestra, hasta que los vapores se inflamen sobre la superficie del líquido.

27 (2010) “Norma técnica colombiana NTC 3382”

28 ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (International Standard ASTM D6158 – 05).

Para el análisis se tomó la muestra de 100 ml del aceite usado y se colocó en la copa de acero y se empezó a calentar en el controlador de punto de inflamación de acuerdo a la norma ASTM D-92, en la imagen 5 se aprecia el aceite que comienza a hervir y se empiezan a presentar burbujas a una temperatura de 80°C lo que nos indica que el aceite contiene agua o aditivos con un punto de ebullición más bajo que la de un aceite base ya que los aceite vírgenes no generan burbujas al momento de calentar.

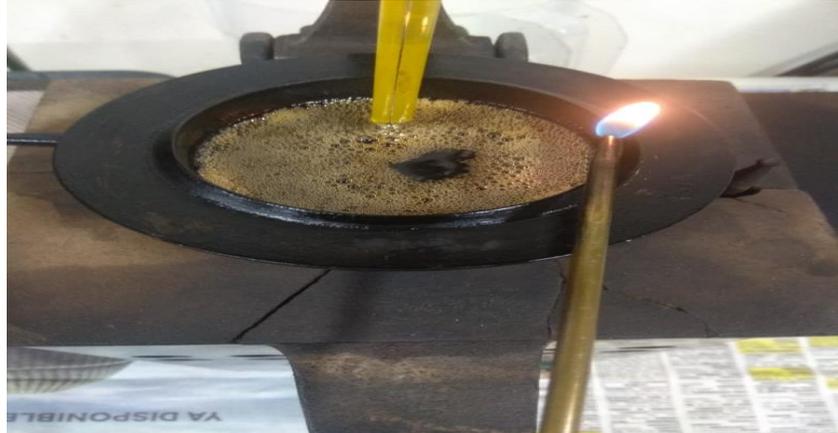
Imagen 5 Determinación de punto de chispa y de inflamación a aceite usado



Fuente: elaboración propia

La muestra se siguió calentando continuamente hasta que empezó a generar vapores suficientes para generar la reacción de combustión, al acercar una pequeña flama a la superficie del aceite. El punto de chispa se dio cuando la muestra de aceite llego a una temperatura de 108°C en donde los primeros vapores, el aire y la flama generaron momentáneamente un fognazo el cual es denominado punto de chispa. El punto de inflamación se obtuvo cuando la temperatura ascendió a los 170°C y al acercar la flama a la superficie del aceite, este comienza a arder y se mantiene la combustión por más de 5 segundos. En la figura 2 podemos observar el instante en el que se halla el punto de inflamación del aceite a 170°C.

Figura 2. Determinación de Punto de inflamación de la muestra de aceite usado



Fuente: elaboración propia

Para poder tener un punto de comparación los resultados obtenidos se compararán con los valores de punto de chispa y de inflamación de las bases lubricantes vírgenes analizados en la empresa Lubrisol de Colombia Ltda. En la tabla 8 se pueden observar valores de punto de chispa e inflamación de las bases y el aceite usado

Tabla 8 Valores de punto de chispa e inflamación de aceites base y aceite usado

ACEITE	PUNTO DE CHISPA °C	PUNTO DE INFLAMACIÓN °C
PL	~180	~200
PM	~200	~230
NM	~230	~260
USADO	108	170

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a esto se puede observar que los valores obtenidos en el análisis de punto de chispa e inflamación para el aceite usado son valores más bajos que los de un aceite virgen ya sea PL (parafínico liviano), PM (parafínico mediano) o NM (nafteno mediano) y esto se debe a que el aceite usado contiene aditivos desgastados, puede estar oxidado debido al contacto con el aire y con los metales productos de la erosión de las piezas luego de su uso, además de que puede estar contaminada con agua, todos estos factores afectan de manera directa en el análisis disminuyendo el punto de chispa y de inflamación de un aceite.

2.7 DENSIDAD

La densidad relativa de una sustancia es el cociente entre su densidad y la de otra sustancia diferente que se toma como referencia o patrón. Para sustancias líquidas se suele tomar como referencia el agua cuya densidad a 4 °C es igual $1000 \frac{Kg}{m^3}$. Como toda magnitud relativa, que se obtiene como cociente entre dos magnitudes iguales, la densidad relativa carece de unidades físicas.

Para el análisis de densidad de la muestra de aceite usado se utilizó un densímetro el consta de un tallo cilíndrico y una bombilla que contiene mercurio o perdigones de plomo que le permiten flotar en posición vertical en líquidos en donde tiene una escala en $\frac{g}{cm^3}$ que mide la densidad del fluido (ver imagen 6).

El análisis se realizó de acuerdo a la norma ASTM D-1298 Método de prueba estándar para determinar la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo y los productos líquidos derivados del petróleo mediante el Método de densímetro²⁹

Imagen 6. Densímetro Boeco germany 28cm (0 – 1) g/cm³



Fuente: Elaboración propia

PL, de sus siglas Parafinico liviano

PM, de sus siglas Parafinico medio

NM, de sus siglas naftenico medio

El densímetro se introdujo en el barril de aceite usado en donde luego de estabilizarse se observa el menisco del líquido sobre el densímetro y se puede hacer la lectura de la densidad en la escala del densímetro. El valor de densidad registrada en el densímetro es de $0.885 \frac{g}{cm^3}$. En la imagen 7 se encuentra la medición de la densidad del aceite usado con el densímetro.

Imagen 7. Medición de densidad con densímetro a barril



Fuente: elaboración propia

En la tabla 9 se exponen los valores de densidad de las bases lubricantes vírgenes de la empresa soporte y el valor obtenido para el aceite usado.

Tabla 9. Valores de densidad de bases vírgenes y aceite usado

Aceite	Densidad (g/ml)
PL	0,87
PM	0,9
NM	0,905
USADO	0,885

Fuente: elaboración propia

A partir de estos datos se puede ver que el valor de densidad registrado por el densímetro en el aceite usado es muy cercano a los valores de un aceite base virgen.

2.8 GRAVEDAD API

La gravedad API, de sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*, es una medida de la densidad que describe que tan pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua. Si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en esta. La gravedad API es también usada para comparar densidad de fracciones extraídas del petróleo. Por ejemplo, si una fracción de petróleo flota en otra, significa que es más liviana, y por lo tanto su gravedad API es mayor. Matemáticamente la gravedad API no tiene unidades, sin embargo, siempre al número obtenido se le coloca la denominación de grado API.

Generalmente, un mayor valor de gravedad API en un producto de refinería representa que este tiene un mayor valor comercial. Esto básicamente debido a la facilidad (operacional y económica) de producir destilados valiosos como gasolina, jet fuel y diésel con alimentaciones de crudo livianos y a los altos rendimientos de los mismos. Esta regla es válida hasta los 45 grados API, más allá de este valor las cadenas moleculares son tan cortas que hacen que los productos tengan menor valor comercial.

EL petróleo es clasificado en liviano, mediano, pesado y extra pesado, de acuerdo a su medición de gravedad API.³⁰

La ecuación usada para obtener la gravedad API es la siguiente:

$$GravedadAPI = \left(\frac{141.5}{Gravedadespecifica} \right) - 131.5$$

A partir de la densidad obtenida y usando la ecuación 2.8.1 se obtiene la gravedad API para el aceite usado calculado de la siguiente manera de acuerdo a la norma ASTM D-287 "Método de prueba estándar para determinar la gravedad API del petróleo crudo y productos derivados del petróleo (Método del densímetro)"³¹

$$GravedadAPI = \left(\frac{141.5}{0.885} \right) - 131.5 = 28.4 \text{ } ^\circ \text{ API}$$

En la tabla 10 se clasifican los aceites de acuerdo a su gravedad API

Tabla 10 Clasificación de aceites de acuerdo a su gravedad API

30 ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D-287*).

PL, de sus siglas Parafinico liviano

PM, de sus siglas Parafinico medio

NM, de sus siglas naftenico medio

31 ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D-287*).

Tipo	Gravedad (°API)	API
crudo liviano	> 31,1	
crudo mediano	22,3 - 31,1	
crudo pesado	10 - 22,3	
Crudo extra pesado	< 10	

Fuente: elaboración propia

Con respecto a la tabla y al valor de gravedad API 28.387 obtenido se puede decir que el aceite usado se encuentra en la clasificación API como un crudo mediano ya que el valor obtenido se encuentra en el rango 22,3 - 31,1 ° API de crudo mediano.

2.10 VISCOSIDAD

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un lubricante. De hecho, buena parte de los sistemas de clasificación de los aceites están basados en esta propiedad.

La viscosidad se define como la resistencia de un líquido a fluir. Esta resistencia es provocada por las fuerzas de atracción entre moléculas del líquido.

La viscosidad cinemática (ν) se define como la resistencia a fluir de un fluido bajo la acción de la gravedad y se puede calcular con el tiempo requerido por un volumen dado de fluido para fluir a través de un tubo capilar por la acción de la gravedad. La unidad en que se mide la viscosidad cinemática es el centistoke (cSt) que, sin ser la única empleada, es la más corriente en la industria petrolífera.

Representa la característica propia del líquido descartando las fuerzas que genera su movimiento, obteniéndose a través del cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del producto en cuestión. Su unidad es el centistoke (cSt) ($\frac{cm^2}{s}$).

La constante K viene dada por las casas constructoras, que entregan cada viscosímetro acompañado de un certificado con dicho dato, ya que el valor K varía con cada uno de los capilares, y los fabricantes para comodidad del usuario lo hacen llegar junto con el viscosímetro.

Esta prueba se trata de medir el tiempo necesario para que cierto volumen de aceite fluya a través del capilar de un viscosímetro Cannon – Fenske de vidrio calibrado, bajo la presión de una determinada columna de líquido a una temperatura exactamente controlada. El viscosímetro Cannon Fenske utilizado para la medición de viscosidad a 40 y 100 °C el cual está compuesto por un tubo con capilar y el tubo de ventilación, el reservorio, la bola de entrada y la bola de medición. Ver imagen 8

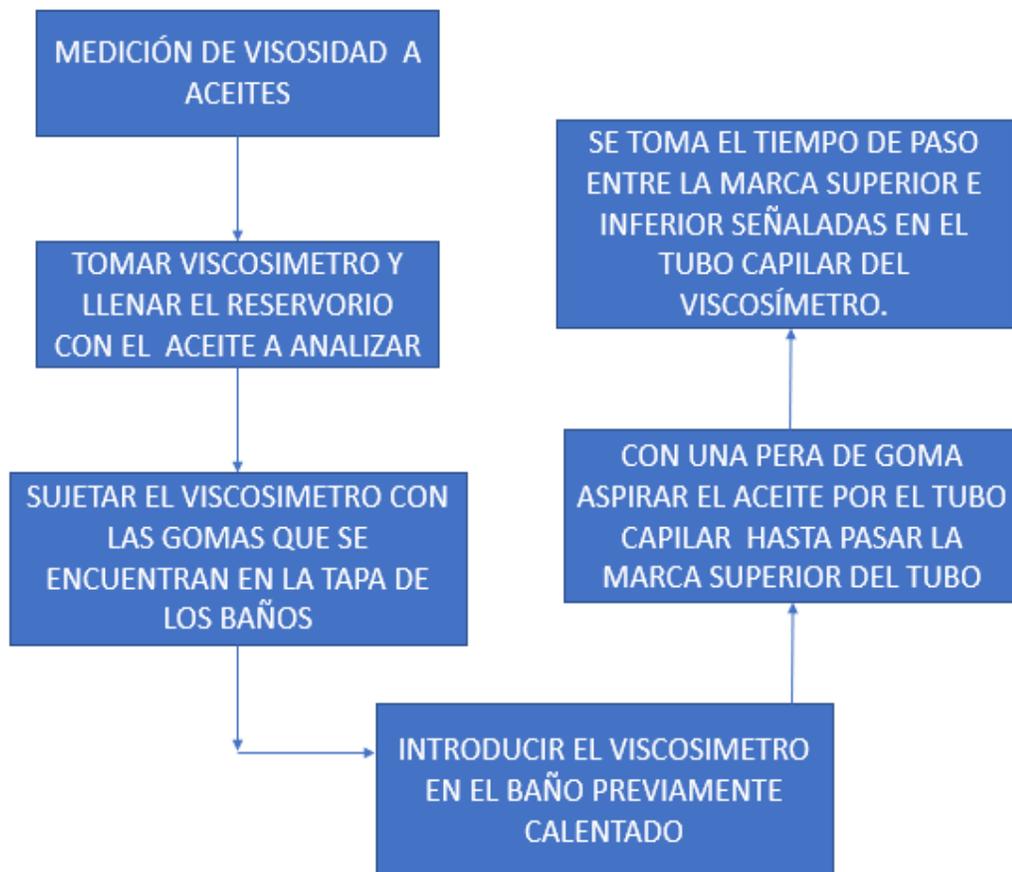
Para la medición de viscosidad se hace de acuerdo a la norma ASTM D445-06 en donde explican la manipulación de los viscosímetros y la manera correcta de llenar el tubo reservorio y la forma correcta de introducir los viscosímetros a los baños termostados como se explica a continuación

Imagen 8 Viscosímetro Cannon – Fenske calibrado tubo 350-30R



Fuente: elaboración propia

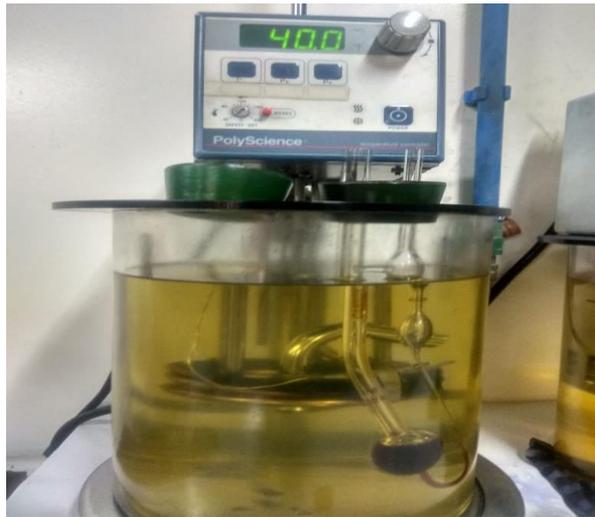
Diagrama 1. Procedimiento para medir viscosidad a aceites en baños termostatados



Fuente: elaboración propia

se llena el reservorio del viscosímetro Cannon – Fenske referencia 350-30R con la muestra de aceite usado, luego el viscosímetro se sumerge en un baño a temperatura constante de 40 °C como se ve en la imagen 9, durante 10 minutos hasta que el aceite usado llega a un equilibrio térmico. Se aspira por el tubo capilar con una pera de goma el aceite usado, hasta que el fluido pasa la marca superior de medida en el tubo capilar. Se toma el tiempo de paso entre la marca superior e inferior señaladas en el tubo capilar del viscosímetro.

Imagen 9. Medición de viscosidad en baño a 40°C



Fuente: elaboración propia

Para la medición a 100 °C se realizó el mismo procedimiento aumentando la temperatura del baño a 100°C y se dejó sumergido el viscosímetro por 15 min para lograr un equilibrio térmico y de esta manera obtener los resultados esperados evitando errores en la toma de datos. La imagen 10 muestra el método de análisis de viscosidad a 100° C.

Imagen 10. Medición de viscosidad a 100°C



Fuente: elaboración propia

Para determinar la viscosidad a 40 y 100 °C se tomaron 3 tiempos esto con el fin de disminuir errores en el cálculo de viscosidad, por lo tanto, se hace un promedio entre los tiempos tomados para cada uno de los baños. El tiempo medido es el que tarda el aceite en pasar desde la marca superior del viscosímetro hasta la marca inferior, en las Tabla 11 y tabla 12 se relacionan los valores de tiempo obtenido en las mediciones a 40 y 100 °C respectivamente.

Tabla 11. Tiempo registrado para aceite usado en baño con control de temperatura a 40 °C

Minutos	Segundos	Total (segundos)
1	43,44	103,44
1	43,5	103,5
1	43,66	103,66
1	43,53	103,53

Fuente: elaboración propia

Tabla 12. Tiempo registrado para aceite usado en baño con control de temperatura a 40 °C

Minutos	Segundos	Total (segundos)
0	16,13	16,13
0	16,56	16,56
0	16,37	16,37
0	16,353	16,353

Fuente: elaboración propia

El cálculo de la viscosidad cinemática se puede obtener a partir de la ecuación que se muestra a continuación. En donde K es la constante del viscosímetro y t es el tiempo que tarda el fluido en pasar desde la marca superior de medición hasta la marca inferior.

$$v = K \times t$$

A partir de esta ecuación y con el promedio de tiempo de los valores tomados se puede realizar la operación para obtener la viscosidad de la muestra de aceite usado, los valores de la constante K para el viscosímetro Cannon – Fenske para 40 y 100 °C son 0.4815 y 0.4793 respectivamente.

$$v(40^{\circ}C) = 0.4815 \times 103.5333 = 49.85cSt$$

$$v(100^{\circ}C) = 0.4793 \times 16.5333 = 7.83cSt$$

Los datos obtenidos de viscosidad del aceite usado se comparan en la tabla 13 con los datos de base lubricante virgen.

Tabla 13. comparativa de viscosidad de bases lubricante y

Aceite	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C
PL	30 -40	5 -6
PM	80- 90	10 -12
NM	180 – 190	13 – 16
ACEITE USADO	49,851	7,838

Fuente: elaboración propia

A partir de la tabla 13 se puede decir que el aceite usado se encuentra entre una base PL y una PM ya que el valor obtenido de viscosidad se encuentra entre los valores de estas dos bases. Lo que nos dice que el aceite usado puede ser una mezcla de aceites parafínico livianos y medianos.

2.11 ÍNDICE DE VISCOSIDAD

El índice de viscosidad es la constante física que determina la variación de viscosidad de un aceite lubricante respecto a la temperatura. Ambas magnitudes son inversamente proporcionales entre sí, es decir, cuanto mayor sea la temperatura menor será la viscosidad, de donde se deduce que, cuanto mayor sea el índice de viscosidad menor será la variación de la misma conforme eleve la temperatura.³²

La viscosidad cinemática se calcula como se indica en el método analítico para la determinación de la viscosidad cinemática de los productos líquidos transparentes y opacos.

El índice de viscosidad es una medida ampliamente usada y aceptada de la variación de viscosidad cinemática debida a cambios en la temperatura de un producto del petróleo entre 40 y 100 °C.

Se tuvo en cuenta la norma ASTM D2270 – 93 “Práctica estándar para calcular el índice de viscosidad comprendida entre la viscosidad cinemática a 40 °C y 100 °C

Para los aceites con índice de viscosidad ≤ 100

Si la viscosidad cinemática de los aceites a 100 °C es menor o igual a 70 cSt se debe buscar los valores de L y H correspondientes en el Anexo 1. Los valores que no se encuentren en la tabla pero que se encuentren dentro del rango, se deben obtener por interpolación lineal. El índice de viscosidad no está definido para los aceites de viscosidad cinemática menor a 2.0 cSt a 100 °C.

³² ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D2270 – 93*).

Según Robert L. Mott en su libro *mecánica de fluidos*, si la viscosidad cinemática esta sobre 70 cSt a 100 °C, se calcula el valor de L y H ³³

$$L = 0.8353Y^2 + 14.67 - 216$$

$$H = 0.1684Y^2 + 11.85 - 97$$

Donde

L= viscosidad cinemática a 40°C de un aceite de índice de viscosidad 0 que tiene la misma viscosidad cinemática a 100 °C que el aceite al cual se le quiere calcular el índice de viscosidad.

Y= viscosidad cinemática a 100 °C del aceite al cual se le quiere calcular el índice de viscosidad.

H= viscosidad cinemática a 40°C de un aceite de índice de viscosidad 100 que tiene la misma viscosidad cinemática a 100 °C que el aceite al cual se le quiere calcular el índice de viscosidad.

El cálculo del índice de viscosidad *VI* se da a partir de la siguiente ecuación

$$VI = \frac{L-U}{L-H}$$

U = viscosidad cinemática a 40°C del aceite al cual se le quiere calcular el índice de viscosidad.

Para los aceites con índice de viscosidad ≥100

Si la viscosidad cinemática de los aceites a 100 °C es menor o igual a 70 cSt se debe buscar los valores de L y H correspondientes en el Anexo 1. Los valores que no se encuentre en la tabla pero que se encuentren dentro del rango, se deben obtener por interpolación lineal. El índice de viscosidad no está definido para los aceites de viscosidad cinemática menor a 2.0 cSt a 100 °C.

Si la viscosidad cinemática esta sobre 70 cSt a 100 °C, se calcula el valor H con la ecuación anterior y para calcular el valor de índice de viscosidad se debe utilizar la siguiente ecuación.

$$VI = \frac{(\text{antilog}N)-1}{0.00715} + 100$$

Donde

$$N = \frac{\log H - \log U}{\log Y}$$

33 Robert L. Mott,(2006), “ mecánica de fluidos sexta edición

$$Y^N = \frac{H}{U}$$

Debido a que la viscosidad cinemática medida para el aceite usado a 100° C es 7.838 cSt se busca el valor correspondiente a L y H en la figura 4

Figura 4 Tabla de valores L y H para índice de viscosidad

Viscosidad 100°C (cSt)	L	H
7,7	93,2	56,2
7,8	95,43	57,31
7,9	97,72	58,45
8	100	59,6

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a la viscosidad 100°C medida al aceite usado el valor 7.838 cSt se encuentra en la tabla entre los valores 7,800 y 7,900 cSt Por lo tanto para obtener el valor buscado se hace una interpolación lineal y de esta manera se obtiene los valores de L y H para el aceite usado. Los valores fueron:

$$L = 96,300$$

$$H = 57,743$$

Luego de obtener estos valores se utiliza la ecuación para hallar el índice de viscosidad del aceite usado.

$$VI = \frac{96,300 - 49,851}{96,300 - 57,743} = 120,468$$

Recordando que entre mayor sea el índice de viscosidad mejor será el comportamiento del aceite cuando este sea sometido a altas temperaturas, es decir que menor será la tasa de cambio en la viscosidad y al obtener un índice de viscosidad de 120,468 para el aceite usado se puede concluir que este al ser sometido a altas temperaturas la capa lubricante va a ser más delgada que a bajas temperatura.

2.10 COLOR

La determinación del color de productos derivados del petróleo se hace principalmente para fines de control de fabricación y es una característica de calidad importante, ya que el color es fácil de observar por parte del usuario del producto. En algunos casos, el color puede servir como un indicador del grado de refinamiento del material. Cuando el rango de color de un producto determinado es conocido, una variación fuera del rango establecido puede indicar una posible contaminación

con otro producto. No obstante, el color no es siempre una guía confiable para determinar la calidad del producto y no debe utilizarse de manera indiscriminada en especificaciones de productos.

La escala de colores de la ASTM D-1500, que en ocasiones se denomina "valor del color del aceite mineral", se utiliza mayoritariamente para la clasificación de los productos del petróleo, como los aceites lubricantes, los aceites de calefacción y los aceites combustibles diésel. La ASTM D-1500 es una escala de colores de un solo color y una dimensión que va desde un amarillo claro a un rojo intenso en dieciséis intervalos (unidades de 0,5 a 8,0 en incrementos de 0,5 unidades). Los comparadores visuales pueden alcanzar una resolución de 0,5 unidades.³⁴

Para el análisis del aceite usado se tomó una muestra de 15ml en un tubo de ensayo y se colocó en el colorímetro orbeco-hellige imagen 11

Imagen 11. Colorímetro orbeco-hellige



Fuente: elaboración propia

Para el análisis de color del aceite se coloca la muestra de aceite en la celda derecha de la parte superior del colorímetro luego se agrega el disco de color con escala de 5,0 hasta 8,0 en la abertura ubicada a la derecha del colorímetro. Se enciende la fuente luz y se comparan los colores en el detector. En la imagen 13 se puede observar y comparar el color del aceite usado con respecto a la escala del disco.

³⁴ ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D6158 – 05*).

Imagen 13. Colorimetría para aceite usado



Fuente: elaboración propia

En la parte izquierda del detector podemos observar un color rojo claro emitido por el disco de color en el valor 8,0 y en la parte derecha se observa el color emitido por el aceite, se ve un color un poco más oscuro con respecto al del disco de color. Por ende, el valor de color del aceite no es exacto y es mayor a 8,0.

Las bases lubricantes tienen valores de color entre 0,5 y 2 según Avilino Sequeira Jr en su libro “*lubricant base oil and wax processing*” lo que quiere decir que el aceite usado tiene un valor demasiado alto y esto se debe a los factores de degradación del aceite ya mencionados en el apartado de los factores que degradan los aceites, cabe resaltar que el color no quiere decir que el aceite sea obsoleto, sino que está contaminado por aditivos desgastados, limaduras de metales, o se opacó debido a la acción térmica a la cual fue sometido.

2.12 CONTENIDO DE METALES DE DESGASTE

El aceite lubricante circula por una serie de componentes en un circuito de lubricación. A su paso, se puede cargar de distintos contaminantes, que pueden tener tres orígenes: minerales, como en el caso de la sílice (tierra o arena, por ejemplo), vegetales o sintéticos (pintura o fibras) y metálicos. En este último caso se encuentran las partículas de desgaste de piezas de fundición o metales.

Uno de los efectos más importantes de las partículas es el del desgaste que pueden provocar a su paso a través de los circuitos. Este puede ser abrasivo y también por fatiga debido a una situación repetitiva. El grado del daño causado no se relaciona únicamente con el tamaño de las partículas, sino también con su dureza, así como

con el tamaño de los espacios por los que pasa y las presiones del aceite en cada punto del circuito.³⁵

La norma ASTM D6595 - 00 (2011) Método de prueba estándar para la determinación de metales de desgaste y contaminantes en los aceites lubricantes usados o fluidos hidráulicos espectrometría de emisión atómica con electrodo de disco rotatorio.

El análisis de elementos es probablemente la prueba más básica en el análisis de aceites lubricantes. Su historia se remonta a los años 1940s y 1950s, cuando se utilizaba en la industria ferrocarrilera para determinar la presencia de metales de desgaste en los aceites de motor diésel. Sin embargo, el análisis de elementos, a veces conocido como espectroscopia de elementos, espectroscopia de emisión atómica (AES) o simplemente como análisis de metales de desgaste, se trata de algo más que sólo medir la concentración de metales de desgaste tales como el hierro, el plomo y el cobre.

En su forma actual, el análisis de elementos se utiliza para determinar las concentraciones de 15 a 25 elementos diferentes que varían desde metales de desgaste y contaminantes hasta aditivos del lubricante.

El análisis de elementos funciona bajo el principio de Espectroscopia de Emisión Atómica (AES). En AES, los átomos individuales dentro de la muestra, como por ejemplo los átomos de hierro provenientes de las partículas de desgaste, los átomos de zinc procedentes de las moléculas de aditivo ZDDP, o el silicio de la contaminación con sílice (tierra), son excitados utilizando una fuente de alta energía. Los átomos absorben energía de la fuente de excitación y son transformados en un estado electrónico de alta energía.

Debido a las leyes de la física cuántica, a los átomos no les gusta estar en este estado de excitación y pierden rápidamente la energía que han ganado, principalmente emitiendo energía luminosa. La energía de la luz emitida, la cual es inversamente proporcional a la longitud de onda, depende de la estructura electrónica del átomo, y por lo tanto es diferente para cada tipo de átomo. De esta manera, midiendo la cantidad de luz emitida en la longitud de onda de emisión característica de los átomos tales como el hierro, cobre, zinc y sodio, puede determinarse la concentración de cada átomo.

La principal limitante de AES es que, debido a que este método requiere la excitación de átomos individuales, la muestra debe ser completamente vaporizada para permitir que se midan todos los átomos presentes. Mientras que esto no es un problema para las partículas pequeñas y metales disueltos, la probabilidad de que una partícula pueda ser vaporizada y analizada utilizando AES se reduce

35 ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D6158 – 05*).

considerablemente cuando esta es mayor a 5 micrones. De hecho, el espectrómetro AES es completamente ciego para ver las partículas que exceden los 10 micrones.

Desafortunadamente, dependiendo del mecanismo de desgaste y de la severidad del problema, el desgaste activo de la máquina puede generar partículas que son mayores a 10 micrones en tamaño, y por lo tanto serán invisibles al instrumento de AES. Por esta razón, es importante en cualquier programa de análisis de lubricante no apoyarse únicamente en los datos de AES para determinar el desgaste activo, sino que deben incluirse pruebas tales como el conteo de partículas, el análisis de densidad ferrosa y la microscopía de membrana para medir partículas más grandes.

Cuando se analizan los datos del análisis de elementos, es importante ver no sólo el valor absoluto de cada elemento, sino también ver la línea de tendencia, esto es, el cambio en las concentraciones de elementos en muestras consecutivas. Esto es importante debido a que las tasas de desgaste serán diferentes para las diferentes máquinas, dependiendo de los tipos de componentes, el fabricante y modelo, el tipo de lubricante, la edad, el uso, etc. Este tipo de análisis de tasa de cambio puede ser muy valioso para localizar señales tempranas de desgaste y de contaminación.

Al analizar los datos por AES, es importante conocer tanto la metalurgia de la máquina como la composición química de los contaminantes comunes que pueden estar presentes, para que los datos puedan relacionarse con el desgaste activo de un componente específico, o al ingreso de contaminantes específicos. Asimismo, es importante conocer la concentración esperada de los diferentes aditivos metálicos en el lubricante. Para lograr esto, debe determinarse anualmente la línea de base de los lubricantes nuevos, o cuando se sospeche que ha habido un cambio en el tipo de lubricante o en su formulación. Comparando la huella digital de los elementos del aceite nuevo contra la muestra de aceite usado, se pueden diagnosticar con facilidad y rapidez problemas como el agotamiento de aditivos o la adición del aceite erróneo. Sin embargo, se debe tener cuidado al observar los elementos de los aditivos debido a que el agotamiento de aditivos no necesariamente causa una caída en la concentración de los elementos, según lo medido por AES.²

Debido a su capacidad para determinar el desgaste anormal, los contaminantes y los elementos de los aditivos, AES es una herramienta muy valiosa en cualquier programa de análisis de lubricante. Cuando se utiliza adecuadamente, puede determinar todo, desde el desgaste corrosivo a una fuga de refrigerante, del ingreso de agua de mar al agotamiento de aditivos, y debe considerarse la piedra angular de un programa de análisis de lubricante bien diseñado.

Casi todos los laboratorios de análisis de lubricante utilizan uno de estos dos tipos de espectrómetros de emisión atómica, ya sea un instrumento de plasma inductivamente acoplada (ICP), o un instrumento de electrodo y disco rotatorio (RDE). La diferencia básica entre estos dos radica principalmente en la manera en que la muestra es vaporizada y los átomos son excitados por la fuente de alta

energía. En un instrumento ICP (vea figura 1), el lubricante se inyecta en un plasma de argón a alta temperatura, donde los átomos se vaporizan, se excitan, y subsecuentemente emiten luz. En un espectrómetro RDE (vea figura 2), en ocasiones conocido también como un instrumento “Arc-Spark”, el lubricante es vaporizado y excitado utilizando una descarga de alto voltaje entre un electrodo y un disco de carbón rotatorio.

El resto del instrumento, ya sea que se trate de espectrómetro ICP o RDE, es básicamente el mismo. La luz emitida por los átomos excitados se colecta y se concentra en las rendijas del espectrómetro. El espectrómetro contiene una rejilla de difracción que es similar a un prisma en el que divide la luz de diferentes longitudes de onda o colores en una longitud de onda discreta, en base a su ángulo de difracción. La intensidad de la luz en cada ángulo, generalmente conocido como canal, se mide utilizando un fotodiodo sensible a la luz y la señal del voltaje resultante se convierte en una concentración en ppm con base en un proceso simple de calibración.

En la práctica, siempre y cuando los instrumentos estén calibrados apropiadamente, hay muy poca diferencia entre la precisión de los datos de ambos tipos de instrumentos. Sin embargo, hay una diferencia de gran importancia entre los instrumentos ICP y RDE. Ambos instrumentos se ven afectados por la limitante del tamaño de la partícula. Este efecto limita el tamaño de las partículas que pueden medirse utilizando AES tradicional. Para el instrumento ICP, sólo pueden medirse las partículas más pequeñas a aproximadamente 3 a 5 micrones. Para los instrumentos RDE, el límite es ligeramente más alto, alrededor de 8 a 10 micrones. Esto implica que, si una muestra de lubricante se analiza primero mediante ICP, y después mediante RDE, las concentraciones de ciertos elementos, principalmente los metales de desgaste y los contaminantes, que pueden presentar partículas de 3 a 10 micrones, potencialmente serán diferentes. Si bien esto es poco relevante cuando se lleva la tendencia de los datos de diferentes muestras analizadas por los

mismos instrumentos, los datos de las muestras analizadas por los instrumentos RDE e ICP normalmente no se correlacionan.

Imagen 14: Espectrofotómetro por emisión atómica PEKIR ELMER AA 400



Fuente: elaboración propia

2.12 TABLAS REFERENCIAS

En este apartado veremos los valores críticos de metales que queremos eliminar, los que obtuvimos de nuestros análisis y los de aceite virgen

Tabla: 14 valores críticos aceite

Elemento	Valor crítico(ppm)	Valor peligro(ppm)
Hierro	9	14
Plata	3	7
Aluminio	4	6
Cromo	6	10
Cobre	12	19
Magnesio	6	9
Niquel	5	8
silicio	25	64
Titanio	5	8
Molibdeno	5	9
Plomo	2	4
Estaño	20	40

Fuente: régimen de aceites valores críticos, lubrisol

Estos valores crítico y peligro hacen referencia que al estar en un porcentaje de partes por millón cercano a un valor peligro, este aceite podría causar graves daños a la maquinaria que se usa, o en un estado de reposo, no deberá ser usado, en el valor critico este aceite podría causar un accidente inminente en la maquinaria o personal que se encuentre cerca a este.

Tabla 15: valores metales de desgaste por espectrofotometría

Análisis	Método	Unidades	Resultado
APARIENCIA	M1-001	N. A	OPACA
COBRE	ASTMD-6595	Ppm	0.2
HIERRO	ASTMD-6595	Ppm	55.1
PLOMO	ASTMD-6595	Ppm	0,4
CROMO	ASTMD-6595	Ppm	0.0
ALUMINIO	ASTMD-6595	Ppm	1.2
ESTAÑO	ASTMD-6595	Ppm	1.6
SILICIO	ASTMD-6595	Ppm	1.8

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. propiedades fisicoquímicas de aceites vírgenes fuente:

Propiedades físicas	Aceite virgen
Gravedad específica	0.88
%sedimentos y agua	0.00
% en peso en residuos de carbono	0.82
% en peso de cenizas	0.94
Punto de fluidez	-35.0
Propiedades químicas	
Índice de saponificación	3.94
Índice de acidez	2.20
Índice de basicidad	4.70
% en peso de nitrógeno	0.05
% en peso de azufre	0.32
Plomo en ppm	0
Calcio ppm	1.21
Zinc ppm	1.66
Fosforo ppm	1.397
Magnesio ppm	6.75
Hierro ppm	3
Sodio ppm	4
Potasio ppm	<1
Cobre ppm	0

Fuente: elaboración propia

La tabla 16 nos muestra las propiedades físicas y químicas de un aceite virgen estándar el cual cumple con todas las características y requisitos según la NTC3382

En la tabla 14 muestra los valores peligrosos y críticos estos valores se tienen cuenta según normas estrictas como por ejemplo la norma ASTM-D 4378-97

Esta tabla define los valores según la norma que se debe acercarse en la experimentación, para no caer en valores críticos ni peligrosos que pondrían en peligro la base lubricante recuperada y haría obsoleto su uso, ya que estas a mayores cantidades son en hierro se debe escoger un procedimiento que satisfaga la eliminación de estos metales como se puede tener que ser menor a 9 ppm y se tiene una concentración de 55 ppm, en cuanto al aluminio 4ppm, a el valor de referencia de 1,2 ppm el cual bajara más de lo que la norma requiere dando un mayor valor agregado al aceite refinado esto de igual manera sucede con el estaño y el silicio véase imagen 3, con estas referencias se puede iniciar el desarrollo, posterior para escoger el mejor proceso de refinación de aceites lubricantes, a continuación se mostrara en el apartado 4 varios procesos hasta la selección del mejor según los primeros resultados.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y SELECCIÓN DE PROCESOS

A lo largo de este capítulo se habla de los diferentes procesos para la re-refinación de aceites usados los cuales son comparados a partir de una matriz que relaciona diferentes criterios de selección, también se realiza el diseño experimental de los procesos seleccionados.

3.1 TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN

Las técnicas de recuperación consisten principalmente en operaciones de calentamiento, sedimentación, centrifugación, filtración o deshidratación y en la mayoría de los casos, destilación o una combinación de estas. Con el fin de remover los sólidos, contenido de agua o hidrocarburos ligeros contenidos en el aceite usado.

Los tratamientos químicos con ácido, arcilla, cáustica, propano u otros químicos son también usados para reducir el contenido de metales y lodos para su posterior uso como combustibles o para su aprovechamiento como formulación de nuevos productos útiles.³⁶

3.2 PRINCIPALES PROCESOS DE RE- REFINACIÓN

Los procesos de re-refinación consisten en los métodos de reprocesamiento y procesos de fabricación de aceites bases, de acuerdo a avilino sequeira jr³⁷ los métodos de reprocesamiento son:

- 1) Deshidratación y destilación para remover sedimentos en fondos, agua y fracciones ligeras.
- 2) Destilación o tratamiento químico para remover impurezas.
- 3) hidrogenación o tratamiento con arcillas- químicas.
- 4) Destilación para acondicionar las bases lubricantes tratadas.

Los métodos alternativos para recuperación de energía de los aceites usados, consiste en agregar estos aceites como materia prima para la coquización o a las unidades de alimentación en los procesos de gasificación. Sin embargo, agregar los aceites usados a hornos para generar energía no es la forma más adecuada para su aprovechamiento ya que se generan gases y partículas que aceleran la contaminación de suelos, fuentes hídricas y generan gases de efecto invernadero. Lo cual convierte esta técnica en un problema ambiental.

Se plantea la gasificación de aceites usados solos o en combinación con otro material orgánico para la fabricación de gas de síntesis, una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno. sin embargo, es una técnica que no se ha implementado a gran medida, pero sirve para aprovechar los aceites usados.

36 Sequeira Jr, avilino, (1994) "*lubricant base oil and wax processing*" New York, Estados Unidos

37 Sequeira Jr, avilino, (1994) "*lubricant base oil and wax processing*" New York, Estados Unidos

Los procesos usados principalmente en norte América según el libro *“Lubricant oil and wax processing”* son los siguientes:

1. Proceso Mohawk
2. Proceso KTI
3. Proceso PROP
4. Destilación y tratamiento con arcillas

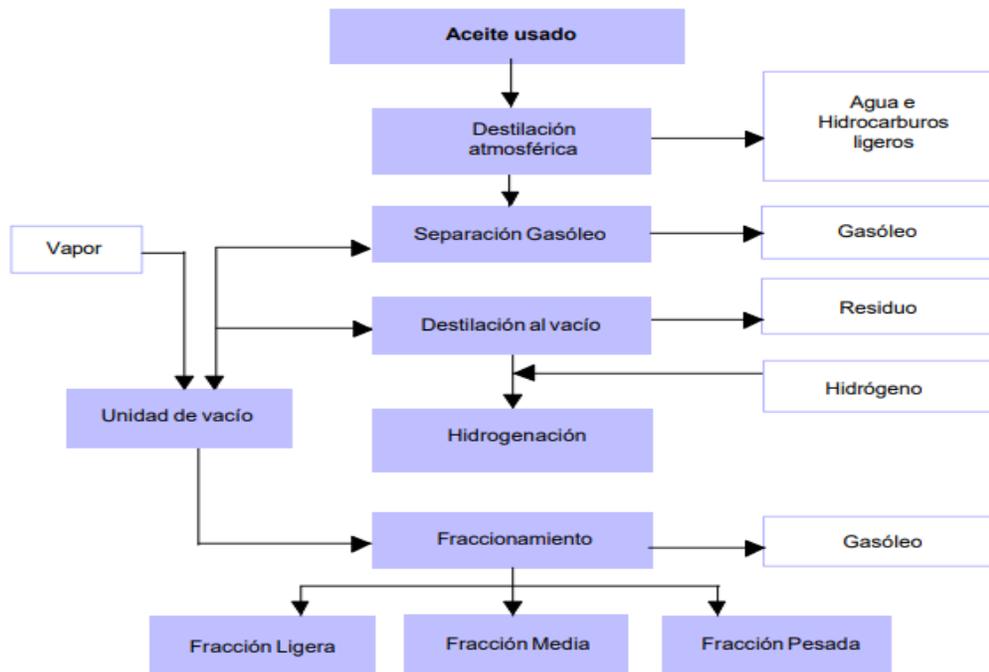
Mientras que los principales procesos en el occidente de Europa son:

1. Destilación y tratamiento ácido – arcilla
2. Destilación y tratamiento propano – arcilla
3. Destilación, tratamiento propano e hidrogenación
4. Destilación, desmetalización con arcillas
5. Destilación, hidrogenación y re- destilación (proceso KTI)

3.2.1 Procesos tipo kti. El proceso KTI (Kinetics Technology International), también conocido como KTI Relub Technology, Este proceso se basa en diferentes pasos básicos iniciando por la destilación atmosférica la cual elimina el agua en el aceite usado y los hidrocarburos ligeros contenidos. Luego de esto se usa la destilación al vacío, este producto queda en un rango determinado de los aceites lubricados según los estándares ya descritos en el apartado anterior la temperatura de trabajo adecuada no ha de ser superior a 250 °C, luego de esto se utiliza un proceso para eliminar compuestos sulfurosos nitrogenados y óxidos el cual es la hidrogenación, la cual también mejora el color y olor del aceite.

Por último, se realiza un fraccionamiento este aceite resultante de anteriores procesos se fracciona en distintas bases para los requerimientos del proceso. Este proceso tiene un rendimiento del 82% de aceites, los residuos de la destilación del vacío contienen aditivos derivados y productos oxidados que tiene un valor comercial, a continuación, se agrega un diagrama de proceso detallado

Diagrama1.ProcesoTipomohawuk



Fuente. elaboración propia

3.2.2 Proceso tipo mohawk. Este proceso creado por la compañía Mohawk oil en Canadá tiene como base el proceso KTI , aun así tiene diferencias notables en la destilación al vacío y la hidrogenación , ya que al tener un pretratamiento que conlleva a la precipitación de elementos contaminantes , como aditivos y otros componentes presentes en los aceites , esto elimina problemas de suciedad para la fase de destilación y alarga la vida de los catalizadores que se puedan usar en este proceso , luego de esto se usa la destilación atmosférica para eliminar el agua e hidrocarburos , luego de esto se realiza una destilación al vacío y luego con película fina lo cual recupera hidrocarburos restantes , junto a una hidrogenación y un fraccionamiento.

Esta tecnología tiene varias ventajas ya que permite que los equipos no sean limpiados tan frecuentemente, el solo hecho de usar vapor reduce la cantidad de agua y los contaminantes y reduce la corrosión en los equipos.

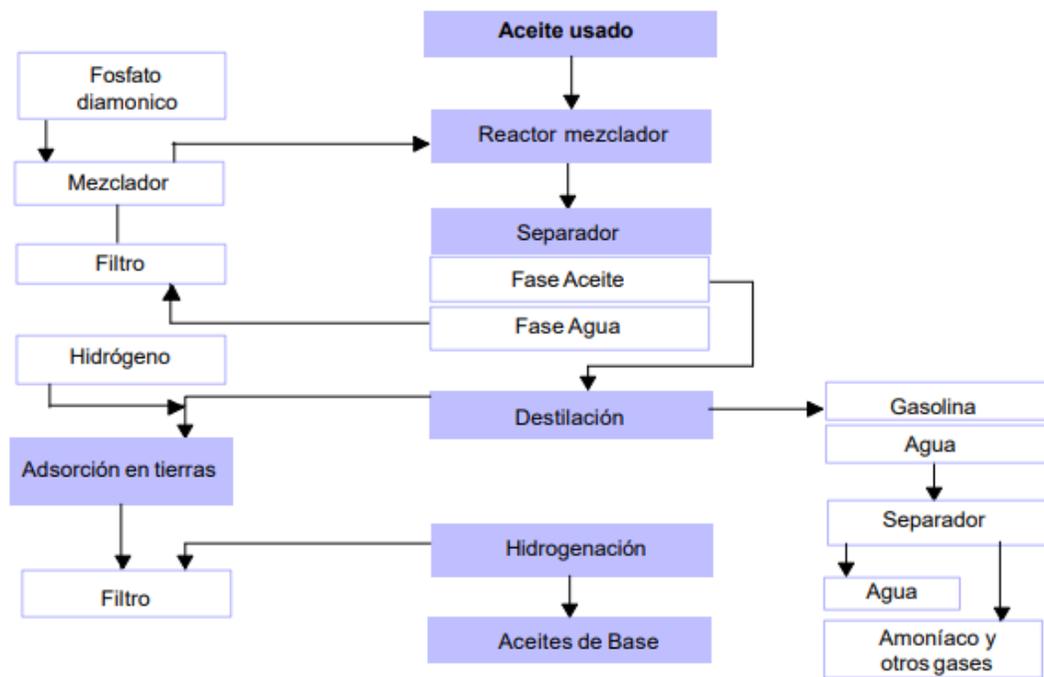
3.2.3 Proceso prop. El aceite lubricante recolectado se pone en contacto con una solución de fosfato de amonio, los metales reaccionaran con este para producir fosfatos insolubles en agua y aceite, este aceite se convierte en una emulsión que contendrá el 1% de los metales pesados de la composición original , esta se somete a un tratamiento térmico , la cual elimina los compuestos de fósforo y produce una aglomeración de solidos de dispersos que luego se eliminara por filtración ,luego se

mezcla con hidrógeno caliente usando níquel y molibdeno eliminando cloro y nitrógeno.

El aceite se circula a través de arcilla el cual elimina ácidos sulfúricos y ayuda al color y el olor del aceite, por último, se lleva un proceso de limpieza para remover fracciones de combustible que aun queden esto permite controlar el punto de encendido del aceite purificado.

Esta tiene como ventaja no producir contaminantes no requiere destilación al vacío y los contaminantes se retiran de tal manera que no producen daño al ambiente.

Diagrama2.ProcesoTipoPROP



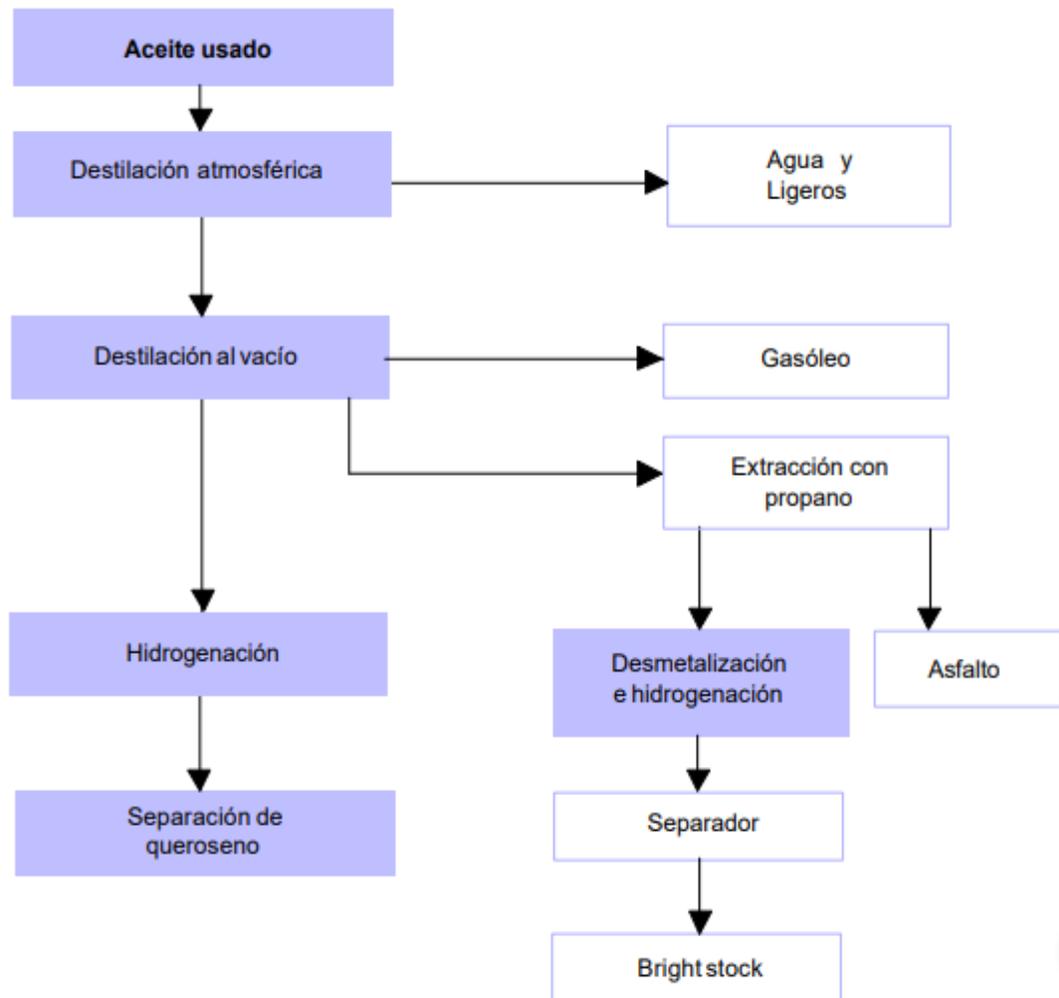
Fuente. elaboración propia

3.2.4 Proceso tipo ifp. Este proceso desarrollado por Institut Français du Petrole, este proceso combina la destilación al vacío y la hidrogenación, en este la extracción usara propano líquido, esta es usada en refinerías de petróleo

En principio se hace una destilación atmosférica que elimina agua e hidrocarburos ligeros, luego de esto una destilación al vacío, de los componentes oleaginosos por medio de propano a una temperatura de 75 °C y 95 °C en esta fase se recupera aceites de bases ligeras y medias, luego de esto se realiza una hidrogenación donde se separan el propano del aceite, donde también se separan asfálticos, hidrocarburos y otros. por último, se hace una hidrogenación de la fracción, una de

las cualidades de este proceso es la extracción con propano en la destilación al vacío y esta fracción de desmetaliza a través de lechos catalíticos.

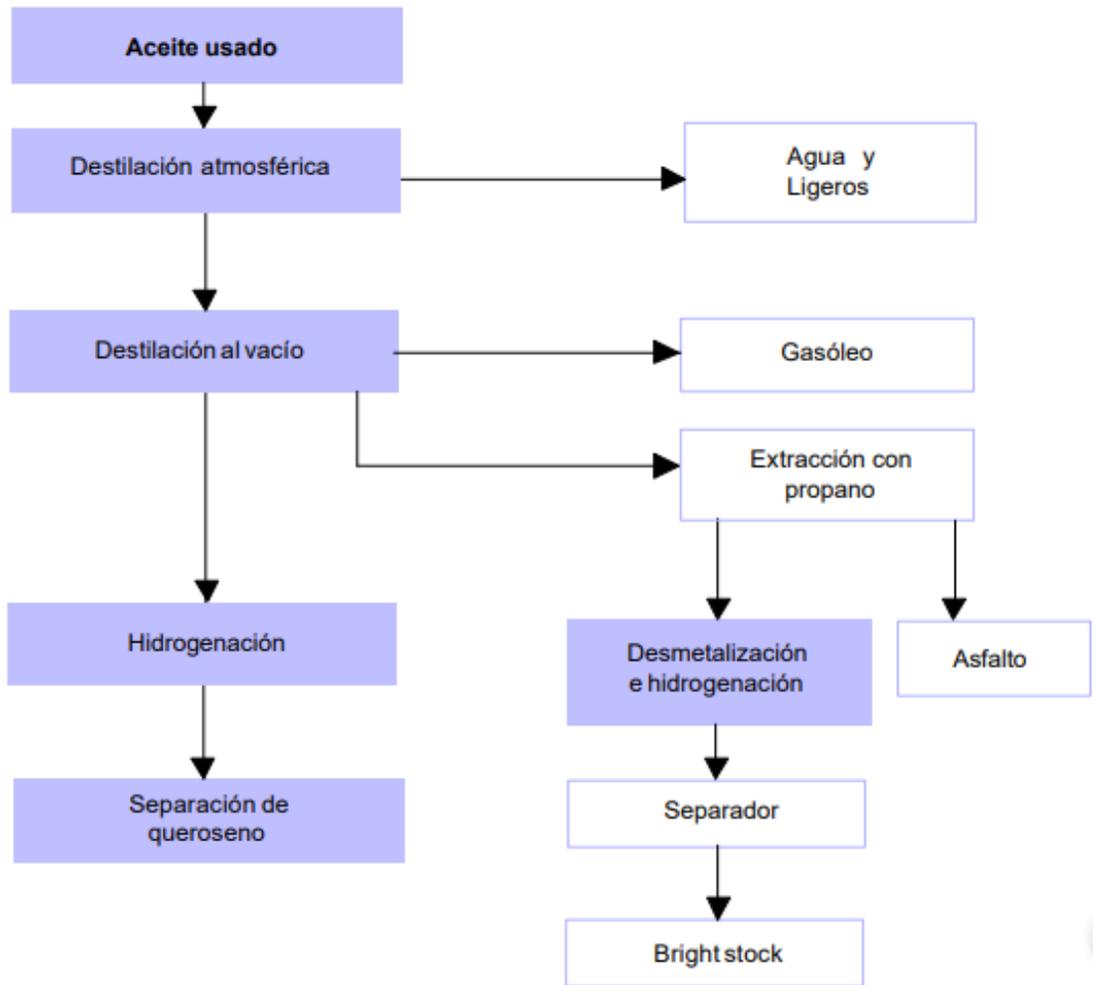
Diagrama 3. Proceso Tipo IFP fuente:



Fuente. elaboración propia

3.2.5 tecnología uop dch. Este proceso tiene como principio el tratamiento del aceite usado con gas de hidrógeno a una temperatura determinada, y mediante una separación adecuada, este eliminará los sólidos e elementos metálicos, en este proceso se eliminan los compuestos halogenados y por medio del oxígeno se obtienen hidrocarburos ligeros de alta calidad, el paso más representativo es el uso de un reactor catalítico para la eliminación de halógenos en un reactor de lecho catalítico. Este proceso permite reciclar aceites mediante un sistema económico y de buena calidad. Esta tecnología solo se ha probado en plantas piloto.

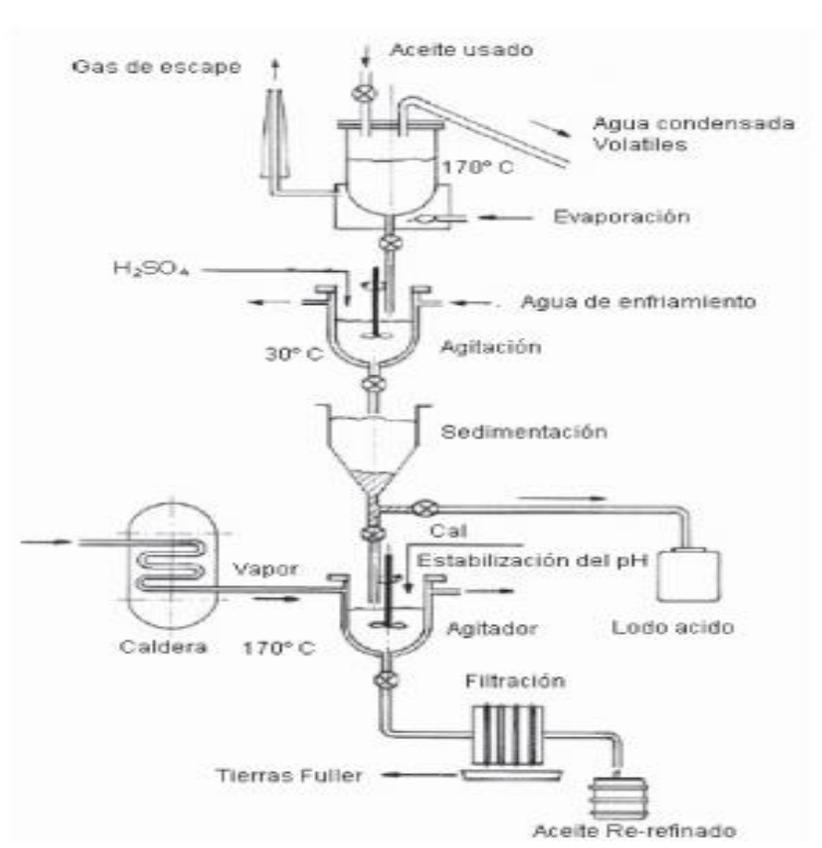
Diagrama4.ProcesotipoDHC



Fuente. elaboración propia

3.2.6 Proceso de ácido-arcilla. Este proceso tiene como fundamento el uso de arcillas para la separación de la base tratada y los agentes ácidos en la etapa final de este proceso, en una primera etapa del aceite usado pasara por una evaporación para eliminar el exceso de agua, condensados volátiles y algunas impurezas, este resultado se lleva a un agitación y posterior sedimentación, donde elementos pesados como suciedades o elementos de tamaño considerable, quedaran atrapados junto a esto se agregan los ácidos correspondientes , para la eliminación de metales de desgaste , posterior a esto el lodo acido será filtrado por medio de las arcillas eliminando este agente toxico, según el estudio bibliográfico este tiene un rendimiento de un 85% en relación a la base lubricante obtenida , en cuanto al desecho producido del total será un 3%-4% entre arcillas y lodo acido

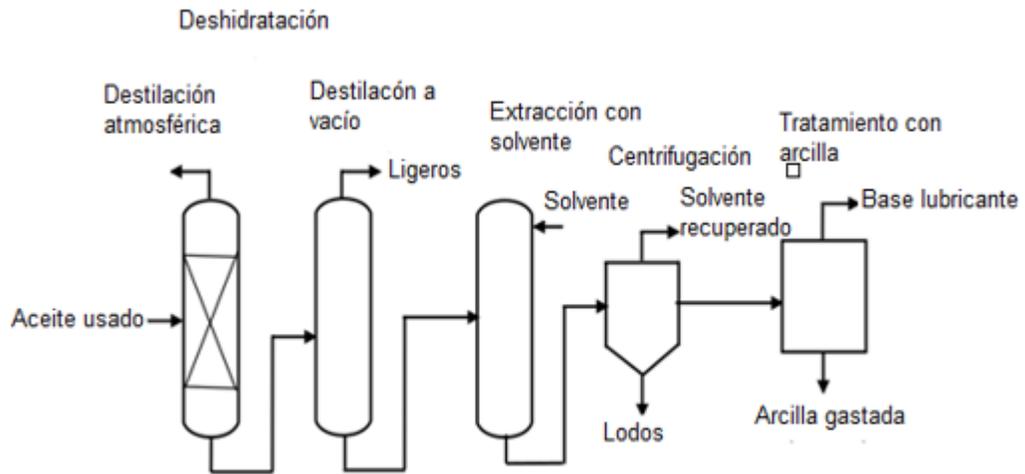
Imagen 15. proceso acido arcilla



Fuente: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

3.2.7 Extracción por solvente. La segunda experimentación que será usada para el proyecto debido a que este proceso es de los más económicos y eficientes, se diferencia del ácido arcilla, ya que producirá un lodo orgánico y no tóxico como es el caso del proceso de ácido arcilla.

Este proceso realizado en su mejor forma logrará remover entre el 10% y el 14% de los aceites usados que pueden contaminar, estas impurezas corresponden a los aditivos de los aceites usados, este sistema debe realizarse de una manera que satisfaga donde este separe el máximo de lodos usados y se pierda la más pequeña cantidad de base lubricante recuperada



Fuente: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

Este proceso comienza con una sedimentación de mínimo 3 días lo cual garantizara que las partículas más grandes, luego de esto se adiciona el solvente , el cual se dejara a especificaciones futuras del siguiente objetivo , tendremos que tener en cuenta la mezcla en cantidades adecuadas, y tener una fase completamente miscible de base lubricante , luego de esto se agitara la mezcla por un tiempo ya analizado en bibliografía, luego se deja sedimentar de nuevo por 24 horas o según sea el caso , las impurezas se van según sea la gravedad ,luego se lavan los lodos usando otro solvente , esto remueve el 95 % de aceite presente en el lodo luego e realiza el peso de ambos y se recupera el solvente por destilación para reciclaje.

3.8 TABLA COMPARATIVA PROCESOS DE RE-REFINACION

Para poder hacer una selección adecuada de los procesos se elabora una tabla comparativa en donde se relacionan los diferentes procesos y se evalúan diferentes criterios de selección.

Tabla 20 tabla comparativa para selección de procesos.

Criterio		Enfoques				
Proceso	K.T.I	MOHAWK	PROP	IFP	ACIDO-ARCILLA	SOLVENTE-ARCILLA
Características	Este proceso tiene un porcentaje de rendimiento muy alto cuanto a aceites del 82% Con un porcentaje de aceite recuperado, y porcentaje de aditivos como desecho que puede ser vendida.	Este proceso es una mejora del K.T.I con una fase extra en un pretratamiento a los aceites usados para eliminar suciedad extra para evitar daños en la hidrogenación y la maquinaria que destila el producto en la tercera fase, permite que los equipos no sean limpiados frecuentemente	Este tiene un pretratamiento especial usando sulfato de amoniaco para separar los fosfatos producidos y eliminando varias impurezas en el aceite, luego se hace pasar por una arcilla especial que absorbe estos fosfatos de sus ventajas es que no requiere destilación al vacío y es un proceso más limpio	Este proceso usa como agente destilan té propano líquido, se utiliza en destilerías de petróleo, como procesos de destilación para un craqueo catalítico, juntos a lechos catalíticos	Este es un proceso simple pero eficaz utiliza una evaporación como un pretratamiento para eliminar compuestos metálicos. Luego de esto se usa un proceso de filtración con arcillas especializadas luego se sedimenta y con ácidos el lodo producido termina retirado suciedades con un 85% de rendimiento	Este último proceso toma todo lo de su predecesor el proceso arcilla peor lo mejora de una manera, más óptima al usar ácidos produce contaminantes en este caso usaremos un solvente, que dará una forma de retirar el 14 y 18% extra de aceite usado para un rendimiento de base lubricante mayor

Fuente. elaboración propia

A través de la tabla anterior relacionando toda la información posible se determinó que los dos mejores procesos para el desarrollo de este trabajo de grado será el proceso de ácido arcillo y el proceso de arcilla solvente ya que en cada ítem se

ajusta mejor para nuestro proceso de recuperación de bases lubricantes en equipos materia prima y tiempo disponible

Tabla 17 Criterios relevantes para la selección de proceso

Criterios	Justificación
Costos y recursos	Presupuesto acorde para la realización del proyecto.
Tiempo empleado	Aprovechamiento de recursos en el menor tiempo por insuficiencia de instalaciones apropiadas para el complemento del proyecto
Eficiencia	Estimación de cantidades necesarias de material inicial para su alta transformación en producto de buena calidad.
Disponibilidad de espacio	Espacio suficiente para implementación de los experimentos con todos los requerimientos técnicos posibles
Peligrosidad	Buen manejo y control de procesos acorde a la reglamentación: emisiones, olores, quemaduras, derramamientos.
Facilidad de control	Disposición de control de variables en tiempos estimados para determinar el avance del proceso y detectar posibles fallas.
Facilidad de mantenimiento	Factible casos de contaminación de materias primas o en etapas del proceso, limpieza de maquinaria y equipos para evitar la entrada de contaminación.
Disponibilidad de materiales	Facilidad de adquisición de materiales iniciales cumpliendo con la fecha estipulada de entrega del producto final.

Fuente.elaboración propia

En la selección del proceso de recuperación se tiene en cuenta diferentes ponderaciones para escoger el más indicado y adaptado a nuestras necesidades, aun así, las de menor ponderación que se encontraran más adelante no restan importancia a la totalidad del proceso y no se deben apartar del proceso.

Tabla 18. Alternativas para sistemas de re refinación de aceites

Alternativas	
1	Método K.T. I
2	Método MOHAWK
3	Método PROP
4	Método ACIDO-ARCILLA
5	Método I.F. P
6	Método ARCILLA-SOLVENTE

Fuente. elaboración propia

Luego del establecimiento de criterios, se toma el método multicriterio de selección de decisión. Este método seleccionado es el Pugh, su nombre lo toma de su creador británico Stuart Pugh, quien fue un reconocido ingeniero de diseño.

La matriz de Pugh³⁸ es una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones mediante un arreglo multidimensional, a través de una selección ponderada o convergencia controlada. Este método se utiliza para comparar lógicamente diferentes opciones basadas en criterios predefinidos y en el modelado de preferencias. Se asignó un valor puntual a cada criterio, considerando la importancia que tenga sobre los demás criterios, la puntuación se realizó en forma de símbolo, ya sea una puntuación positiva, negativa o neutral. Luego se evaluó una sumatoria de los valores positivos, negativos y neutros y se multiplicaron por el factor de importancia del criterio, siendo el valor máximo de 3, de esta forma se obtuvo una salida numérica³⁹

Esto con el objetivo de obtener un resultado comparable numérica y realizar una elección de uno o más procesos según los valores obtenidos en la suma y resta de negativos y positivos, con el pondera miento de estos obtendremos los procesos que mejor de aplican a la experimentación posterior.

³⁸ Pugh, S. Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. Addison-Wesley.1991.

³⁹ Ibid.

Tabla 19 Matriz de selección de proceso de re-refinación

CRITERIOS	Clasificación (1-3)	ALTERNATIVAS					
		1	2	3	4	5	6
EFICIENCIA	3	+	0	+	+	+	+
DISPONIBILIDAD ESPACIO	DE 2	-	-	0	0	-	+
FACILIDAD DE CONTROL	1	-	+	+	-	-	-
FACILIDAD MANTENIMIENTO	DE 1	-	-	+	+	+	+
TIEMPO EMPLEADO	3	-	-	-	+	+	+
COSTOS Y RECURSOS	3	+	+	+	+	-	+
DISPONIBILIDAD MATERIALES	DE 1	+	-	-	-	-	+
PELIGROSIDAD	2	-	-	-	-	+	-
TOTAL	16						
Suma de positivos		3	2	4	4	4	6
Suma de negativos		5	5	3	3	4	2
Suma de neutros		0	1	1	1	0	0
Suma ponderada de positivos		6	6	5	11	7	5
Suma ponderada de negativos		4	4	7	7	5	2
TOTAL		2	2	2	4	2	3

Fuente. elaboración propia

En función de la matriz de selección se denota que el proceso numero 6 arcilla-solvente y el proceso numero 4 arcilla – acido son los que tienen la mejor ponderación ajustada a los recursos y necesidades del proyecto, así que se tomarán estos dos para dar inicio al siguiente objetivo y el desarrollo de la metodología experimental.

Los criterios que se tomaron se explicarán de la siguiente manera

3.9 MATRIZ PUGH

El resultado en cada ítem según su importancia y el proceso a realizar como primer ítem tenemos la eficiencia el cual es el que tiene mayor puntuación en la matriz donde todos tiene un punto positivo exceptuando el numero dos métodos mohawk ya que este tiene una eficiencia lenta debido a que es un proceso largo con patentes protegidas aun a diferencia de los otros procesos que tienen una eficiencia alta.

La disponibilidad de espacio se tiene en cuenta ya que muchos procesos requieren de equipos de altos diámetros y peso en cambio los métodos de arcilla solvente y arcilla acido a nivel planta piloto necesitan equipos de un diámetro menor por eso se le da estos dos puntos positivos.

La facilidad de control se tiene en cuenta en todo aspecto desde manejo de residuos recirculación del proceso y posibles adversidades que se tengan esto se puede ver que los mejores son el 2 y 3 debido a su alta tecnología y proceso digitalizados en equipos de tecnología de punta.

En la facilidad de mantenimiento se denota que los 3,4,5,6 al no tener equipos de mantenimiento tan costosos y modernos como el 2 u obsoletos como el uno permite un fácil lavado, secado y mantenimiento en sí mismo después de que los equipos fueran usados.

El tiempo empleado también se reduce en los procesos 4,5,6 ya que estos tendrán un tiempo de reacción rápido a comparación de los procesos más modernos o más antiguo es algo que se espera tenga a nivel planta piloto para que el proceso sea económicamente viable

En costos y recursos todos destacan a que el recurso de materia prima es una sustancia residuo. La disponibilidad de materiales es negativa en la mayoría ya que usan ácidos controlados o solventes de patente, así como en este casi el 4 usa ácidos sulfúricos los cuales muy controlado en Colombia.

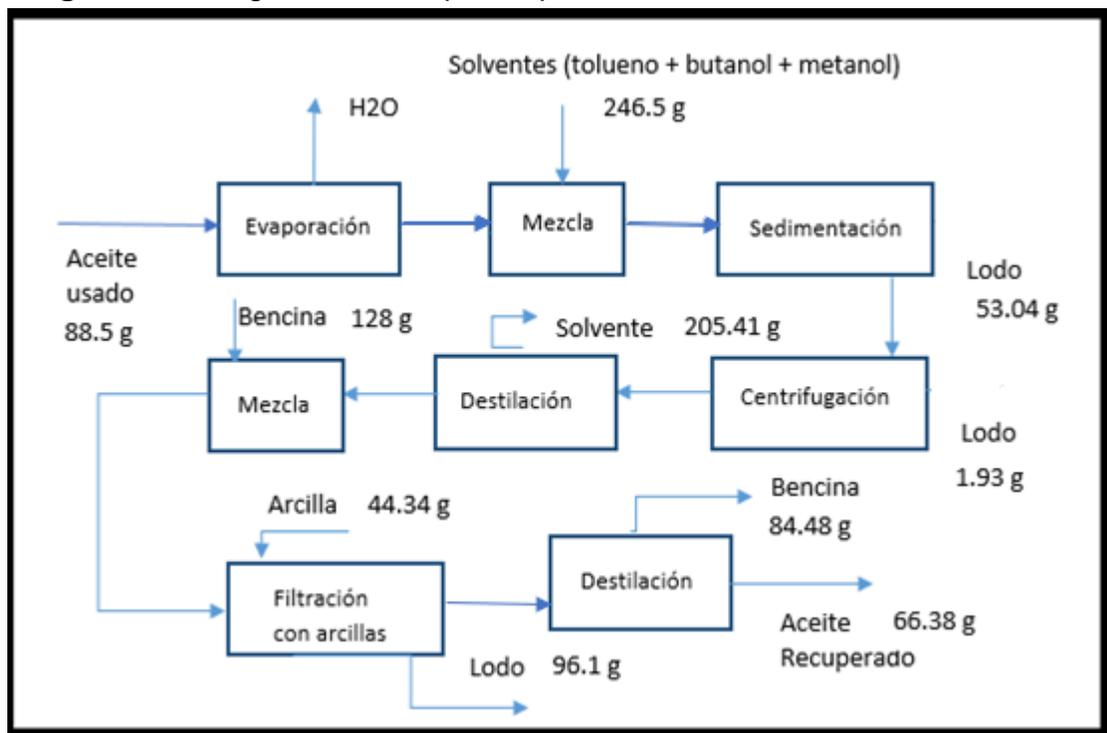
La peligrosidad se encuentra en todos los procesos por el uso de solventes y ácidos entre otros o el manejo de aceites usados.

4. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

Durante este apartado se va desarrollar la metodología para el desarrollo experimental de los procesos seleccionados (acido/arcilla y arcilla/solvente) a partir de la tabla comparativa y la matriz Pugh desarrolladas en el apartado anterior.

4.1 METODOLOGÍA PROCESO ARCILLA / SOLVENTE

Diagrama 6: Diagrama de bloque de proceso arcilla/solvente

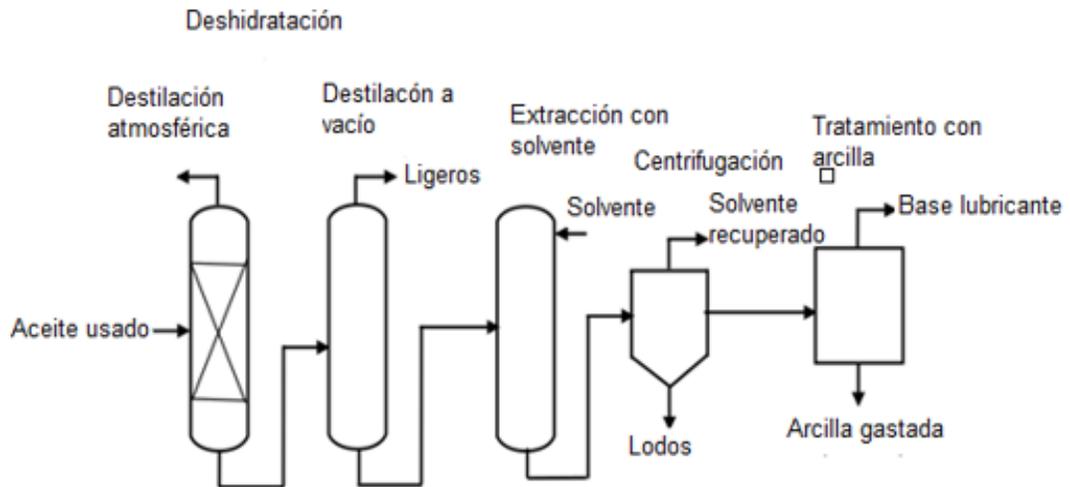


Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el artículo *“Recycling of used engine oil by different solvent”* de Doaa I. Osman, Sayed K. Attia, Afaf R. Taman para la revista *“Egyptian Journal of Petroleum”*, se ha encontrado que la extracción de solventes seguida de la adsorción es uno de los procesos competitivos para el reciclaje del aceite lubricante usado. En donde explican que el disolvente elegido debe tener máxima solubilidad para aceite base y mínimo para aditivos y materias carbonosas. La extracción de solventes seguida de la adsorción es un proceso que aumenta el ciclo de los aceites lubricantes de desecho. Su objetivo es conservar los recursos naturales y recuperar (en lugar de destruir) la base lubricante. Esta es una tecnología limpia, en su mayoría atractiva y muy usada a nivel mundial. El disolvente se recupera por destilación por motivos de reciclaje. El objetivo clave de este proceso es disminuir

el porcentaje de impurezas contenidas en el aceite usado, mediante la extracción con solventes adecuados. También estudian diferentes parámetros, es decir, la proporción de solvente a aceite, condición de extracción y tipo de solventes que funcionan como guía para realizar adecuadamente el desarrollo experimental. Se estableció una configuración a escala de laboratorio para la refinación del aceite usado como se muestra en la imagen 16

Imagen 16 Proceso solvente – arcilla



Fuente: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

El aceite usado fue recolectado por la empresa Lubrisol de Colombia Ltda. Los aceites recolectados se mezclaron para representar un espectro completo del aceite lubricante usado, el cual fue depositado en un tambor con una capacidad de 208 L. como se muestra en la imagen 17

Imagen 17: Recolección de primer lote de aceite usado en tambor 208 litros



Fuente. elaboración propia

Para dar comienzo al desarrollo experimental se investiga en las diferentes bases de datos, las cuales son suministradas por la Universidad de América como: Knovel, Science Direct, One Petro, entre otras, para recolectar la mayor información posible a cerca de los procesos seleccionados como: tipos de solvente usados, precio, proporciones de mezcla entre otros criterios importantes, por ello se tuvo en cuenta dos artículos en los que se relacionaban estos criterios para el proceso de recuperación, el primero de ellos **“Recycling of used engine oil by different solvent”** elaborado por *Doaa I. Osman* , *Sayed K. Attia*, *Afaf R. Taman* en el año 2017 y el segundo **“Re-refining of Used Lube Oil, II- by Solvent/Clay and Acid/Clay-Percolation Prozesse”** elaborado por *Eman A. Emam*, *Abeer M. Shoaib* en el año 2012 ya que de esta forma se tiene una guía para desarrollar de manera satisfactoria el proceso experimental.

De acuerdo al artículo **“Recycling of used engine oil by different solvent”** los solventes usados son una mezcla de ellos como se muestra en la imagen 18

Tabla 20. Solubilidad y constante dieléctrica de solventes

muestra de solvente	solubilidad (g / m3)	constante dieléctrica
Tolueno + butanol y metanol (A)	23,2	6,994
Tolueno + butanol y etanol (B)	22,2	6,993
Tolueno + butanol e isopropanol (C)	21,5	6,992

Fuente. elaboración propia

De acuerdo con la tabla 20 la mezcla de disolventes A tiene mayor solubilidad y constante dieléctrica. Esto quiere decir que tiene la máxima eficiencia para la eliminación de lodos. El metanol elimina los componentes pesados más que las otras dos mezclas de disolventes debido a que su constante dieléctrica es más alta. Una medida experimental importante del proceso de re-refinación de extracción con solvente normalmente está representada por la cantidad de lodo removido del aceite usado. Esto puede expresarse como el porcentaje de remoción de lodo (PSR), que es la masa de lodo removido en gramos / 88.5 g de aceite usado.⁴⁰

Los resultados experimentales del artículo indican que el mayor efecto para la capacidad de eliminación de lodos de las mezclas de disolventes A, B y C, como se muestra en la tabla 21 es la mezcla A ya que eliminó el porcentaje máximo de lodo (52%) seguido de la mezcla B (36.7%) y la mezcla C eliminó un porcentaje menor (18.9%).

Tabla 21: Efecto de diferentes mezclas de disolventes sobre el refinado de aceites usados

	A	B	C
Refinado wt%	48	63,3	81,1
Lodos wt%	52	36,7	18,9
Color	Amarillo	negro	negro

Fuente. elaboración propia

De acuerdo con lo analizado y los resultados obtenidos por *Doaa I. Osman, Sayed K. Attia, Afaf R. Taman* se observa que la mezcla que mejor se ajusta para la extracción por solvente es la mezcla A por lo tanto se toma esta mezcla de tolueno, butanol y metanol para la experimentación de este proyecto. El precio y punto de ebullición de los diferentes solventes se muestra en la tabla 22

⁴⁰*Doaa I. Osman, Sayed K. Attia, Afaf R. Taman (2017) "Recycling of used engine oil by different solvents"*

Tabla 22: Punto de ebullición y precio de solventes

Solvente	punto de ebullición	precio	cantidad (Litros)
Tolueno	110,6 °C	\$ 322.000	1
Butanol	117,7 °C	\$ 286.000	1
Etanol	78,37 °C	\$ 82.000	1
Metanol	64,7 °C	\$ 47.000	1
Isopropanol	82,5 °C	\$ 68.000	1

Fuente.elaboración propia

Para dar inicio al desarrollo experimental, se hace un pretratamiento, el aceite usado es sometido a filtración atmosférica con el fin de separar las partículas que estén suspendidas en el aceite, ya sea polvo, metales de desgaste o aditivos desgastados. Esto se hace usando un embudo con un papel de filtro colocado en él, se deja durante 1 hora para completar la filtración de 88.5g. En la imagen 21 se puede apreciar el montaje de la filtración y las partículas retenidas en el papel filtro.

Imagen 21: Filtración de aceite usado Donde 1) Es la filtración atmosférica del aceite usado y 2) Es la retención de silicatos y metales en papel filtro



Fuente. elaboración propia

El primer paso de la refinación implicó la eliminación del agua contenida en el aceite usado, esto se hace por medio de una evaporación atmosférica. En donde el aceite usado se somete a calentamiento hasta elevar su temperatura a 200 °C, esto con el fin de eliminar tanto el contenido de agua como cadenas de hidrocarburos ligeros, como se puede apreciar en la imagen 22

Imagen 22: Evaporación atmosférica de contenido de agua



Fuente. elaboración propia

El aceite deshidratado llamado aceite de alimentación se recolectó en un matraz y se envió a los siguientes pasos para el tratamiento. Los siguientes pasos incluyeron la extracción con solvente seguida del tratamiento con arcilla.

El proceso de extracción con disolvente seguido del tratamiento de blanqueo con arcilla al aceite de alimentación, se realizó de acuerdo con la investigación realizada por *Eman A. Emam, Abeer M. Shoaib* en el artículo ***“Re-refining of Used Lube Oil, II- by Solvent/Clay and Acid/Clay-Percolation Processe”***. Para la extracción con solvente se mezcla 100ml de tolueno, 100ml de butanol y 100ml de metanol y se deja en agitación durante 10 min para lograr una correcta homogeneización de la mezcla, como se muestra en la imagen 23

Imagen 23: Mezcla de solventes y agitación en agitador magnético Donde 1) Son los solventes Metanol, Etanol, Butanol (100 ml c/u) y 2) Es la agitación en agitador magnético con control de temperatura a 25 °C



Fuente. elaboración propia

Esta mezcla de solventes es de fácil recuperación, debido a que el solvente con punto de ebullición más alto es el butanol de 117.7 °C como se muestra en la tabla 21, Esta temperatura nos da el punto mínimo al cual la temperatura se debe elevar para hacer la recuperación de la mezcla de solventes. El aceite de alimentación se mezcla con el disolvente a 25°C y presión atmosférica. La relación de disolvente a aceite fue de 3:1, ya que esa fue la relación con mejores resultados en el artículo de investigación realizado por *Doaa I. Osman, Sayed K. Attia, Afaf R. Taman*, es decir que, para una muestra de 100 ml de aceite usado, se usa 300 ml de solvente. Para realizar una buena extracción se utiliza un agitador magnético para mantener la mezcla homogénea durante 1 hora y la temperatura se controló con la ayuda de la plancha térmica el total de solventes será 246.5 g Ver imagen 24.

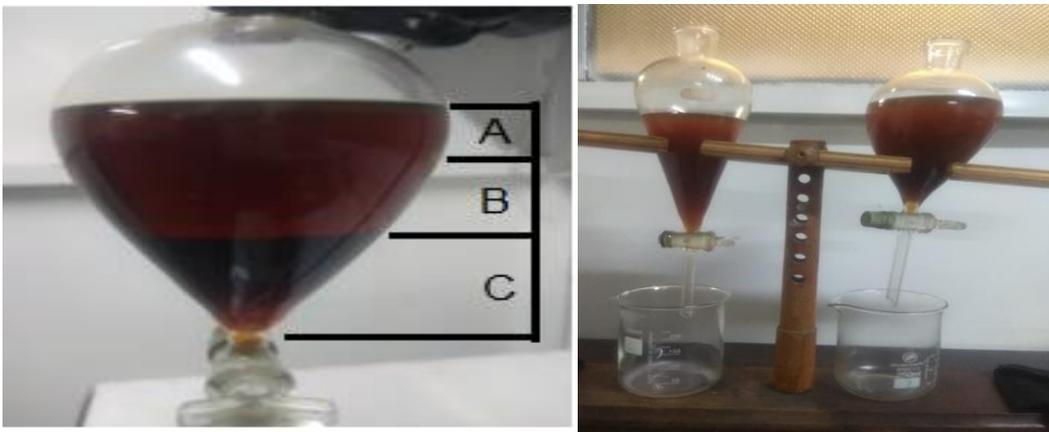
Imagen 24: Mezcla aceite de alimentación con Solventes de extracción para la remoción de lodos y metales de desgaste Donde 1) Es el aceite usado de alimentación y la mezcla de solventes para la extracción y 2) Es la agitación por 1 hora del aceite y la mezcla de solventes en agitador magnético



Fuente. elaboración propia

La mezcla se sometió a una sedimentación suficiente durante 24 horas y gracias a las diferentes densidades de los compuestos involucrados en la mezcla se logra una separación. Como podemos apreciar en la imagen ver imagen 25 La mezcla se separó en 3 fases, sólido / líquido / líquido en donde la fase sólida son los lodos removidos por los solventes es decir los componentes más pesados como polvo y metales y las dos líquidas son los solventes de extracción y el aceite respectivamente, la cantidad de lodos removida fue 53.04g y esto es debido a que los aceites usados recogidos provienen de ensayos de laboratorio o desperdicio en producción.

Imagen 25: Extracción con solvente y decantación en donde A) Es el aceite refinado, B) es la mezcla de solventes de extracción y C) Es el lodo removido componentes más pesados como polvo y metales



Fuente. elaboración propia

Para obtener una mejor separación se liberó de cualquier partícula suspendida mediante centrifugación como se muestra en la imagen 26 en este paso se obtiene un adicional de 1.93 g de lodos separados de la muestra

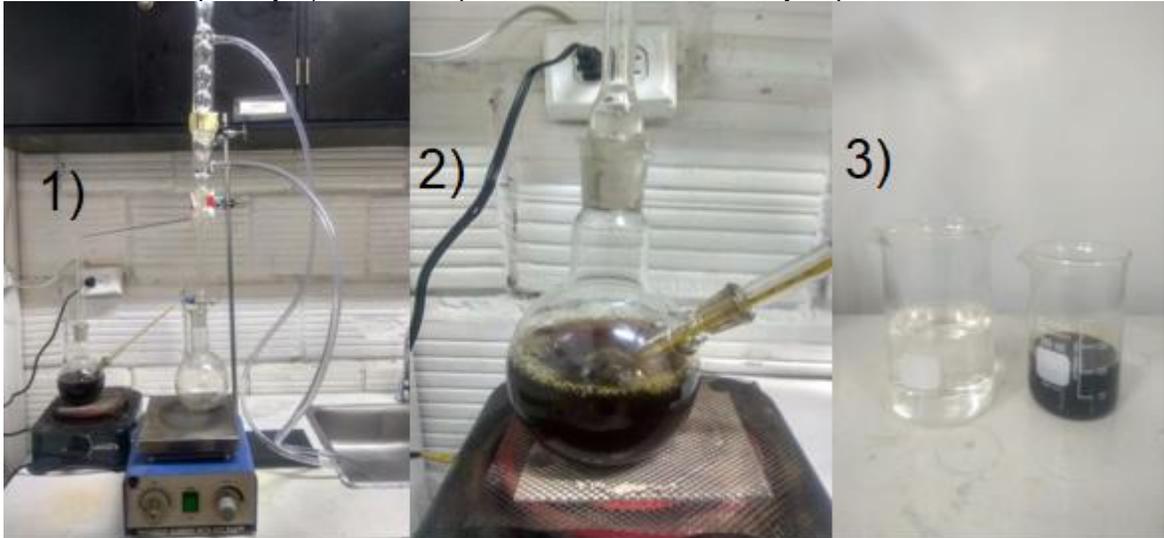
Imagen 26: Centrifugación de mezcla para separación de partículas



Fuente. elaboración propia

La mezcla de disolventes se recupera por medio de una destilación atmosférica, calentando la mezcla hasta una temperatura de 124°C, ver imagen 27 La cantidad de solvente recuperado fue de 205.41g lo que quiere decir que el porcentaje de recuperación fue de 83.33%.

Imagen 27: Destilación atmosférica para recuperación de solventes. Donde 1) Es la destilación de la mezcla para la recuperación de solventes de extracción, 2) Es el momento en el que la mezcla comienza a evaporar y 3) Es la recuperación de los solventes y separación del aceite refinado



Fuente. elaboración propia

En la etapa de tratamiento con arcilla, se mezclaron 100 ml del aceite extraído con un disolvente de éter de petróleo o bencina de petróleo (128g) en una proporción de 1:2, respectivamente esto con el fin de hacer mejor una extracción. Ver imagen 28

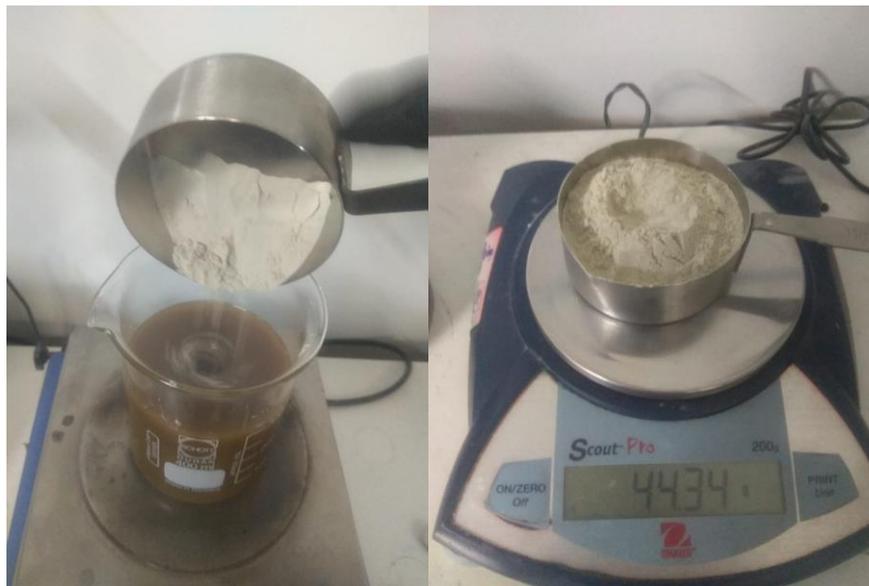
Imagen 28: Mezcla de bencina de petróleo (200 ml) y aceite extraído (100 ml)



Fuente. elaboración propia

Luego se mezclaron con una cantidad medida de arcilla (20% p / p). Por lo tanto, se pesaron 44.3 g de arcilla equivalente al 20% en peso de la muestra de aceite extraído. La arcilla utilizada es una bentonita Perform 5000, un adsorbente con una capacidad de remoción de color, clorofila y compuestos prooxidantes y que ayuda al mismo tiempo a tener una excelente filtración, Buena remoción de color en todo tipo de aceite. La mezcla se realizó a una temperatura ambiente de 30 ± 2 ° C en un agitador magnético con agitación constante ver imagen 29. El tiempo de mezcla fue una hora. Por tiempo de ejecución del proyecto y disponibilidad de laboratorio solo se realiza un ensayo.

Imagen 29: Mezcla con arcilla Perform 5000



Fuente. elaboración propia

El aceite tratado se separó por sedimentación y luego se filtró para eliminar la arcilla, ver imagen 30 podemos observar que la mezcla se separó en dos fases, una líquida

la cual contiene el aceite refinado con solvente y una fase sólida que contiene la arcilla de blanqueo. Junto a una cantidad de lodo de 96.1 g de lodos filtrados ayuda a limpiar y refinar aún más el producto

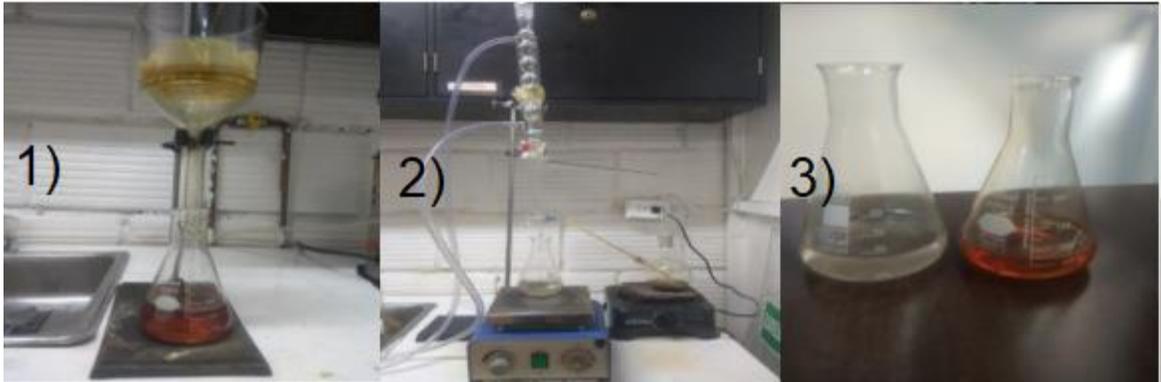
Imagen 30: Extracción y blanqueo con arcilla Perfom 5000 en donde A) Es la fase líquida mezcla de Bencina y aceite extraído y B)



Fuente.elaboración propia

Para lograr la recuperación del disolvente, se separó del aceite tratado por medio de una destilación atmosférica, en donde la mezcla de aceite/solvente se sometió a una temperatura entre 40 – 60 °C a la cual la bencina de petróleo alcanza su punto de ebullición ver imagen 31. La cantidad recuperada de solvente fue de 132 ml es decir el 66%. Lo que nos indica que hay una pérdida de este en el ambiente y en la extracción con arcilla.

Imagen 31: Destilación atmosférica y recuperación de solvente en donde 1) Es la filtración de la mezcla para retención de arcilla Perform 5000 Es la destilación atmosférica de la mezcla, 2) Es la destilación atmosférica de la mezcla y 3) Es la recuperación de la bencina y el aceite refinado final



Fuente.elaboración propia

Como se aprecia en la imagen 31 el aceite base recuperado tuvo un cambio significativo en color gracias a la arcilla bentonita, la cual tiene un poder de remoción alto, sin embargo, para establecer si el aceite recuperado cumple con los estándares de calidad como menciona Hanna Colombia en su blog virtual⁴¹ se debe determinar las propiedades tales como viscosidad, densidad, punto de chispa, punto de inflamación etc. como se hizo en el capítulo 2 esto con el fin de hacer una comparación de resultados entre el aceite usado, el aceite recuperado y un aceite virgen recuperando un total de 66.38g de aceite recuperado y un total de 84.48 g de bencina recuperada.

4.2 ANALISIS Y RESULTADOS

Existe una forma de evaluar que tan efectivo es el proceso y es determinando las propiedades más importantes de un aceite base, como son: viscosidad, densidad y el contenido de metales, por lo tanto, se tiene en cuenta la norma técnica colombiana NTC 3382 que establece los requisitos que debe cumplir y los ensayos a los cuales se deben someter los aceites hidráulicos para aplicación en sistemas hidrostáticos.

4.3 PUNTO DE CHISPA Y PUNTO DE INFLAMACIÓN

El punto de chispa es la temperatura a la que un líquido combustible debe ser calentado para emitir suficientes vapores y formar momentáneamente una mezcla inflamable con el aire, cuando una pequeña flama es aplicada bajo condiciones

⁴¹ SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. Base de datos SAE J-300. institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.sae.org/>

especificadas. Mientras que el punto de inflamación es la temperatura a la que el aceite comienza a arder y mantiene la combustión.⁴²

Para el análisis se tomó la muestra de 100 ml del aceite recuperado y se colocó en la copa de acero, se empezó a calentar en el controlador de punto de inflamación de acuerdo a la norma ASTM D-92, en la imagen 32 se detalla que el aceite llega a su punto de inflamación cuando este mantiene la llama por más de 5 segundos, se alcanzó el punto de chispa cuando la temperatura llegó a 150°C y el punto de inflamación cuando se aumentó a 198°C. En la tabla 22 se observa los valores de un aceite virgen y del aceite recuperado.

Imagen 32: Determinación de punto de chispa e inflamación



Fuente: elaboración propia

Tabla 23: Valores de punto de chispa e inflamación de aceites base y aceite recuperado

Aceite	Punto de chispa °c	Punto de inflamación °c
PL	~180	~200
PM	~200	~230
NM	~230	~260
RECUPERADO	150	198

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla anterior se puede concluir que los valores de punto de chispa y de inflamación del aceite recuperado son cercanos a los de una base parafínica

42 ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D-92*).

liviana y que de acuerdo a la norma técnica colombiana NTC 3382 se encuentra dentro de los requisitos.

4.4 DENSIDAD.

El análisis se realizó de acuerdo a la norma ASTM D-1298 Método de prueba estándar para determinar la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo y los productos líquidos derivados del petróleo mediante el Método de densímetro⁴³

Imagen 33: Densímetro Boeco germany 28cm (0 – 1) g/cm³



Fuente.elaboración propia

En la tabla 24 podemos observar los valores de densidad de las bases lubricantes vírgenes de la empresa soporte y el valor obtenido para el aceite recuperado.

PL, de sus siglas Parafinico liviano
PM, de sus siglas Parafinico medio
NM, de sus siglas naftenico medio

Tabla 24: Valores de densidad de bases vírgenes y aceite recuperado

Aceite	Densidad (g/ml)
PL	0,87
PM	0,9
NM	0,905
RECUPERADO	0,888

Fuente. elaboración propia

A partir de estos datos se puede ver que el valor de densidad obtenido por el densímetro en el aceite recuperado es muy cercano a los valores de un aceite base virgen estando entre un aceite parafínico ligero y mediano⁴⁴.

4.5 GRAVEDAD API

La gravedad API, desarrollada por el instituto estadounidense del petróleo, es la forma de medir la densidad la cual describe que tan pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua.

Generalmente, un mayor valor de gravedad API en un producto de refinería representa que este tiene un mayor valor comercial. Esto básicamente debido a la facilidad (operacional y económica) de producir destilados valiosos como gasolina, jet fuel y diésel con alimentaciones de crudo livianos y a los altos rendimientos de los mismos. Esta regla es válida hasta los 45 grados API, más allá de este valor las cadenas moleculares son tan cortas que hacen que los productos tengan menor valor comercial.

EL petróleo es clasificado en liviano, mediano, pesado y extra pesado, de acuerdo a su medición de gravedad API.

La ecuación usada para obtener la gravedad API es la siguiente:

$$GravedadAPI = \left(\frac{141.5}{Gravedadespecifica} \right) - 131.5$$

A partir de la densidad obtenida y usando la ecuación 3.3 se obtiene la gravedad API para el aceite usado calculado de la siguiente manera de acuerdo a la norma ASTM D-287 “Método de prueba estándar para determinar la gravedad API del petróleo crudo y productos derivados del petróleo (Método del densímetro)”

$$GravedadAPI = \left(\frac{141.5}{0.888} \right) - 131.5 = 27.847 \text{ } ^\circ \text{ API}$$

En la tabla 24 se clasifican los aceites de acuerdo a su gravedad API

PL, de sus siglas Parafinico liviano

PM, de sus siglas Parafinico medio

NM, de sus siglas naftenico medio

API, de sus siglas American Petroleum Institute

Tabla 24: Clasificación de aceites de acuerdo a su gravedad API

Tipo	Gravedad api (°api)
crudo liviano	> 31,1
crudo mediano	22,3 - 31,1
crudo pesado	10 - 22,3
crudo extra pesado	< 10

Fuente.elaboración propia

Con respecto a la tabla y al valor de gravedad API obtenido (27,847) se puede decir que el aceite usado se encuentra en la clasificación API como un crudo mediano ya que el valor obtenido se encuentra en el rango 22,3 - 31,1 ° API.

4.6 VISCOSIDAD

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un lubricante. De hecho, buena parte de los sistemas de clasificación de los aceites están basados en esta propiedad.

La viscosidad se define como la resistencia de un líquido a fluir. Esta resistencia es provocada por las fuerzas de atracción entre moléculas del líquido.

Esta prueba se trata de medir el tiempo necesario para que cierto volumen de aceite fluya a través del capilar de un viscosímetro Cannon – Fenske de vidrio calibrado, bajo la presión de una determinada columna de líquido a una temperatura exactamente controlada. En la imagen 34 podemos observar el viscosímetro Cannon Fenske utilizado para la medición de viscosidad a 40 y 100 °C el cual está compuesto por un tubo con capilar y el tubo de ventilación, el reservorio, la bola de entrada y la bola de medición.

Imagen 34: Viscosímetro Cannon – Fenske calibrado referencia 350-30R

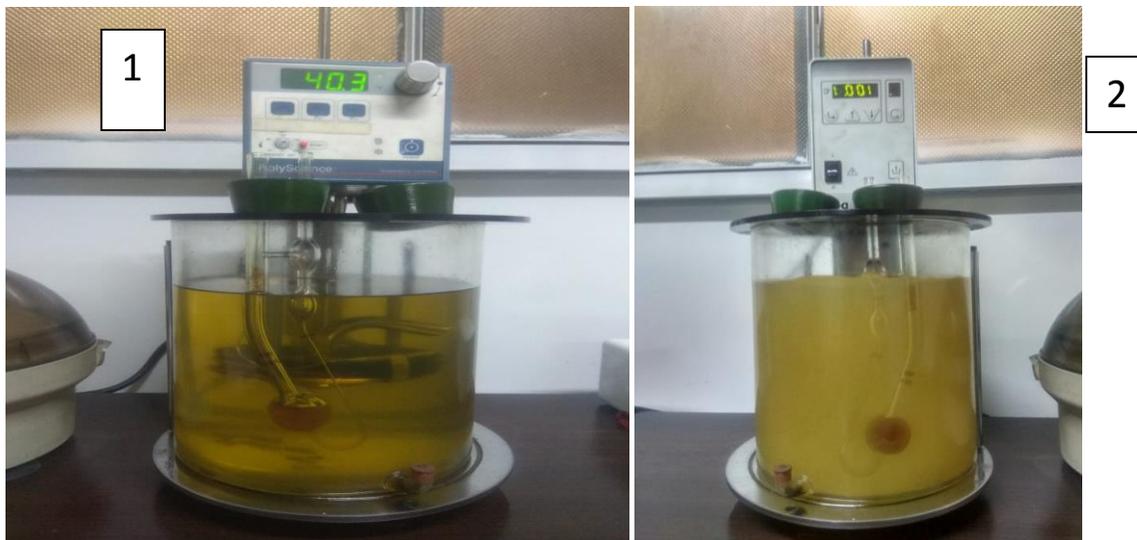


Fuente.elaboración propia

Para la medición de viscosidad se hace de acuerdo a la norma ASTM D445-06⁴⁵ “Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos (Cálculo de la Viscosidad Cinemática)” en donde se llena el reservorio del viscosímetro Cannon – fenske refencia 350-30R con la muestra de aceite usado, luego el viscosímetro se sumerge en un baño a temperatura constante de 40 °C como se ve en la imagen 35 durante 10 minutos hasta que el aceite usado llega a un equilibrio térmico. Se aspira por el tubo capilar con una pera de goma el aceite usado, hasta que el fluido pasa la marca superior de medida en el tubo capilar. Se toma el tiempo de paso entre la marca superior e inferior señaladas en el tubo capilar del viscosímetro. Para la medición a 100 °C se realizó el mismo procedimiento aumentando la temperatura del baño a 100°C y se dejó sumergido el viscosímetro por 15 min para lograr un equilibrio térmico y de esta manera obtener los resultados esperados evitando errores en la toma de resultados.

⁴⁵ ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. (*International Standard ASTM D445-06*).

Imagen 35: Medición de viscosidad en donde 1) Es la medición en baño a 40°C con controlador de temperatura Polyscience 2) Es la medición en baño a 40°C con controlador de temperatura Haake DC-3.



Fuente.elaboración propia

Para cada una de las mediciones se tomaron 3 tiempos esto con el fin de evitar errores a la hora de hacer el cálculo de viscosidad, haciendo un promedio entre los tiempos tomados para cada uno de los baños, el tiempo medido es el que tarda el aceite en pasar desde la marca superior de medida hasta la marca inferior, en las Tabla 27 y tabla 28 se observa los valores de tiempo obtenido en las mediciones a 40 y 100 °C respectivamente.

Tabla 27: Tiempo registrado para aceite recuperado

<i>Minutos</i>	<i>Segundos</i>	<i>Total (segundos)</i>
1	23.91	83.91
1	24.56	84.56
1	24.35	84.35
1	24.273	84.273

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Tiempo registrado para aceite recuperado

<i>Minutos</i>	<i>Segundos</i>	<i>Total (segundos)</i>
0	14.27	14.27
0	14.34	14.34
0	14.67	14.67
0	14.426	14.426

Fuente.elaboración propia

El cálculo de la viscosidad cinemática se puede obtener a partir de la ecuación que se muestra a continuación. En donde K es la constante del viscosímetro y t es el tiempo que tarda el fluido en pasar desde la marca superior de medición hasta la marca inferior.

$$\nu = K \times t$$

A partir de esta ecuación y con el promedio de tiempo de los valores tomados se puede realizar la operación para obtener la viscosidad de la muestra de aceite usado, los valores de la constante K para el viscosímetro Cannon – Fenske para 40 y 100 °C son 0.4815 y 0.4793 respectivamente.

$$\nu(40^{\circ}\text{C}) = 0.4815 \times \mathbf{84.273} = 40.578\text{cSt}$$

$$\nu(100^{\circ}\text{C}) = 0.4793 \times \mathbf{14.426} = 6.915\text{cSt}$$

Los datos obtenidos de viscosidad del aceite recuperado se comparan en la tabla 29 con los datos de base lubricante virgen.

Tabla 29: Tabla comparativa de viscosidad de bases lubricantes

ACEITE	VISCOSIDAD 40°C	VISCOSIDAD 100°C
PL	30 -40	5 -6
PM	80- 90	10 -12
NM	180 – 190	13 – 16
ACEITE RECUPERADO	40.578	6.915

Fuente.elaboración propia

De acuerdo a la tabla 29 se puede decir que el aceite recuperado se encuentra entre una base parafínica liviana y una parafínica mediana debido a que valor obtenido de viscosidad se encuentra entre los valores típicos de estas dos bases. Lo que nos indica que el aceite recuperado es una mezcla de aceites parafínico livianos y medianos.

4.7 ÍNDICE DE VISCOSIDAD

El índice de viscosidad es la constante física que determina la variación de viscosidad de un aceite lubricante respecto a la temperatura. Se tuvo en cuenta la norma ASTM D2270 – 93 “Práctica estándar para calcular el índice de viscosidad comprendida entre la viscosidad cinemática a 40 °C y 100 °C “

Debido a que la viscosidad cinemática medida para el aceite recuperado a 100° C es 6.915 cSt se busca el valor correspondiente a L y H en la tabla 30

Tabla 30: valores L y H para índice de viscosidad

<i>Visc. 100 °C (cSt)</i>	<i>L</i>	<i>H</i>
6,800	73,480	46,440
6,900	75,720	47,510
7,000	78,000	48,570

Fuente.elaboración propia

De acuerdo a la viscosidad 100°C medida al aceite usado el valor 6.915 cSt se encuentra en la tabla entre los valores 6,900 y 7,000 cSt Por lo tanto para obtener el valor buscado se hace una interpolación lineal y de esta manera se obtiene los valores de L y H para el aceite recuperado. Los valores fueron:

$$L = 76,062$$

$$H = 47.669$$

Luego de obtener estos valores se utiliza la ecuación 2.10.3 para halla el indicie de viscosidad del aceite recuperado.

$$VI = \frac{76.062 - 40.578}{76,062 - 47.669} = 124.975$$

El resultado obtenido es favorable ya que como bien se había hablado la viscosidad cambia con respecto a la temperatura y al tener un índice de viscosidad alto de 124.975 quiere decir mejor será el comportamiento del aceite cuando este sea sometido a altas temperatura

4.8 COLOR

La norma ASTM D-1500, es una escala de colores de un solo color y una dimensión que va desde un amarillo claro a un rojo intenso en dieciséis intervalos (unidades

de 0,5 a 8,0 en incrementos de 0,5 unidades). Los comparadores visuales pueden alcanzar una resolución de 0,5 unidades.⁴⁶ La determinación del color de productos derivados del petróleo se hace principalmente para fines de control de fabricación y es una característica de calidad importante, ya que el color es fácil de observar por parte del usuario del producto.

Para el análisis del aceite usado se tomó una muestra de 15ml en un tubo de ensayo y se colocó en el colorímetro Orbeco-Hellige imagen 36

Imagen 36: Colorímetro orbeco-hellige con discos de escalas de (0-5) y (5-8)

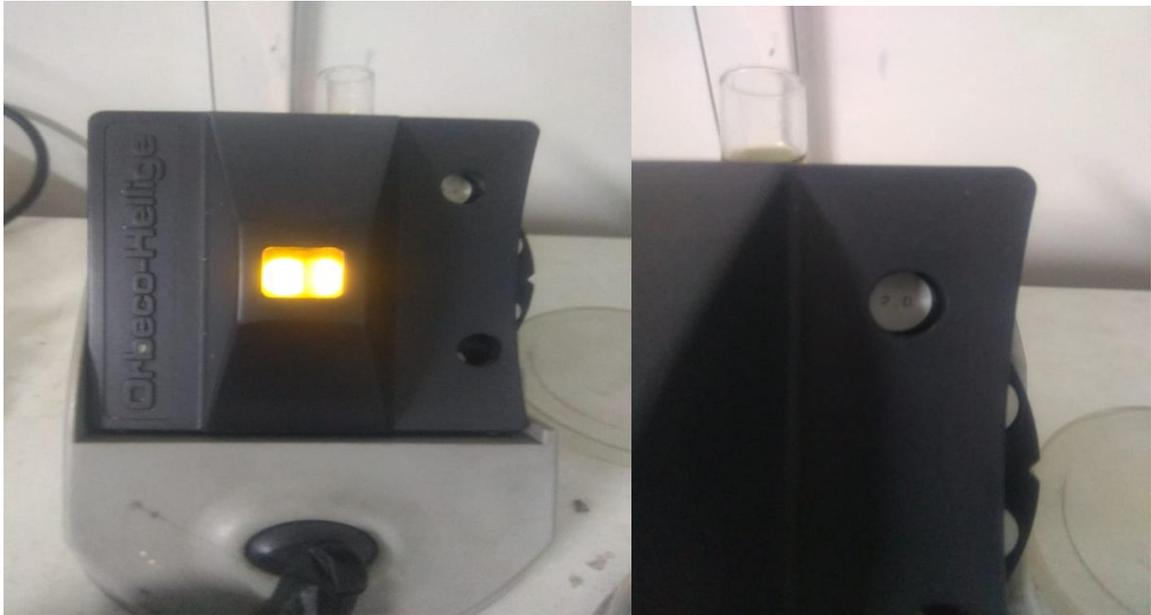


Fuente.elaboración propia

Para el análisis de color del aceite se coloca la muestra de aceite en la celda derecha de la parte superior del colorímetro luego se agrega el disco de color con escala de 0.5 hasta 5.0 en la abertura ubicada a la derecha del colorímetro. Se enciende la fuente luz y se comparan los colores en el detector. En la imagen 37 se puede observar y comparar el color del aceite usado con respecto a la escala del disco

⁴⁶ ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D6158 – 05*).

Imagen 37: Colorimetría para aceite recuperado en donde 1) Se aprecia el color amarillo arrojado por el equipo y por el aceite recuperado y 2) Es el valor de la escala en el disco de colores



Fuente.elaboración propia

Se observa que el color del aceite y del disco es el mismo en el valor de 2.0 un color amarillo claro. Las bases lubricantes tienen valores de color entre 0,5 y 2,0 lo que quiere decir que el aceite recuperado se encuentra entre los valores normales de bases vírgenes.

4.9 ANALISIS DE METALES

Esta propiedad es una de las importantes para el proceso de refinación ya que determina los niveles de metales de desgastes que son reglamentados en valores críticos y peligrosos véase tabla 15, ya que al refinarse podrían dañar más las partes móviles que lubricarlas, esta se convierte en una de las propiedades más importantes de los aceites recuperados, ya que gran parte del proceso de refinación se basa en eliminar estos metales en la base lubricante recuperada a continuación se muestra los resultados por espectrofotometría de absorción atómica.

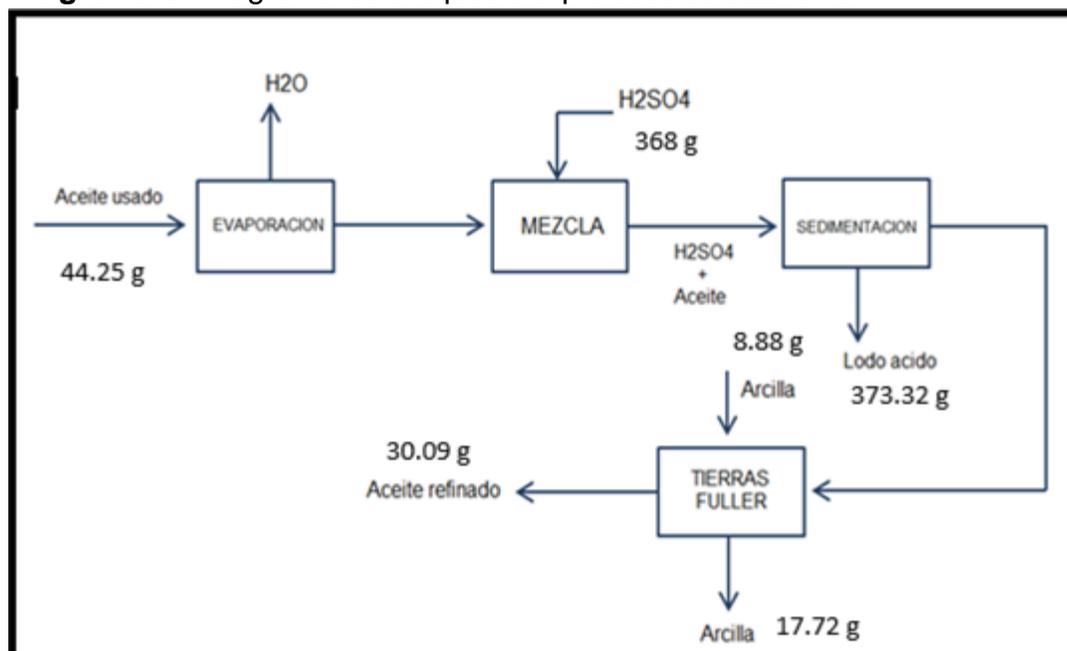
Tabla 31: Resultados metales de desgaste por absorción atómica en equipo Marca GBC Modelo SavantAA de aceite recuperado

ANALISIS	METODO	UNIDADES	RESULTADO
APARIENCIA	M1-001	N. A	2.0
COBRE	ASTMD-6595	ppm	0.0
HIERRO	ASTMD-6595	ppm	5.2
PLOMO	ASTMD-6595	ppm	0,2
CROMO	ASTMD-6595	ppm	0.0
ALUMINIO	ASTMD-6595	ppm	0.6
ESTAÑO	ASTMD-6595	ppm	0.5
SILICIO	ASTMD-6595	ppm	0.4

Fuente.elaboración propia

4.10 METODOLOGÍA PROCESO ACIDO/ARCILLA.

Diagrama 5: Diagrama de bloques del proceso ácido/arcilla

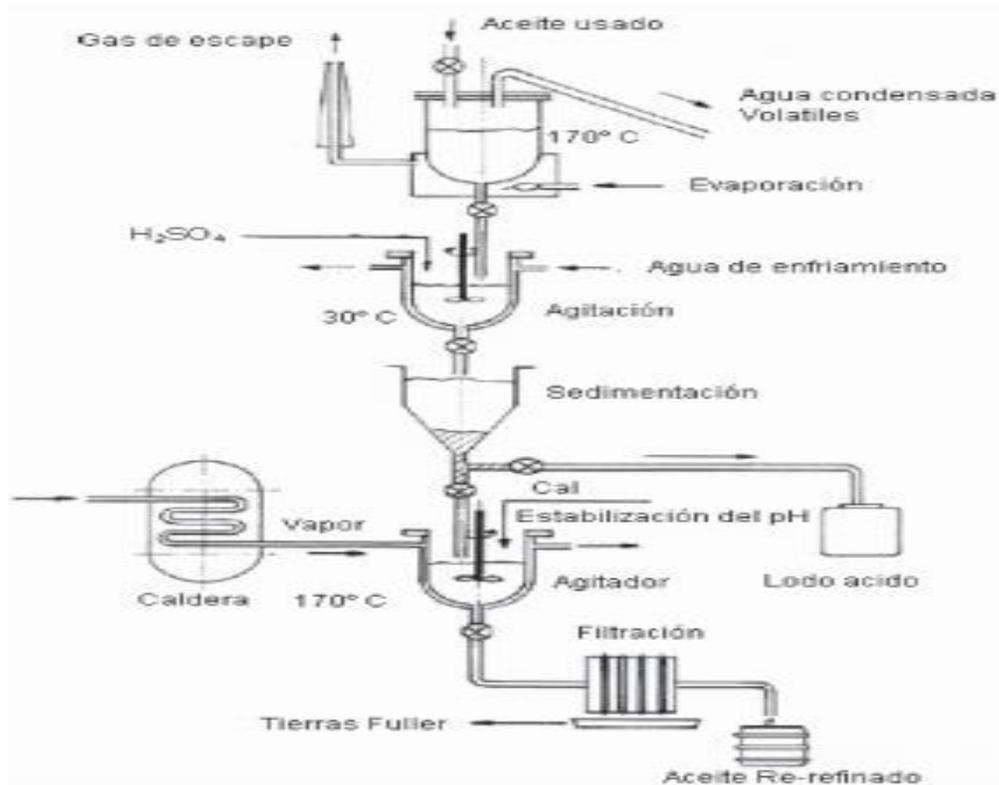


Fuente.elaboración propia

Entre las tecnologías de re-refinación: ácido/arcilla, destilación/arcilla, destilación/tratamiento químico o extracción con solventes, El procedimiento más

utilizado (90%) y el más económico es el ácido / arcilla⁴⁷. Se estableció una configuración a escala de laboratorio para la refinación del aceite usado como se muestra en la imagen 38

Imagen 38: Proceso ácido / arcilla



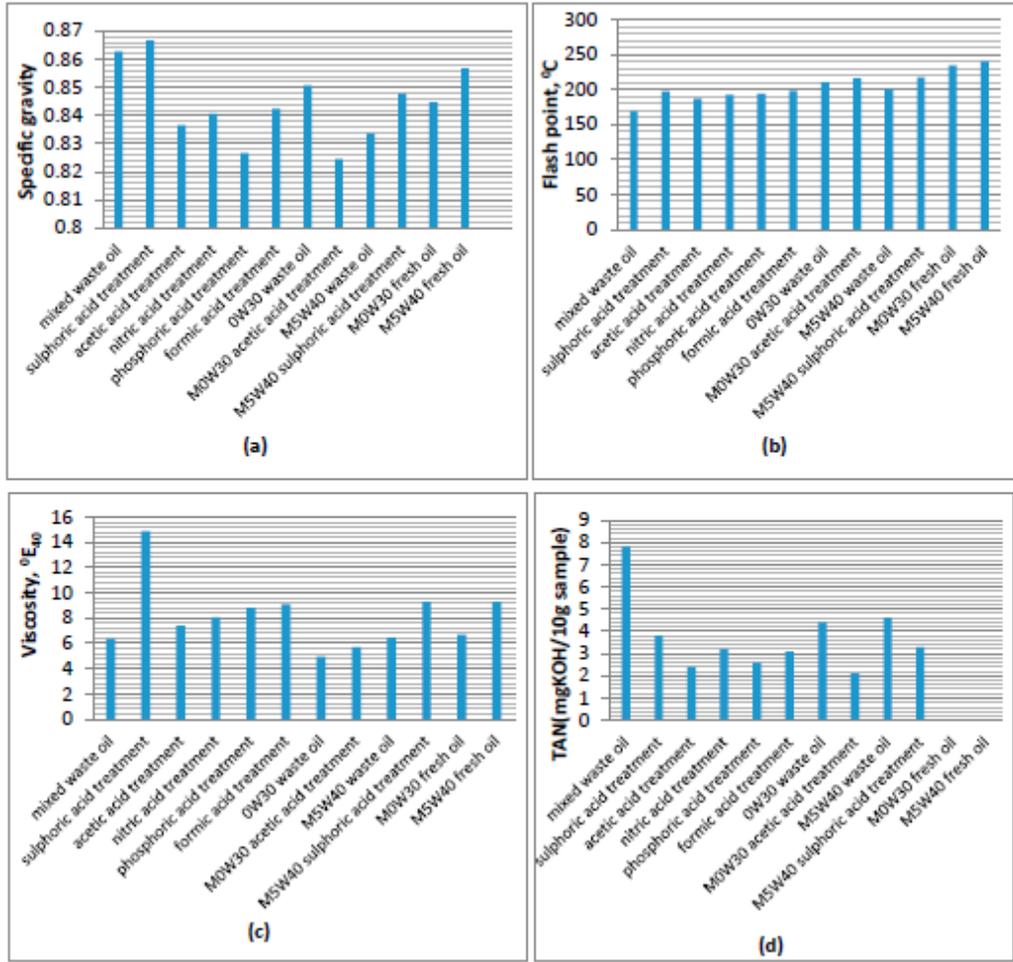
Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Base de datos institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.api.org/>

Según el artículo *“Some aspects of the regeneration of used motor oil”*, el tratamiento con ácido / aceite de arcilla consiste en los siguientes pasos: tratamiento con ácido para eliminar las encías, grasas, etc. Decoloración o decloración, neutralización, sedimentación, decantación y filtración. El objetivo principal en el artículo es el estudio y la comparación entre los diferentes ácidos utilizados como parte del proceso de tratamiento con ácido para aceite usado. Este estudio es esencial para poder escoger el ácido más adecuado para que se lleve a cabo en el desarrollo experimental de este proyecto.

En la figura 5 se muestra el efecto de diversos ácidos sobre las propiedades del aceite de desecho.

⁴⁷ Cornelia Stan, Cristian Andreescu, Marius Toma (2017) *“some aspects of the regeneration of used motor oil”*

Figura 5: Efecto de diversos ácidos sobre las propiedades del aceite de desecho



Fuente: Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Base de datos institucional [sitio web] Bogotá D.C 2019. Disponible en <https://www.api.org/>

Acorde a las gráficas mostradas en la figura 5 podemos observar que en términos de eficiencia y de acuerdo con Cornelia Stan, Cristian Andreescu, Marius Toma autoras del artículo el proceso con ácido sulfúrico fue el que arrojo mejores resultados en cuanto a gravedad específica y viscosidad, estas propiedades son importantes para la fabricación de aceites industriales, además el punto de inflamación del aceite tratado con ácido sulfúrico da próximo a 200 °C valor obtenido de la gráfica (b) de la figura 5 y cercano a los puntos de inflamación de bases vírgenes. Por lo tanto, para el desarrollo experimental del proyecto el ácido sulfúrico es usado como el ácido de tratamiento. Para el desarrollo experimental se tuvo en cuenta el artículo “Re-refining of Used Lube Oil, II- by Solvent/Clay and Acid/Clay-Percolation Processe” elaborado por Eman A. Emam, Abeer M. Shoaib en el año 2012 en el

cual muestran el proceso a seguir para la recuperación de bases lubricantes por proceso ácido / arcilla⁴⁸

En el tratamiento con ácido, el aceite de alimentación se trató con ácido sulfúrico concentrado al 98% con una relación de 4:1, respectivamente. Para el ensayo en el laboratorio se tomaron 200ml de ácido sulfúrico y 50 ml de aceite usado ver imagen 39 La mezcla se agitó luego durante una hora a 50°C temperatura la cual se controló por plancha de calentamiento con un total de 44.25 g después de evaporación de aceite usado ver y 368 g de ácido sulfúrico.

Imagen 39: Extracción con ácido sulfúrico 98% a aceite usado



Fuente. elaboración propia

La mezcla se dejó enfriar y se mantuvo en reposo durante 24 horas para desasfaltar y sedimentar el lodo ácido del aceite tratado con ácido como se puede apreciar en la imagen 40. Después de la eliminación de los lodos un total de 373.32 g de lodo ácido, el aceite tratado se lavó con alcohol etílico absoluto para extraer el ácido soluble que aún quedaba.

48 Eman A. Emam, Abeer M. Shoaib, 2012, "Re-refining of Used Lube Oil, II- by Solvent/Clay and Acid/Clay-Percolation Prozesse"

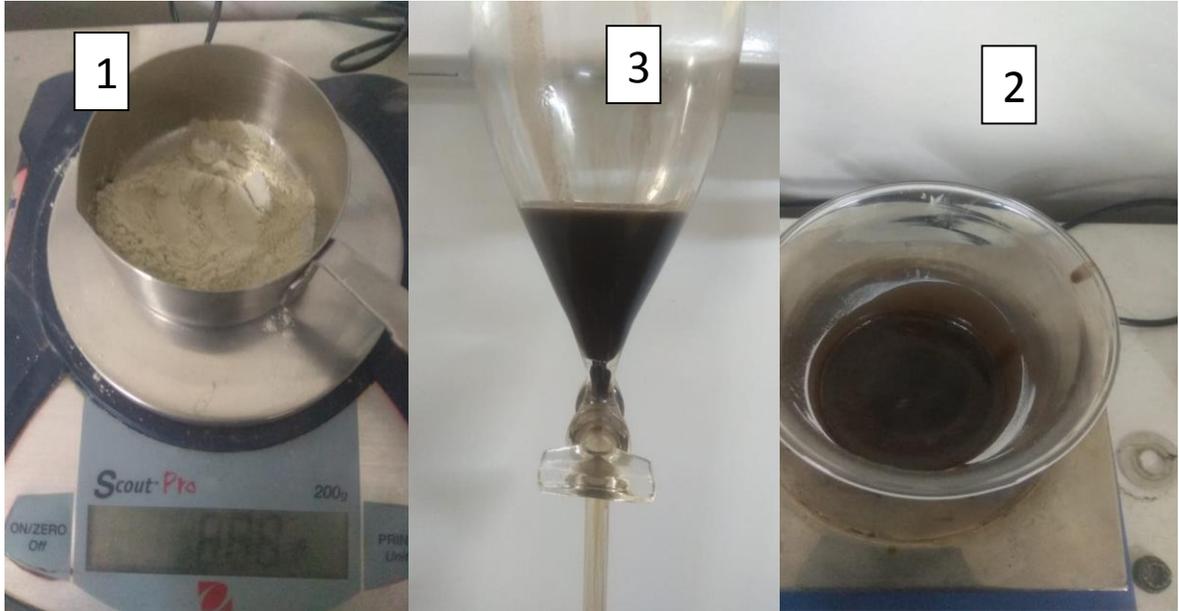
Imagen 40: Sedimentación y eliminación de lodos ácidos en donde 1) es la sedimentación de la mezcla por 24 horas en embudo de separación y 2) Es la separación del aceite extraído y los lodos ácidos



Fuente.elaboración propia

Para el siguiente paso, se llevaría a cabo un proceso de adsorción con arcilla bentonita perform 5000. Con un total de 88.8 g de arcilla La arcilla activada se utiliza para mejorar el color y la estabilidad de oxidación del aceite tratado con ácido. El aceite tratado por ácido pasó a través del adsorbente de arcilla activada se mezcló durante 1 hora y se dejó sedimentar para separar la arcilla ácida del aceite refinado, ver imagen 41 al finalizar sale 17.172 g de arcilla.

Imagen 41 Filtración con arcilla Perform 5000 en donde 1) Es la cantidad de arcilla utilizada (20% p/p) con respecto al aceite tratado, 2) Es la mezcla de aceite tratado con arcilla filtrante en agitador magnético y 3) Es la separación del aceite recuperado por medio de sedimentación en embudo de separación.



Fuente. elaboración propia

Gracias al proceso de ácido / arcilla y Luego de hacer la filtración se recupera 34 ml de aceite es decir el 70% de la muestra inicial de 50ml con un total de 30.09 g de aceite refinado, lo que nos quiere decir que el proceso es satisfactorio, sin embargo, el color del aceite es oscuro y esto se debe a que la remoción de color fue insuficiente.

4.11 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para poder hacer un análisis más detallado de la calidad del aceite recuperado es necesario determinar las propiedades físicas y químicas por lo tanto se tiene en cuenta la norma técnica colombiana NTC 3382 que establece los requisitos que debe cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse los aceites hidráulicos para aplicación en sistemas hidrostáticos.

4.12 PUNTO DE CHISPA Y PUNTO DE INFLAMACIÓN.

El punto de chispa es la temperatura a la que un líquido combustible debe ser calentado para emitir suficientes vapores y formar momentáneamente una mezcla inflamable con el aire, cuan

do una pequeña flama es aplicada bajo condiciones especificadas. Mientas que el punto de inflamación es la temperatura a la que el aceite comienza a arder y mantiene la combustión.⁴⁹

Para el análisis se tomó la muestra de 100 ml del aceite recuperado y se colocó en la copa de acero, se empezó a calentar en el controlador de punto de inflamación de acuerdo a la norma ASTM D-92, en la imagen 40 podemos observar que el aceite llega a su punto de inflamación cuando este mantiene la llama por más de 5 segundos, se alcanzó el punto de chispa cuando la temperatura llego a 155°C y el punto de inflamación cuando se aumentó a 202°C. En la tabla 30 podemos observar los valores de un aceite virgen y del aceite recuperado.

Imagen 42: Determinación de punto de chispa e inflamación para aceite recuperado por proceso de ácido/arcilla



Fuente.elaboración propia

49 ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D-92*).

Tabla 32: Valores de punto de chispa e inflamación de aceites base y aceite recuperado

Aceite	Punto de chispa °c	
	Punto de chispa °c	Punto de inflamación °c
PL	~180	~200
PM	~200	~230
NM	~230	~260
RECUPERADO	155	202

Fuente.elaboración propia

De acuerdo a la tabla anterior se puede concluir que los valores de punto de chispa y de inflamación del aceite recuperado son cercanos a los de una base parafínica liviana y que de acuerdo a la norma técnica colombiana NTC 3382 se encuentra dentro de los requisitos.

4.13 DENSIDAD

El análisis se realizó de acuerdo a la norma ASTM D-1298⁵⁰ Método de prueba estándar para determinar la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo y los productos líquidos derivados del petróleo mediante el Método de densímetro En la tabla 33 podemos observar los valores de densidad de las bases lubricantes vírgenes de la empresa soporte y el valor obtenido para el aceite recuperado.

Tabla 33. Valores de densidad de bases vírgenes y aceite recuperado

ACEITE	DENSIDAD (g/ml)
PL	0,87
PM	0,9
NM	0,905
RECUPERADO	0,887

Fuente.elaboración propia

A partir de estos datos se puede ver que el valor de densidad obtenido por el densímetro en el aceite recuperado es muy cercano a los valores de un aceite base virgen encontrándose entre un aceite parafínico ligero y mediano.

4.14 GRAVEDAD API

⁵⁰ ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. (*International Standard ASTM D-1298*).

EL petróleo es clasificado en liviano, mediano, pesado y extrapesado, de acuerdo a su medición de gravedad API. La ecuación usada para obtener la gravedad API es la siguiente:

$$GravedadAPI = \left(\frac{141.5}{Gravedadespecifica} \right) - 131.5$$

A partir de la densidad obtenida y usando la ecuación se obtiene la gravedad API para el aceite usado calculado de la siguiente manera de acuerdo a la norma ASTM D-287⁵¹ “Método de prueba estándar para determinar la gravedad API del petróleo crudo y productos derivados del petróleo (Método del densímetro)”

$$GravedadAPI = \left(\frac{141.5}{0.887} \right) - 131.5 = 28.026 \text{ } ^\circ \text{ API}$$

En la tabla 32 se clasifican los aceites de acuerdo a su gravedad API

Tabla 34: Clasificación de aceites de acuerdo a su gravedad API

TIPO	gravedad API (°API)
crudo liviano	> 31,1
crudo mediano	22,3 - 31,1
crudo pesado	10 - 22,3
crudo extrapesado	< 10

Fuente.elaboración propia

Con respecto a la tabla y al valor de gravedad API (28.026) obtenido se puede decir que el aceite usado se encuentra en la clasificación API como un crudo mediano ya que el valor obtenido se encuentra en el rango 22,3 - 31,1 ° API.

4.15 VISCOSIDAD

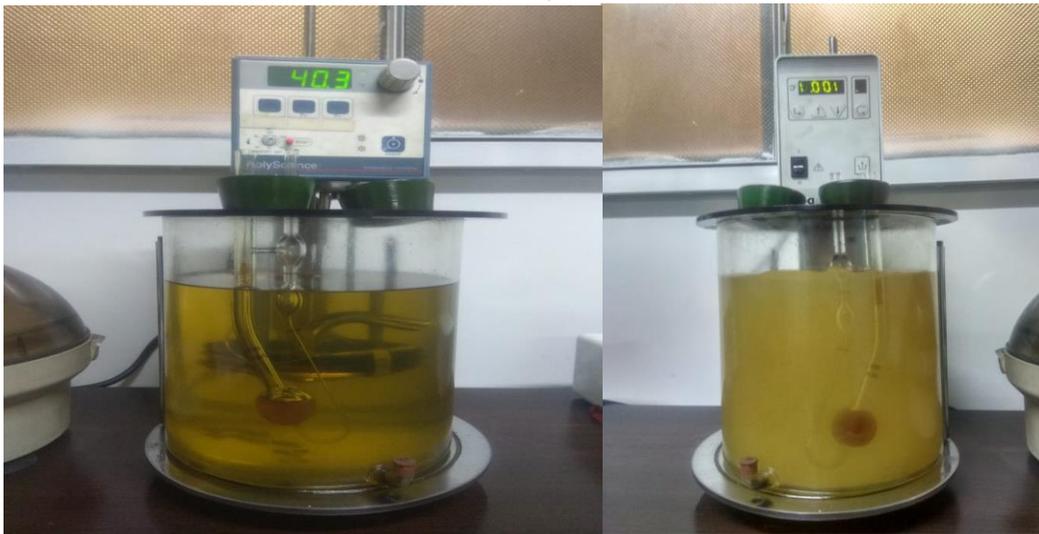
La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un lubricante. De hecho, buena parte de los sistemas de clasificación de los aceites están basados en esta propiedad. Esta prueba se trata de medir el tiempo necesario para que cierto volumen de aceite fluya a través del capilar de un viscosímetro Cannon – Fenske

⁵¹ ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. (*International Standard ASTM D-287*).

de vidrio calibrado, bajo la presión de una determinada columna de líquido a una temperatura exactamente controlada.

Para la medición de viscosidad se hace de acuerdo a la norma ASTM D445-06⁵² “Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos (Cálculo de la Viscosidad Cinemática)” el viscosímetro se sumerge en un baño a temperatura constante de 40 °C como se ve en la imagen 41 durante 10 minutos hasta que el aceite usado llega a un equilibrio térmico. Se aspira por el tubo capilar con una pera de goma el aceite usado, hasta que el fluido pasa la marca superior de medida en el tubo capilar. Se toma el tiempo de paso entre la marca superior e inferior señaladas en el tubo capilar del viscosímetro. Para la medición a 100 °C se realizó el mismo procedimiento aumentando la temperatura del baño a 100°C y se dejó sumergido el viscosímetro por 15 min para lograr un equilibrio térmico y de esta manera obtener los resultados esperados evitando errores en la toma de resultados.

Imagen 43: Medición de viscosidad a 40°C con controlador de temperatura PolyScience y Medición de viscosidad a 100°C con controlador de temperatura Haake DC-3



Fuente.elaboración propia

Para cada una de las mediciones se tomaron 3 tiempos esto con el fin de evitar errores a la hora de hacer el cálculo de viscosidad, haciendo un promedio entre los tiempos tomados para cada uno de los baños, el tiempo medido es el que tarda el aceite en pasar desde la marca superior de medida hasta la marca inferior, en las Tabla 35 y tabla 36 se observa los valores de tiempo obtenido en las mediciones a 40 y 100 °C respectivamente.

⁵² ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. (*International Standard ASTM D445-06*).

Tabla 35: Tiempo registrado a 40 °C

Minutos	Segundos	Total (segundos)
1	36,28	96,28
1	36,65	96,65
1	36,74	96,74
1	36,556	96,556

Fuente.elaboración propia

Tabla 36: Tiempo registrado a 100 °C

Minutos	Segundos	Total (segundos)
0	16,32	16,32
0	16.79	16,79
0	15.93	15,93
0	16.346	16,346

Fuente.elaboración propia

El cálculo de la viscosidad cinemática se puede obtener a partir de la ecuación que se muestra a continuación. En donde K es la constante del viscosímetro y t es el tiempo que tarda el fluido en pasar desde la marca superior de medición hasta la marca inferior.

$$v = K \times t$$

A partir de esta ecuación y con el promedio de tiempo de los valores tomados se puede realizar la operación para obtener la viscosidad de la muestra de aceite usado, los valores de la constante K para el viscosímetro Cannon – Fenske para 40 y 100 °C son 0.4815 y 0.4793 respectivamente.

$$v(40^{\circ}C) = 0.4815 \times 96,556 = 46.492cSt$$

$$v(100^{\circ}C) = 0.4793 \times 16,346 = 7,835cSt$$

Los datos obtenidos de viscosidad del aceite recuperado se comparan en la tabla 37 con los datos de base lubricante virgen.

Tabla 37: comparativa de viscosidad de bases lubricante y aceite

ACEITE	VISCOSIDAD 40°C	VISCOSIDAD 100°C
PL	30 -40	5 -6
PM	80- 90	10 -12
NM	180 - 190	13 – 16
ACEITE RECUPERADO	46,492	7,835

Fuente.elaboración propia

De acuerdo a la tabla 37 el aceite recuperado se encuentra entre una base parafínica liviana y una parafínica mediana debido a que valor obtenido de viscosidad se encuentra entre los valores típicos de estas dos bases. Lo que nos indica que el aceite recuperado es una mezcla de aceites parafínico-livianos y medianos.

4.16 ÍNDICE DE VISCOSIDAD

El índice de viscosidad es la constante física que determina la variación de viscosidad de un aceite lubricante respecto a la temperatura. Se tuvo en cuenta la norma ASTM D2270 – 93⁵³ “Práctica estándar para calcular el índice de viscosidad comprendida entre la viscosidad cinemática a 40 °C y 100 °C “

Debido a que la viscosidad cinemática medida para el aceite recuperado a 100° C es 7,835 cSt se busca el valor correspondiente a L y H en la tabla 38

Tabla 38: valores L y H para índice de viscosidad

Viscosidad 100°C (cSt)	L	H
7,7	93,2	56,2
7,8	95,43	57,31
7,9	97,72	58,45
8	100	59,6

Fuente.elaboración propia

De acuerdo a la viscosidad 100°C medida al aceite recuperado el valor 7,835 cSt se encuentra en la tabla entre los valores 7,8 y 7,9 cSt Por lo tanto para obtener el valor buscado se hace una interpolación lineal y de esta manera se obtiene los valores de L y H para el aceite recuperado. Los valores fueron:

$$L = 96,231$$

$$H = 57,709$$

53 ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. (*International Standard ASTM D2270-93*).

Luego de obtener estos valores se utiliza la ecuación siguiente para hallar el índice de viscosidad del aceite recuperado.

$$VI = \frac{96,231 - 46,492}{96,231 - 57,709} = 129,118$$

El resultado obtenido es favorable ya que como bien se había hablado la viscosidad cambia con respecto a la temperatura y al tener un índice de viscosidad alto de 129,118 se puede concluir que la variación de la viscosidad del aceite recuperado con respecto al aumento de temperatura no será muy alta.

4.17 COLOR

La norma ASTM D-1500, es una escala de colores de un solo color y una dimensión que va desde un amarillo claro a un rojo intenso en dieciséis intervalos (unidades de 0,5 a 8,0 en incrementos de 0,5 unidades). Los comparadores visuales pueden alcanzar una resolución de 0,5 unidades.⁵⁴ La determinación del color de productos derivados del petróleo se hace principalmente para fines de control de fabricación y es una característica de calidad importante, ya que el color es fácil de observar por parte del usuario del producto.

Para el análisis del aceite usado se tomó una muestra de 15ml en un tubo de ensayo y se colocó en el colorímetro Orbeco-Hellige

Para el análisis de color del aceite se coloca la muestra de aceite en la celda derecha de la parte superior del colorímetro luego se agrega el disco de color con escala de 5,0 hasta 8,0 en la abertura ubicada a la derecha del colorímetro. Se enciende la fuente luz y se comparan los colores en el detector. En la imagen 35 se puede observar y comparar el color del aceite usado con respecto a la escala del disco.

⁵⁴ ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D-1500*).

Imagen 44: Colorimetría para aceite recuperado por proceso ácido/arcilla en donde se aprecia el color rojo arrojado por el equipo y negro por el aceite recuperado



Fuente.elaboración propia

cómo se observa en la imagen el aceite recuperado tiene un color mucho más oscuro (Negro) que el valor más alto de la escala de colores (rojo) en 8,0, lo que nos indica que el tratamiento con ácido / arcilla no funciona para la remoción de color, sin embargo, esto no quiere decir que el aceite recuperado no pueda usarse para nuevas formulaciones de productos.

4.18 ANALISIS DE METALES

Esta propiedad es una de las importantes para el proceso de refinación ya que determina los niveles de metales de desgastes que son reglamentados en valores críticos y peligrosos véase tabla 15, ya que al refinarse podrían dañar más las partes móviles que lubricarlas, esta se convierte en una de las propiedades más importantes de los aceites recuperados, ya que gran parte del proceso de refinación se basa en eliminar estos metales en la base lubricante recuperada a continuación se muestra los resultados por espectrofotometría de absorción atómica.

Tabla 37: Resultados metales de desgaste por absorción atómica acido/arcilla ver anexos

ANALISIS	METODO	UNIDADES	RESULTADO
APARIENCIA	M1-001	N. A	OPACA
COBRE	ASTMD-6595	ppm	0.0
HIERRO	ASTMD-6595	ppm	3.2
PLOMO	ASTMD-6595	ppm	0.0
CROMO	ASTMD-6595	ppm	0.0
ALUMINIO	ASTMD-6595	ppm	0.3
ESTAÑO	ASTMD-6595	ppm	0.2
SILICIO	ASTMD-6595	ppm	0.2

Fuente.elaboración propia

4.18 ANÁLISIS DE RESULTADOS PROPIEDADES FÍSICO- QUÍMICAS DE LOS PROCESOS REALIZADOS

Tabla 38. Análisis de propiedades físicas y químicas de aceites

Propiedades	Aceite Usado	Aceite Recuperado por solvente	Aceite Recuperado por ácido	Aceite Virgen	
Punto de chispa °C	108	150	155	130 – 230	
Punto de inflamación °C	170	198	202	190 - 260	
Densidad g/ml	0,882	0,888	0,887	0,8 – 0,9	
Gravedad API	28,387	27,847	28,026	10 – 31,1	
Viscosidad 40°C cSt	49,851	40,578	46,492	30 – 190	
Viscosidad 100 °C cSt	7,832	6,915	7,835	5 – 16	
Índice Viscosidad	120,468	124,975	129,118	60 – 130	
Color	>8 (Rojo Oscuro)	2,0 (Amarillo)	>8 (Negro)	0,5 – 2,0	
Contenido de metales				Valor critico	valor peligro
APARIENCIA	OPACA	2,0 (AMARILLO)	OPACA	-	-
COBRE ppm	0,2	0	0,05	12	19
HIERRO ppm	55,1	5,2	3.2	9	14
PLOMO ppm	0,4	0,2	0.0	2	4
CROMO ppm	0	0	0.0	6	10
ALUMINIO ppm	1,2	0,6	0.3	4	6
ESTAÑO ppm	1,6	0,5	0.2	20	40
SILICIO ppm	1,8	0,4	0.2	25	64

Fuente.elaboración propia

Para el desarrollo experimental se utilizaron dos conjuntos de diferentes procesos para estudiar el refinado del aceite lubricante usado. La extracción del disolvente por mezcla de solventes de tolueno, butanol y metanol se siguió con un tratamiento adicional con arcilla bentonita perform 5000 y el tratamiento con ácido siguió con la filtración arcilla. El aceite tratado se analizó de acuerdo a la NTC 3382 para determinar el punto de chispa e inflamación, el índice de viscosidad, viscosidad a 40 y 100 °C, el peso específico, el contenido de metales y la composición de hidrocarburos. Estas propiedades se compararon entre sí, el aceite de base virgen y también con las características del aceite lubricante de regeneración. Estas características de los aceites se muestran en la Tabla 38

De acuerdo a la tabla se puede concluir que el aceite recuperado por el proceso de ácido arcilla tiene muy buenas propiedades, el proceso fue satisfactorio ya que se logró la recuperación de la base lubricante eliminando una cantidad significativa de lodos 14,16 g es decir el 28,32% en peso de aceite tratado (44,25g), además las propiedades físicas y químicas se encuentra entre los valores requeridos para un aceite base, sin embargo la remoción de color fue insuficiente y el resultado final fue un aceite oscuro de color negro, para poderle dar una solución a esto es necesario variar el porcentaje o tipo de arcilla y el ácido para el blanqueo del aceite usado.

Con respecto al tratamiento con solvente se puede apreciar que las propiedades analizadas se encuentran muy cercanos a los valores de una base virgen lo que nos dice que el proceso es satisfactorio eliminando una cantidad de 22,12 g de lodos es decir el 24,99 % en peso de aceite tratado (88,5g), la remoción de lodos por este proceso fue mucho mayor debido a que la constante dieléctrica del metanol y la

solubilidad son mayores es decir que elimina los componentes más pesados por lo tanto se obtiene una mejor remoción .

Los procesos usados se desarrollaron de manera satisfactoria obteniendo los valores deseados, estando estos entre los valores requeridos para una base lubricante. No obstante, el proceso de solvente / arcilla fue el escogido para el proceso de recuperación debido a que el control de ácido sulfúrico en Colombia es muy alto y la obtención de este reactivo es más complejo, además los lodos contienen una cantidad muy alta de ácido lo que lo convierte en un producto altamente toxico y contaminante, mientras que con el proceso de re-refinación por solventes por medio de la destilación atmosférica podemos recuperar hasta el 83.33%. lo que hace más rentable el proceso, asimismo, los productos de desecho como lodos y arcilla no se consideran contaminantes como el ácido sulfúrico.

4. DISEÑO DE PLANTA PILOTO ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO

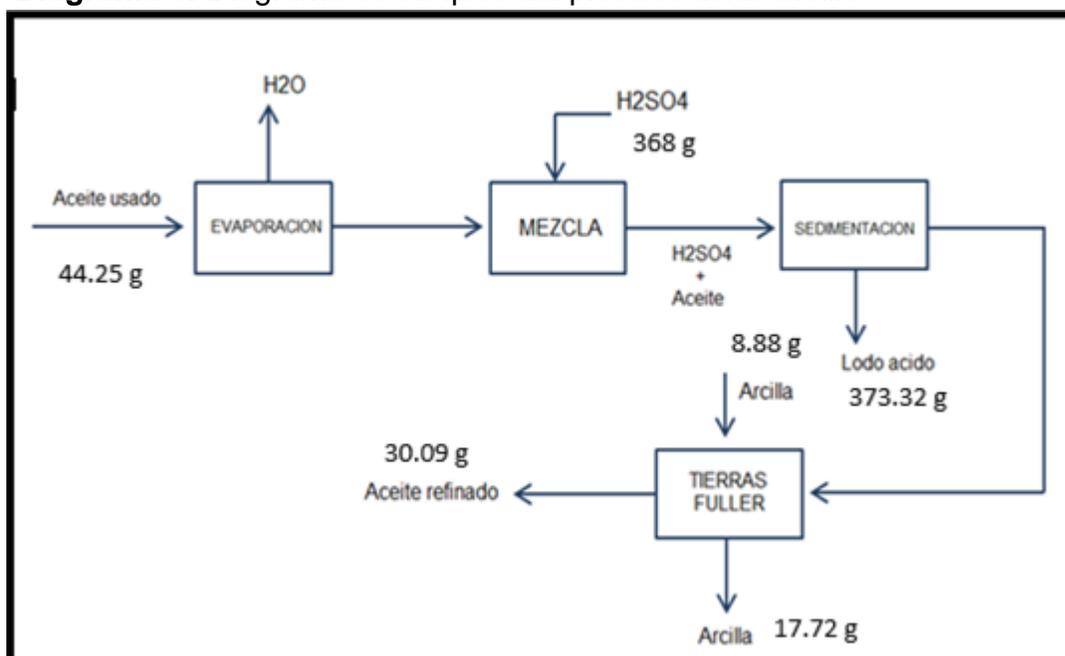
En este capítulo, se establecen las especificaciones técnicas del proceso para la re-refinación de bases lubricantes a escala planta piloto.

El proceso abarca áreas de recepción, administrativas, evaporación, reacción, secado, destilación y almacenamiento.

Para este se escoge el proceso por solvente ya que es el menos contaminante de acuerdo la experimentación previa y aunque tiene un porcentaje de conversión menor al del ácido la recuperación de solvente lo hace económicamente viable no se tiene que tramitar permisos especiales para el uso de ácido sulfúrico ya que el residuo de este produce un contaminante muy fuerte como se vio en la experimentación previa.

A continuación, se describe mediante un diagrama de bloques el proceso a seguir, para definir los equipos a emplear en cada etapa de proceso.

Diagrama 5: Diagrama de bloques del proceso ácido/arcilla

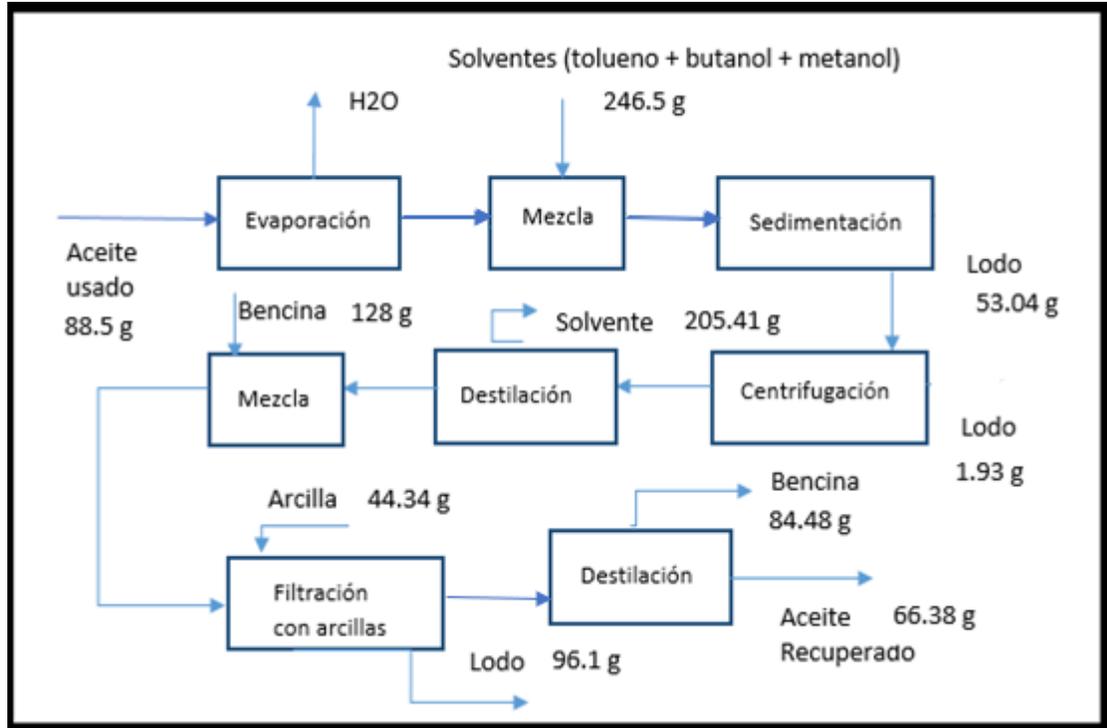


Fuente: elaboración propia

El diagrama es la representación gráfica del proceso ácido/arcilla para la recuperación de bases lubricantes contenidas en aceites industriales usados, el aceite de alimentación para el proceso a nivel laboratorio es de 100 ml (44.25 g). El cual es sometido a evaporación atmosférica para la eliminación de agua contenida en la muestra, luego se mezcla con ácido sulfúrico (368 g) en una relación 4:1 con respecto al aceite, la mezcla se deja en sedimentación por 24h y se remueve el lodo

ácido (373.32 g), el aceite recuperado es tratado con arcilla bentonita (8.88g) para remoción de metales, ácidos, y mejora de color para al finalizar obtener un aceite refinado (30.09 g)

Diagrama 6: Diagrama de arcilla solvente



Fuente: elaboración propia

El diagrama 6 representa el proceso de recuperación arcilla/solvente de bases lubricantes, en donde para desarrollo experimental a nivel laboratorio se alimenta 100 ml de aceite usado y se hace una evaporación del contenido de agua existente en la muestra para después mezclarse con una solución solvente compuesta por tolueno, Butanol y metanol (246.5g), la mezcla se deja en sedimentación por 24 horas y se remueve el lodo o partículas más pesadas (53.04 g), para retirar de manera eficaz las partículas aun suspendidas en la muestra se pasa la mezcla por una centrifuga en donde se retiran 1.93 g más de lodo , para la recuperación de solventes se realiza una destilación atmosférica y se recuperan 205.41 g de solventes, luego se hace una nueva extracción usando bencina en una relación 2:1 con respecto al aceite usado. La mezcla es tratada por medio de una filtración con arcilla bentonita (44.34 g) para remoción de metales, silicatos y mejora del color del aceite, para finalizar se hace una destilación atmosférica para la recuperación de la bencina (84.48 g) y hacer una correcta separación del aceite recuperado (66.38 g).

5.1 DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

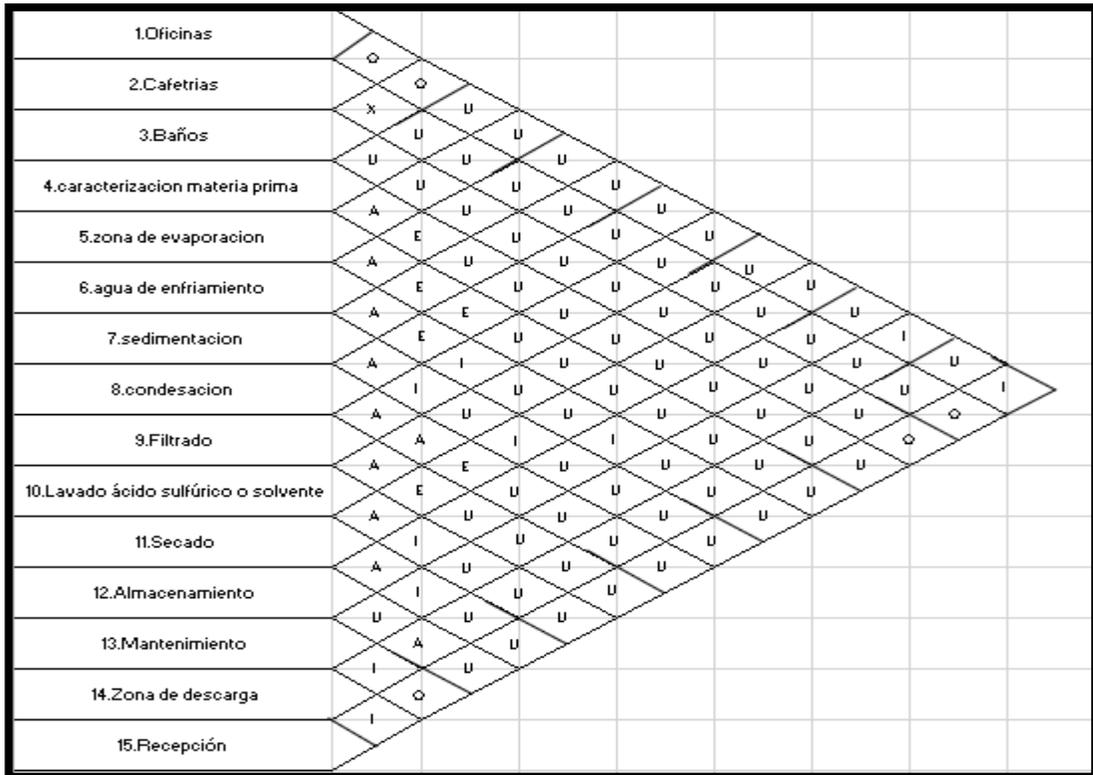
A continuación, se mostrarán los diagramas de relaciones de actividades con diferentes convenciones estas nos muestran cómo se deben relacionar las diferentes áreas de la planta con absolutamente necesario especialmente importante y ordinario, esta herramienta nos da una distribución de planta donde se hacen menores los tiempos de operación.

Tabla 38: Referentes de diagrama de relaciones para planta piloto

Código	Relación
A	Absolutamente necesario
E	Especialmente importante
I	Importante
O	Ordinario
U	Sin importancia
X	Rechazable

Fuente: elaboración propia

Diagrama 7: Diagrama de relaciones de actividades planta piloto. fuente autores

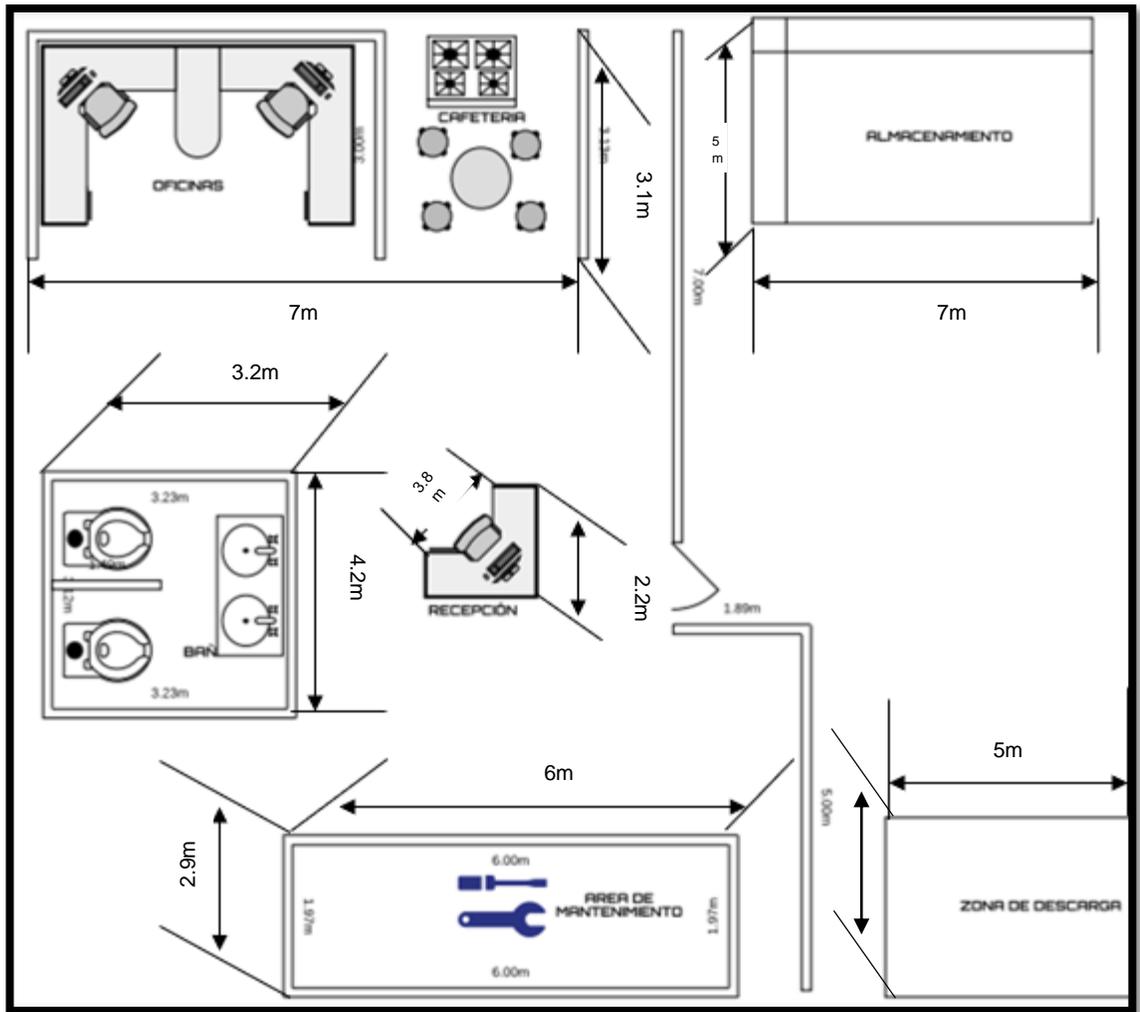


Fuente. elaboración propia

Al usar esta herramienta se puede prevenir cualquier tipo de riesgo que tenga la planta piloto al relacionar de una manera adecuada la ubicación de cada aspecto de la planta tanto en convenciones que estén absolutamente necesarias su cercanía lejanía o tiempo de espera para poder realizar un trabajo adecuado seguro y rápido el cual es la principal objetivo de esta herramienta, este nos permite realizar un diagrama de relaciones de actividades y recorridos para una organización segura para los trabajadores y equipos minimizando costos aumentando la productividad el cual era en la siguiente imagen.

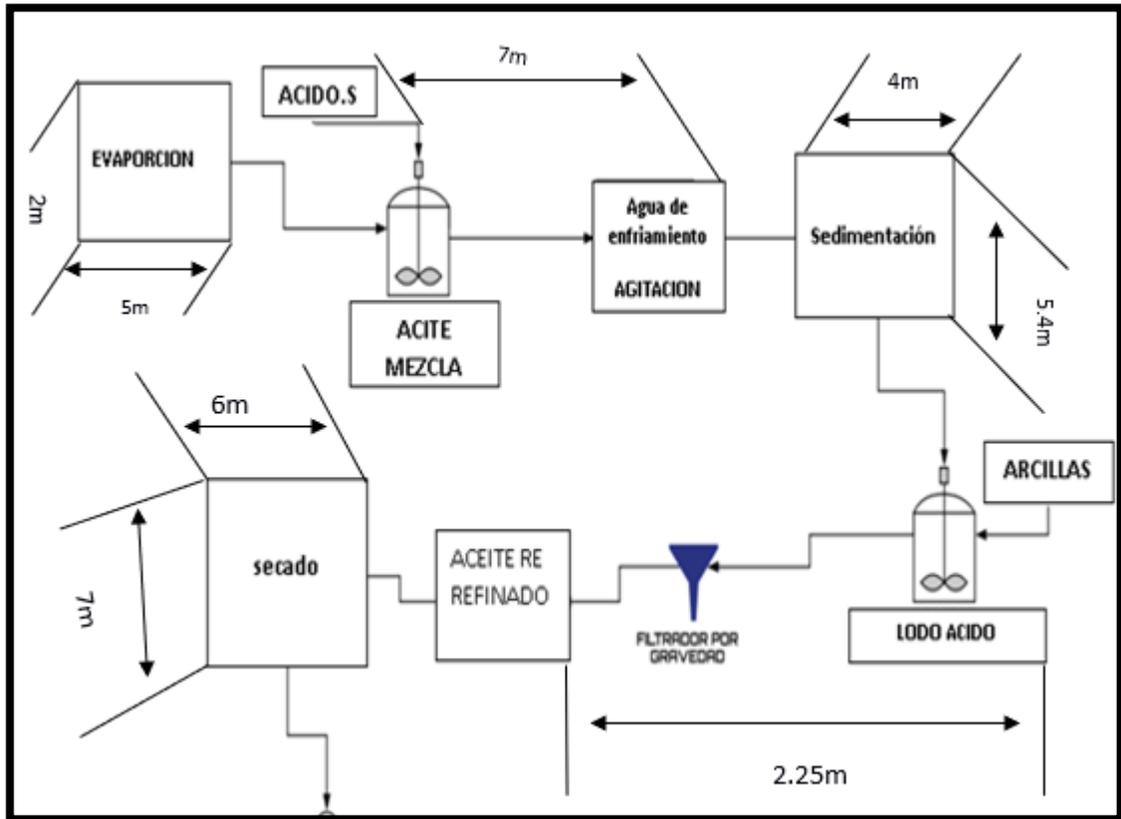
Se obtiene la distribución de planta piloto con las mejores especificaciones y recorridos entre áreas para minimizar los tiempos entre procesos, esto se reflejará al tener una planta segura y distribuida de manera que se pueda aprovechar la producción, mejorar la limpieza de equipos el manejo de residuos contaminantes y una organización para una mejor producción.

Diagrama 2. OPERACIONAL DE PLANTA PILOTO



Fuente.elaboración propia

Diagrama 9: Diagrama de planta piloto nivel operacional fuente autores



Fuente.elaboración propia

Teniendo en cuenta los diagramas y la distribución de planta obtenemos el diagrama de operacional de procesos con los respectivos equipos ya, especificados en este capítulo para la re-refinación de aceites en base lubricante.

5.3 RECEPCION Y ZONA DE ALMACENAMIENTO DE MATERIALES

En esta etapa todas las operaciones desde la recepción de la materia prima destinados a la re-refinación y análisis fisicoquímicos previos para los procesos se toman los registros de entrada su identificación necesaria por ley, tanto a la entrada como salida de material de la planta estos se difieren en códigos, horas de salida entrada cantidades exactas de producto, como solventes ácidos y de más materiales usados

5.4 ANÁLISIS PREVIOS AL PROCESO

Con el fin de conocer el estado de la materia prima se realizan diferentes análisis para caracterizar el aceite usado véase figuras..... y poder realizar un proceso más eficiente

5.5 FASE DE EVAPORACIÓN

En esta fase la materia prima (aceite usado) es puesta en el horno por medio de una evaporación la materia prima se le retira el porcentaje de agua en exceso junto a otros contaminantes como polvo y otros se retira agua condensada y gases de escape.

En esta fase de evaporación según lo aprendido en la experimentación se puede retirar una gran cantidad de agua y material particulado como silicio en cantidades considerables el uso de este equipo de tamaño considerable es porque la cantidad de aceite usada que se tiene es una cantidad considerable la cual se necesita procesar rápidamente el equipo nos permite una capacidad de producción amplia a un precio justo esta etapa por lo aprendido en el experimento requiere una velocidad adecuada y permite que el material se pueda almacenar de nuevo.

5.6 FASE DE MEZCLADO

En esta fase se usa un mezclador para para mezclar el aceite ya evaporado con el solvente, tolueno, etanol, metanol o ácido sulfúrico para empezar con el proceso de re-refinación en este proceso, también se sedimenta el lodo más el solvente lo cual crea una sola fase arcilla-solvente esto nos permite usar este tipo de tanque de mezcla ya que no usaremos ácidos corrosivos y peligrosos al solo usar solventes podemos tener este tipo de tanque a un precio más accesible y fácil de limpiar la relación de laboratorio será de 156l de solvente por barril para base lubricante

5.7 SEDIMENTACION

Este proceso se sedimenta los lodos por medio de un decantador de vidrio que ayuda eliminar impurezas y otros para obtener un lodo sólido y libre de humedad

5.8 CENTRIFUGADO

En esta etapa del proceso el lodo junto al solvente es puesto en una fase de centrifugado para separar impurezas y ayudar a la siguiente fase retirar vapores y otros, pero principalmente los lodos para la finalizar tener aceite y solvente.

5.9 DESTILACION

En esta última etapa se realiza la destilación por medio del destilador para eliminar los solventes y obtener las tierras Fuller para luego obtener el aceite refinado

Llevado a escala de planta piloto se puede apreciar el porcentaje de base lubricante obtenido y el porcentaje de solvente recuperado como se ve en la imagen 38. llevado a un escalonamiento el porcentaje de conversión se mantiene, en cuanto a la base y el solvente recuperado será un mínimo perdido en la limpieza de equipos lo cual se estima en un 80% de solvente recuperado para el siguiente lote, este perderá en promedio un 18%-20% de compuesto por cada lote, aun así el proceso seguirá siendo viable financieramente ya que el porcentaje recuperado permitirá un desempeño bueno en la compra del solvente como se ve en la valoración financiera propuesta en el siguiente ítem, en un escalonamiento del laboratorio a planta piloto se recuperara 156 l de base lubricada por cada 208 litros de aceite usado.

6.VIABILIDAD FINANCIERA DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE BASE LUBRICANTE

En este capítulo se realizará y estudiara la viabilidad financiera del proceso de re-refinación de aceites lubricantes junto a su rentabilidad, para esto se tiene en cuenta costo de materia prima, mano de obra servicios públicos y otros.

Se realizará un flujo de caja global para 5 años de prueba del proyecto para determinar indicadores financieros como (VPN), (TIR), (IR)

6.1 INVERSION

La inversión inicial a tener en cuenta es la compra de maquinaria y equipos con su depreciación respectiva.

6.2 INVERSIÓN EN EQUIPOS

Se deben adquirir equipos y maquinaria para el adecuado funcionamiento de la planta de producción.

Tabla 39. Maquinaria y equipos necesarios.

Maquinaria y equipo	Cantidad	Costo (\$)	Total (\$)
Horno evaporador	1	1.845.800	1.845.800
Tanque de mezcla	1	1.679.590	1.679.590
Tanque de sedimentación	1	839.795	839.795
centrifuga	1	2.855.303	2.855.303
Destilador	1	3.356.000	3.356.000
Equipo menor (balones, termómetro. beakers)	----	1.000.000	1.000.000
<hr/>			
Inversión total		\$ 11.176.490	

Fuente.elaboración propia

6.3 EVALUACION FINANCIERA – INDICADORES

La evaluación financiera se proyecta para 5 años, que corresponden al periodo de tiempo (2019-2024) para esto se debe tener en cuenta los cambios en los precios de materias primas depreciación salario de operarios y todo lo correspondiente a un flujo de caja.

6.4 OBTENCION DE MATERIAS PRIMAS EGRESOS

Tabla 40: precio de materias primas fuente propia

Materia prima (\$ / kg)	Cantidad (L)	Costo (\$)
BENCINA	1	36.295
ÁCIDO SULFÚRICO	1	39.865
TOLUENO	1	45.695
BUTANOL	1	50.200
METANOL	1	32.500
ARCILLAS	25kg	90.000

Fuente.elaboración propia

Las materias primas se comprarán en cantidad adecuada de acuerdo a la experimentación y ya que funcionaron en la fase laboratorio serán usadas en la planta piloto

Tabla 41:Costo de las materias primas durante los próximos 5 años

AÑO	BENCENO	ACIDO SULFURICO	TOLUENO	BUTANOL	METANOL	ARCILLAS
0	\$36.295	\$39.865	\$45.695	\$50.200	\$32.500	\$90000
1	\$38.645	\$41.915	\$48.145	\$52.700	\$34.400	\$90000
2	\$40.995	\$43.965	\$50.595	\$55.200	\$36.300	\$92500
3	\$43.345	\$46.015	\$53.045	\$57.700	\$38.200	\$93000
4	\$45.695	\$48.065	\$55.495	\$60.200	\$40.100	\$93500
5	\$48.045	\$50.115	\$57.945	\$62.700	\$42.000	\$94000

Fuente.elaboración propia

En esta tabla se muestran los valores de aumento de las materias primas durante los próximos 5 años que se tendrá la proyección financiera

6.5 DEPRECIACIÓN DE EQUIPOS

Los bienes materiales tienen una vida útil y su desgaste implica una desvalorización anual. Esto está reglamentado por el decreto 3019 de 1989 el cual cita una vida útil de 10 años.

Tabla 42: depreciación de equipos

Periodo (año)	Depreciación (\$)	Depreciación (\$)
1	11.176.490	1.117.649
2	11.176.490	1.117.649
3	11.176.490	1.117.649
4	11.176.490	1.117.649
5	11.176.490	1.117.649

Fuente.elaboración propia

6.6 MANTENIMIENTO DE EQUIPOS

Todos los equipos son nuevos aun así se deben mantener en constante limpieza por los ácidos y solventes cada año, el coste anual de mantenimiento debe

estimarse entre el 2% y 3% del coste de equipos + montaje⁵⁵. En este proyecto, se realizará la estimación con el valor mínimo (3%), porque el uso de los equipos será continuo.

Tabla 43. Costo mantenimiento de equipos

Periodo (año)	Mantenimiento (\$)
1	2.352.947
2	2.552.957
3	2.674.956
4	2.856.675
5	3.145.789

Fuente.elaboración propia

Esto nos da un resultado de \$13583324 anuales por mantenimiento de equipos por los próximos 5 años.

6.7 COSTOS DE SERVICIOS INDUSTRIALES (ENERGÍA Y AGUA)

Los costos de servicios para la planta piloto son de agua y luz, estos se tendrán para los equipos como el horno, es destilador, el tanque sedimentador y el gua usada en los procesos de limpieza. En las fichas técnicas se ven los consumos y voltaje usado por las maquinas Se considera el costo de kWh de estrato industrial, siendo este de \$ 287,39⁵⁶

⁵⁵ GARRIDO, Santiago. Ingeniería de mantenimiento. 2010. [en línea]: <http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/26-articulos-destacados/10-el-presupuesto-de-mantenimiento>

⁵⁶ ENEL CODENSA. [En línea]: <https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>

Tabla 45. valores consumo de energía

5 ENERGÍA						
6 Consumo por equipo						
7 Equipo	8 Potencia motor a (HP)	9 Costo (\$/ kWh empresa)	10 Consumo promedio mensual kWh	11 Costo mensual (\$/ kWh)	12	13 Costo anual (\$/ kWh)
15 Horno evaporador	16 1.5kw	17	19 1095	20 314.692	21	3.783.400
22 Tanque de mezcla	23 0,5kw	18 \$287.39	24 365	25 104.897	26	1.258.768
27 Tanque de sedimentación	28 2.2Kw		29 1606	30 461.548	31	5.538.580
32 Centrifuga	33 1.5kw	34	35 1095	36 314.692	37	3.776.304
38 Destilador	39 1.1kw	40	41 803	42 230.774	43	2.769.290
Total: \$17.126.342 anual total						

TABLA 45. Valores de consumo de agua fuente. Ver anexo valores de acueducto para industria

Consumo general					
AGUA					
Concepto	Cargo fijo (\$)	Consumo m³ mensual	Tarifa básica (\$/ m³)	Costo Bimensual (\$)	Costo anual (\$)
Acueducto	7.065,10	123	3.793,86	933.289,96	5.599.739,8
Alcantarillado	4.009,54	85	3.058,73	222,315	1.559.952,3
Aseo (Comercialización, barrido y limpieza, limpieza urbana, recolección y transporte, disposición final)					
Aseo	111.377,60		2.500	227.754	1.366.524
Total					
	\$8.526.216,1				

Fuente.elaboración propia

6.8 SUELDO OPERARIO

Para la re refinación de base lubricante se necesita un operario para la recepción de los residuos que entran a la planta, para el manejo de equipos y empaque del producto final, para llevar el control de insumos y el control de los parámetros que afectan al proceso, quien tendrá un salario equivalente a \$1.000.000; con auxilio de transporte de \$88.211 y todas las prestaciones de ley como son: Pensión 12%, salud 8,5%, cesantías 8,33%, intereses a las cesantías 1%, vacaciones 4,17%, prima de servicios 8,33%, aportes parafiscales 9%, riesgos profesionales (riego II: 1,044 y dotación aproximada 5%⁵⁷.

⁵⁷ BANCO DE LA REPÚBLICA. Colombia, 2018. Disponible en: <https://www.larepublica.co/finanzas/el-abc-de-las-prestaciones-sociales-y-los-aportes-parafiscales-2249321>

Tabla 46. sueldo mensual y anual de operario Fuente. autores

Costo mano de obra Operario		
Concepto	Valor (\$ / mes)	Valor anual (\$)
Salario básico	1.000.000	12.000.000
Auxilio de transportes	88.211	1.058.532
Pensión	120.000	1.440.000
Salud	85.000	1.020.000
Cesantías	83.333,33	1.000.000
Interés cesantías	10.000	120.000
Vacaciones	41.700	500.400
Prima de servicios	83.333,33	1.000.000
Parafiscales	90.000	1.080.000
Riesgos profesionales	5.220	62.640
Dotación (cada 4 meses)	50.000	150.000
Total	1.656.731	19.880.772

Fuente.elaboración propia

Estos valores se obtienen de realizar un promedio anual del alza del salario mínimo del operario durante los últimos 5 años (2014- 4,50 %; 2015- 4,60 %; 2016- 7,00 %; 2017- 7%; 2018- 5,90%), dando así un alza del 5,4 % al año.

Tabla 47. Sueldo del operario próximos 5 años

Periodo (año)	Salario básico (\$)	Aux. Transporte (\$)	Seguridad social (\$)	Prestaciones sociales (\$)	Parafiscales (\$)	Total (\$)
1	12.648,00 0	1.058.532	2.658.862,5 6	2.919.158,40	1.138.320	20.422.872,96
2	13.330,99 2	1.058.532	2.802.441,1 4	3.076.792,95	1.199.789,28	21.468.547,37
3	14.050,86 5,57	1.058.532	2.953.772,9 6	3.242.939,77	1.264.577,90	22.570.688,20
4	14.809,61 2,31	1.058.532	3.113.276,7 0	3.418.058,52	1.332.865,11	23.732.344,64
5	15.609,33 1,37	1.058.532	3.281.393,6 4	3.602.633,68	1.404.839,82	24.956.730,52

Fuente: Elaboración propia

6.9 INGRESOS

Los ingresos son ganancias económicas o entradas de dinero, para este caso se involucra la venta de la base recuperada que se determina teniendo en cuenta la cantidad de base lubricada que es el 75 % del total del aceite usado en un barril de 156 litros la unidad a un precio fijado del barril de 208 litros que cuesta 900.000 a 100.000 de pesos

Tabla 48. ingresos por año de la planta piloto

Periodo (año)	Venta por unidad (\$)	Unidades (barril 156l)	Costo total (\$)
1	500.000	215	82.500.000,00
2	500.000	215	82.500.000,00
3	550.000	220	90.000.000,00
4	550.000	225	90.000.000,00
5	600.000	230	108.000.000,00

Fuente.elaboración propia

6.10 FLUJO DE CAJA NETO

El flujo de caja neto es uno de los informes financieros más importantes, que presenta en detalle los flujos de ingresos y egresos de dinero que tiene una empresa en un periodo de tiempo. En este se evalúa la viabilidad y rentabilidad de la ejecución del proyecto. Para el desarrollo de este apartado, se tiene en cuenta los ingresos como la venta del producto final, base lubricante recuperada de aceites usados mantenimiento y mano de obra que tendría la planta, teniendo en cuenta el impuesto de renta (33%)⁵⁸ como se observa en el ANEXO G.

6.11 INDICADORES

Con el fin de determinar la viabilidad del proyecto, se evalúan los indicadores de: valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR).

⁵⁸ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA Ley 1739 (23, diciembre, 2004) Por medio de la cual se modifica el Estatuto Tributario. Bogotá D.C. Revisado. 2018.

6.11.1 Vpn. El valor presente neto (VPN) es el método más conocido al momento de evaluar proyectos de inversión a largo plazo, permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero: maximizar una inversión. El valor del VPN puede ser positivo, negativo o cero⁵⁹. Si el valor presente neto es positivo, indicará que el proyecto es capaz de generar suficientes ingresos para recuperar la inversión y además generar ganancia; si el VPN es negativo, indicará que el proyecto no es capaz de producir suficiente dinero ni para recuperar la inversión, lo que revela que el proyecto no es factible y la acción correcta será no ejecutarlo. Y finalmente, si el valor del VPN es igual a cero, indicará que el proyecto sólo producirá lo suficiente para que se recupere la inversión, en este caso, tampoco se ejecutaría el proyecto dado que no se generarían ganancias⁶⁰. El VPN se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación. Valor presente neto proyecto.

$$VPN = -I_0 + \frac{FCN_{1,año}}{1 + (1 + k)^1} + \frac{FCN_{2,año}}{1 + (1 + k)^2} + \dots + \frac{FCN_{n,año}}{1 + (1 + k)^n}$$

Donde

I_0 : Inversión inicial

FCN: Flujo de caja neto

k: Tasa interna de oportunidad (TIO): 12%⁶¹

Con los datos de proyección a 5 años de la Tabla 48, se realiza el cálculo con una tasa interna de oportunidad de 12%, el valor presente neto de esta proyección es de \$ 1.325.475,64

lo cual indica que el proyecto es ejecutable, debido a que se recupera el costo de inversión y adicional a esto, generaría buenos ingresos anuales.

⁵⁹ DIDIER VARIECO, José. *Valor presente neto*. Ibagué, Colombia. 2013. p.2

⁶⁰ BLANCO, A. *Formulación de proyectos*. Editorial Teto. 5ta edición. Caracas, Venezuela. 2006.

⁶¹ BANCO DE LA REPUBLICA. *Tasa interés de intervención*. 2018.

6.11.2 Tir. Tasa Interna de Retorno (TIR), es la tasa de interés o rentabilidad que genera un proyecto, se encarga de medir la rentabilidad de una inversión, mediante el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá esta, para los montos que no hayan sido retirados del proyecto y funciona como una herramienta complementaria del VPN. Si el valor de la TIR es mayor que la TIO, el proyecto tiene rentabilidad, por el contrario, si es menor, no se debe ejecutar.

La TIR se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Tasa interna de retorno del proyecto.

$$0 = -I_0 + \frac{FCN_{1,año}}{1 + (1 + k)^1} + \frac{FCN_{2,año}}{1 + (1 + k)^2} + \dots + \frac{FCN_{n,año}}{1 + (1 + k)^n}$$

Donde

I_0 : Inversión inicial

FCN: Flujo de caja neto

k: Tasa interna de oportunidad (TIO): 12%⁶²

Para el proyecto se obtiene una TIR de 14% De acuerdo con el resultado anterior se determina el margen de rentabilidad siendo esta la diferencia entre la TIR y TIO como se muestra a continuación: *Margen de rentabilidad = TIR - TIO = 14% - 12% = 2%*. De acuerdo con este valor, el proyecto tiene una buena rentabilidad.

El análisis financiero apoyado en herramientas como el flujo de caja y indicadores económicos arroja resultados sobre una proyección financiera del proyecto con indicadores económicos positivos. En este se tuvo en cuenta la mayoría de egresos y ingresos que una empresa puede tener, empleados costos de materias primas equipos, depreciaciones y otros.

⁶² BANCO DE LA REPUBLICA. Tasa interés de intervención.2018.

7.CONCLUSIONES

- A partir de análisis físicos y químicos se determinaron las propiedades más importantes de una base lubricante, de acuerdo a la norma técnica colombiana, propiedades que permitieron determinar la calidad y el nivel de desgaste del aceite suministrado por la empresa soporte y por medio del análisis de espectroscopia de absorción atómica se pudo determinar el contenido de metales en el aceite con un resultado significativo de hierro con un valor de 55.1 ppm un valor bastante alto con respecto a aceites vírgenes con valores menores a 9 ppm y propiedades como el punto de chispa y punto de inflamación con valores de 108 °C y 170°C respectivamente, análisis de viscosidades a 40°C y 100°C con resultados de 49,851 cSt y 7,832 cSt, color rojo oscuro mayor que la escala del disco del colorímetro (>8).
- Se realizó una descripción de los procesos de re-refinación conocidos, con sus respectivos diagramas, características, ventajas, desventajas costos y otros criterios, y a partir de la matriz PUGH se logró determinar cuáles eran los dos procesos más apropiados para la realización del proceso experimental a nivel laboratorio, se obtuvo un resultado positivo para dos métodos, proceso ácido /arcilla, y el proceso solvente/arcilla los cuales se seleccionaron para llevar cabo el desarrollo experimental, y a través de estos procesos de re-refinación se obtuvieron dos aceites recuperados. Se determinó las propiedades físicas y químicas para ser comparadas con las obtenidas en el análisis al aceite usado y se notó una disminución importante en el contenido de metales de desgaste en donde el contenido de hierro bajo a 5.2 ppm y 3.2 ppm en los procesos solvente/arcilla y ácido/arcilla respectivamente con respecto al resultado obtenido para el aceite usado de 55.1 ppm.
- Se realizó la proyección a planta piloto usando métodos de diagramas de distribución ,programas como ludi.chart para simular la planta piloto teniendo en cuenta registros bibliográficos y plantas de re refinación de aceites , para una adecuada distribución de planta, equipos con precio acorde a las necesidades de la empresa soporte y una producción rentable, de acuerdo a la experimentación en se establecen los requerimientos técnicos de los procesos en donde se recuperan aproximadamente 150 Litros de base lubricante por cada 208 Litros de aceite usado con una recuperación de solvente del 83,33% por cada lote, lo que es un aspecto positivo en rentabilidad.
- Como resultado de la viabilidad financiera propuesta a 5 años, con un costo de inversión en el periodo 0 apoyado en la herramienta de flujo de caja neto, con los costos de maquinaria materias primas como solventes y arcillas, los costos del aceite usado serán bajos ya que es un desecho no deseado producto de desecho en la mayoría de los motores y maquinaria móvil, se podrán realizar recolecciones de este desecho sin cargo alguno, los solventes se pueden recuperar para ser recirculados al proceso. Una vez tomado en cuenta todos los aspectos financieros se realiza un análisis de este, en donde se obtiene un VPN positivo de \$ 2.024.204,02 para los próximos 5 años de funcionamiento de la planta piloto lo

cual lo hace viable, esto se le sumara el hecho de tener un beneficio ambiental en la disposición de desechos altamente contaminantes y su aprovechamiento económico.

8. RECOMENDACIONES

- Para el desarrollo experimental del proceso solvente/ arcilla se es necesario estudiar otro tipo de solventes que ayuden a una mejor remoción de lodos, para una mejor eliminación de metales pesados y de aditivos desgastados además se recomienda usar diferentes porcentajes del solvente para establecer la proporción ideal al momento de realizar la re-refinación
- De acuerdo a los resultados obtenidos posterior al proceso de re-refinación por ácido / arcilla, se evidencio que la remoción de color fue insuficiente por lo tanto es imprescindible el estudio de nuevos tipos de arcillas que ayuden a la disminución del color ya que las demás propiedades analizadas se encuentran dentro de los valores requeridos
- El desecho producto de la re-refinación con arcillas es un lodo contaminado, por lo tanto, se debe buscar la manera de hacer que este desecho sea renovable o reutilizable a partir de nuevas tecnologías de recuperación con el fin se disminuyan los niveles de contaminación en fuentes hídricas o suelos y hacer más rentable el proceso.

BIBLIOGRAFIA

ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D6158 – 05*).

ASTM INTERNATIONAL *Standard Specifications for Mineral Hydraulic Oils*. USA, ASTM, 2005. 3 p. (*International Standard ASTM D6158 – 05*). Cornelia Stan, Cristian Andreescu, Marius Toma (2017) “*some aspects of the regeneration of used motor oil*”

Att Development (2017) “Factores que influyen en la degradación de lubricantes sintéticos y minerales” adaptado de “*Kew Engineering, Oil Aging and Degradation*” BANCO DE LA REPÚBLICA. Colombia, 2018. Disponible en: <https://www.larepublica.co/finanzas/el-abc-de-las-prestaciones-sociales-y-los-aportes-parafiscales-2249321>

BANCO DE LA REPUBLICA. Tasa interés de intervención.2018.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA Ley 1739 (23, diciembre, 2004) Por medio de la cual se modifica el Estatuto Tributario. Bogotá D.C. Revisado. 2018.

Doaa I. Osman, Sayed K. Attia, Afaf R. Taman (2017) “*Recycling of used engine oil by different solvents*”

ENEL CODENSA. [En línea]: <https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>

GARRIDO, Santiago. Ingeniería de mantenimiento. 2010. [en línea]: <http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/26-articulos-destacados/10-el-presupuesto-de-mantenimiento>

H. Bridjanian, M. Sattarin, 2006,” Modern Recovery Methods in Used Oil Re-Refining” Research Institute of Petroleum Industry, Iran

H. Bridjanian, M. Sattarin, (2006)” Modern Recovery Methods In Used Oil Re-Refining”Research Institute of Petroleum Industry

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de normas para trabajos escritos NTC-1486-6166. Bogotá D.C. el instituto

Serna Marilyn, Barrera Isabel, 2017 Trabajo de grado “Global oil Aceite lubricante para vehículos y uso industrial” Bogotá, Colombia.

Sequeira Jr, avilino, (1994) “*lubricant base oil and wax processing*” New York, Estados Unidos

Revista dinero noticias de economía [en línea] (2014) <https://www.dinero.com/especiales-comerciales/articulo/lubricantes-industriales-colombia/192490>

Rand, Salvatore J (2010). "Significance of Tests for Petroleum Products (8th Edition)"

TORRES Cobos, Pablo Andrés, Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja, Ecuador. [en línea]. trabajo de grado. Universidad nacional de ecuador. 2014[consultado junio 2019]. Disponible en:

ANEXOS

ANEXO A.
ARCILLA /SOLVENTE:



Reporte Nro: 35303		Fecha: 27/05/2019		
Código: 626		Muestra		
Nombre: ANDRES FELIPE MALDONADO		Muestra Lab No: 88100		
Vendedor:		Fecha toma de muestra: 24/05/2019		
		Fecha de recepción: 24/05/2019		
Código: 01		Muestra Cliente Nro:		
Nombre: JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZ		Periodo de servicio: 0		
Ciudad: Bogotá D.C.		Unidad: No Aplica		
Dirección:				
Contacto: JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZ				
Teléfono: 3219660982				
Email: juan.hernandez9@estudiantes.uameri				
Equipo:		Producto:		
Código: NO APLICA		Código: HIDRÁULICO REC		
Clase: NR.		Nombre: ACEITE HIDRÁULICO RECUPERADO		
Marca: NR		Grado:		
Modelo: NR				
Parte: NR				
ANÁLISIS	METODO	UNIDADES	RESULTADO	COMENTARIO
Apariencia	MI-001	N.A.	2,0	REPORTAR
Cobre	ASTM D-6595	ppm	0,0	REPORTAR
Hierro	ASTM D-6595	ppm	5,2	REPORTAR
Plomo	ASTM D-6595	ppm	0,2	REPORTAR
Cromo	ASTM D-6595	ppm	0,0	REPORTAR
Aluminio	ASTM D-6595	ppm	0,6	REPORTAR
Estaño	ASTM D-6595	ppm	0,5	REPORTAR
Silicio	ASTM D-6595	ppm	0,4	REPORTAR
COMENTARIOS:				
Por solicitud del cliente se reportan los valores sin el redondeo que sugiere la norma ASTM D 6595				
Los resultados obtenidos corresponden estrictamente a la muestra analizada y no a otra de similar procedencia.				
DIAGNOSTICO:				
No se hace diagnóstico, dado que no se cuenta con todos los análisis característicos para este tipo de muestra.				

ANEXO B

Acido /arcilla



Reporte Nro: 35303	Fecha: 27/05/2019			
Muestra				
Código: 626	Muestra Lab No: 88100			
Nombre: ANDRES FELIPE MALDONADO	Fecha toma de muestra: 24/05/2019			
Vendedor:	Fecha de recepción: 24/05/2019			
Código: 01	Muestra Cliente Nro:			
Nombre: JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZ	Periodo de servicio: 0			
Ciudad: Bogotá D.C.	Unidad: No Aplica			
Dirección:				
Contacto: JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZ				
Teléfono: 3219660982				
Email: juan.hernandez9@estudiantes.uameric				
Equipo:				
Código: NO APLICA	Producto:			
Clase: NR	Código: HIDRAULICO REC			
Marca: NR	Nombre: ACEITE HIDRÁULICO RECUPERADO			
Modelo: NR	Grado:			
Parte: NR				
ANALISIS	METODO	UNIDADES	RESULTADO	COMENTARIO
Apariencia	MI-001	N.A.	OPACA	REPORTAR
Cobre	ASTM D-6595	ppm	0,0	REPORTAR
Hierro	ASTM D-6595	ppm	3,2	REPORTAR
Plomo	ASTM D-6595	ppm	0,0	REPORTAR
Cromo	ASTM D-6595	ppm	0,0	REPORTAR
Aluminio	ASTM D-6595	ppm	0,3	REPORTAR
Estaño	ASTM D-6595	ppm	0,2	REPORTAR
Silicio	ASTM D-6595	ppm	0,2	REPORTAR
COMENTARIOS:				
Por solicitud del cliente se reportan los valores sin el redondeo que sugiere la norma ASTM D 6595				
Los resultados obtenidos corresponden estrictamente a la muestra analizada y no a otra de similar procedencia.				
DIAGNOSTICO:				
No se hace diagnóstico, dado que no se cuenta con todos los análisis característicos para este tipo de muestra.				

Anexo c

Análisis muestra



Reporte Nro: 35261	Fecha: 25/02/2019
Muestra	
Código: 626	Muestra Lab No: 88100
Nombre: ANDRES FELIPE MALDONADO	Fecha toma de muestra: 20/02/2019
Vendedor:	Fecha de recepción: 20/02/2019
Código: 01	Muestra Cliente Nro: 0
Nombre: JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZ	Periodo de servicio: 0
Ciudad: Bogotá D.C.	Unidad: No Aplica
Dirección:	
Contacto: JUAN DAVID HERNANDEZ PEDRAZ	
Teléfono: 3219660982	
Email: juan.hernandez9@estudiantes.uameric	

Equipo:		Producto:	
Código: NO APLICA	Código: HIDRÁULICO REC	Nombre: ACEITE HIDRÁULICO RECUPERADO	Grado:
Clase: NR.			
Marca: NR			
Modelo: NR			
Parte: NR			

ANÁLISIS	METODO	UNIDADES	RESULTADO	COMENTARIO
Apariencia	MI-001	N.A.	OPACA	REPORTAR
Cobre	ASTM D-6595	ppm	< 1	REPORTAR
Hierro	ASTM D-6595	ppm	55	REPORTAR
Plomo	ASTM D-6595	ppm	< 1	REPORTAR
Cromo	ASTM D-6595	ppm	< 1	REPORTAR
Aluminio	ASTM D-6595	ppm	1,2	REPORTAR
Estaño	ASTM D-6595	ppm	1,6	REPORTAR
Silicio	ASTM D-6595	ppm	1,8	REPORTAR

COMENTARIOS:
Los resultados obtenidos corresponden estrictamente a la muestra analizada y no a otra de similar procedencia.
DIAGNOSTICO:
No se hace diagnóstico, dado que no se cuenta con todos los análisis característicos para este tipo de muestra.

Anexo D

Valores básicos de L y H, para la determinación del índice de viscosidad

<i>Visc. 100 °C (cSt)</i>	<i>L</i>	<i>H</i>			
			5,000	40,230	28,490
2,000	7,994	6,394	5,100	41,990	29,460
2,100	8,64	6,894	5,200	43,760	30,430
2,200	9,309	7,410	5,300	45,530	31,400
2,300	10,000	7,944	5,400	47,310	32,370
2,400	10,710	8,496	5,500	49,090	33,340
2,500	11,450	9,063	5,600	50,870	34,320
2,600	12,210	9,647	5,700	52,640	35,290
2,700	13,000	10,250	5,800	54,420	36,260
2,800	13,800	10,870	5,900	56,200	37,230
2,900	14,630	11,500	6,000	57,970	38,190
3,000	15,490	12,150	6,100	59,740	39,170
3,100	16,360	12,820	6,200	61,520	40,150
3,200	17,260	13,510	6,300	63,320	41,130
3,300	18,180	14,210	6,400	65,180	42,140
3,400	19,120	14,930	6,500	67,120	43,180
3,500	20,090	15,660	6,600	69,160	44,240
3,600	21,080	16,420	6,700	71,290	45,330
3,700	22,090	17,190	6,800	73,480	46,440
3,800	23,130	17,970	6,900	75,720	47,510
3,900	24,190	18,770	7,000	78,000	48,570
4,000	25,320	19,560	7,100	80,250	49,610
4,100	26,500	20,370	7,200	82,390	50,690
4,200	27,750	21,210	7,300	84,530	51,780
4,300	29,070	22,050	7,400	86,660	52,880
4,400	30,480	22,920	7,500	88,850	53,980
4,500	31,960	23,810	7,600	91,040	55,090
4,600	33,520	24,710	7,700	93,200	56,200
4,700	35,130	25,630	7,800	95,430	57,310
4,800	36,790	26,570	7,900	97,720	58,450
4,900	38,500	27,530	8,000	100,000	59,600
			8,100	102,300	60,740
			8,200	104,600	61,890

8,300	106,900	63,050	11,600	190,400	102,800
8,400	109,200	64,180	11,700	193,300	104,100
8,500	111,500	65,320	11,800	196,200	105,400
8,600	113,900	66,480	11,900	199,000	106,700
8,700	116,200	67,640	12,000	201,900	108,000
8,800	118,500	68,790	12,100	204,800	109,400
8,900	120,900	69,940	12,200	207,800	110,700
9,000	123,300	71,100	12,300	210,700	112,000
9,100	125,700	72,270	12,400	213,600	113,300
9,200	128,000	73,420	12,500	216,600	114,700
9,300	130,400	74,570	12,600	219,600	116,000
9,400	132,800	75,730	12,700	222,600	117,400
9,500	135,300	76,910	12,800	225,700	118,700
9,600	137,700	78,080	12,900	228,800	120,100
9,700	140,100	79,270	13,000	231,900	121,500
9,800	142,700	80,460	13,100	235,000	122,900
9,900	145,200	81,670	13,200	238,100	124,200
10,000	147,700	82,870	13,300	241,200	125,600
10,100	150,300	84,080	13,400	244,300	127,000
10,200	152,900	85,300	13,500	247,400	128,400
10,300	155,400	86,510	13,600	250,600	129,800
10,400	158,000	87,720	13,700	253,800	131,200
10,500	160,600	88,950	13,800	257,000	132,600
10,600	163,200	90,190	13,900	260,100	134,000
10,700	165,800	91,400	14,000	263,300	135,400
10,800	168,500	92,650	14,100	266,600	136,800
10,900	171,200	93,920	14,200	269,800	138,200
11,000	173,900	95,190	14,300	273,000	139,600
11,100	176,600	96,450	14,400	276,300	141,000
11,200	179,400	97,710	14,500	279,600	142,400
11,300	182,100	98,970	14,600	283,000	143,900
11,400	184,900	100,200	14,700	286,400	145,300
11,500	187,600	101,500			

14,800	289,700	146,800	18,100	412,600	197,800
14,900	293,000	148,200	18,200	416,700	199,400
15,000	296,500	149,700	18,300	420,700	201,000
15,100	300,000	151,200	18,400	424,900	202,600
15,200	303,400	152,600	18,500	429,000	204,300
15,300	306,900	154,100	18,600	433,200	205,900
15,400	310,300	155,600	18,700	437,300	207,600
15,500	313,900	157,000	18,800	441,500	209,300
15,600	317,500	158,600	18,900	445,700	211,000
15,700	321,100	160,100	19,000	449,000	212,700
15,800	324,600	161,600	19,100	454,200	214,400
15,900	328,300	163,100	19,200	458,400	216,100
16,000	331,900	164,600	19,300	462,700	217,700
16,100	335,500	166,100	19,400	467,000	219,400
16,200	339,200	167,700	19,500	471,300	221,100
16,300	342,900	169,200	19,600	475,700	222,800
16,400	346,600	170,700	19,700	479,700	224,500
16,500	350,300	172,300	19,800	483,900	226,600
16,600	354,100	173,800	19,900	488,600	227,700
16,700	358,000	175,400	20,000	493,200	229,500
16,800	361,700	177,000	20,200	501,500	233,000
16,900	365,600	178,600	20,400	510,800	236,400
17,000	369,400	180,200	20,600	519,900	240,100
17,100	373,300	181,700	20,800	528,800	243,500
17,200	377,100	183,300	21,000	538,400	247,100
17,300	381,000	184,900	21,200	547,500	250,700
17,400	384,900	186,500	21,400	556,700	254,200
17,500	388,900	188,100	21,600	566,400	257,800
17,600	392,700	189,700	21,800	575,600	261,500
17,700	396,700	191,300	22,000	585,200	264,900
17,800	400,700	192,900	22,200	595,000	268,600
17,900	404,600	194,600	22,400	604,300	272,300
18,000	408,600	196,200	22,600	614,200	275,800

22,800	624,100	279,600	29,400	987,100	409,500
23,000	633,600	283,300	29,600	998,900	413,500
23,200	643,400	286,800	29,800	1011,000	417,600
23,400	653,800	290,500	30,000	1023,000	421,700
23,600	663,300	294,400	30,500	1055,000	432,400
23,800	673,700	297,900	31,000	1086,000	443,200
24,000	683,900	301,800	31,500	1119,000	454,000
24,200	694,500	305,600	32,000	1151,000	464,900
24,400	704,200	309,400	32,500	1184,000	475,900
24,600	714,900	313,000	33,000	1217,000	487,000
24,800	725,700	317,000	33,500	1251,000	498,100
25,000	736,500	320,900	34,000	1286,000	509,600
25,200	747,200	324,900	34,500	1321,000	521,100
25,400	758,200	328,800	35,000	1356,000	532,500
25,600	769,300	332,700	35,500	1391,000	544,000
25,800	779,700	336,700	36,000	1427,000	555,600
26,000	790,400	340,500	36,500	1464,000	567,100
26,200	801,600	344,400	37,000	1501,000	579,300
26,400	812,800	348,400	37,500	1538,000	591,300
26,600	824,100	352,300	38,000	1575,000	603,100
26,800	835,500	356,400	38,500	1613,000	615,000
27,000	847,000	360,500	39,000	1651,000	627,100
27,200	857,500	364,600	39,500	1691,000	639,200
27,400	869,000	368,300	40,000	1730,000	651,800
27,600	880,600	372,300	40,500	1770,000	664,200
27,800	892,300	376,400	41,000	1810,000	676,600
28,000	904,100	380,600	41,500	1851,000	689,100
28,200	915,800	384,600	42,000	1892,000	701,900
28,400	927,600	388,800	42,500	1935,000	714,900
28,600	938,600	393,000	43,000	1978,000	728,200
28,800	951,200	396,600	43,500	2021,000	741,300
29,000	963,400	401,100	44,000	2064,000	754,400
29,200	975,400	405,300	44,500	2108,000	767,600

45,000	2152,000	780,900	61,500	3850,000	1270,000
45,500	2197,000	794,500	62,000	3908,000	1286,000
46,000	2243,000	808,200	62,500	3966,000	1303,000
46,500	2288,000	821,900	63,000	4026,000	1319,000
47,000	2333,000	835,500	63,500	4087,000	1336,000
47,500	2380,000	849,200	64,000	4147,000	1353,000
48,000	2426,000	863,000	64,500	4207,000	1369,000
48,500	2473,000	876,900	65,000	4268,000	1386,000
49,000	2521,000	890,900	65,500	4329,000	1402,000
49,500	2570,000	905,300	66,000	4392,000	1419,000
50,000	2618,000	919,600	66,500	4455,000	1436,000
50,500	2667,000	933,600	67,000	4517,000	1454,000
51,000	2717,000	948,200	67,500	4580,000	1471,000
51,500	2767,000	962,900	68,000	4645,000	1488,000
52,000	2817,000	977,500	68,500	4709,000	1506,000
52,500	2867,000	992,100	69,000	4773,000	1523,000
53,000	2918,000	1007,000	69,500	4839,000	1541,000
53,500	2969,000	1021,000	70,000	4905,000	1558,000
54,000	3020,000	1036,000			
54,500	3073,000	1051,000			
55,000	3126,000	1066,000			
55,500	3180,000	1082,000			
56,000	3233,000	1097,000			
56,500	3286,000	1112,000			
57,000	3340,000	1127,000			
57,500	3396,000	1143,000			
58,000	3452,000	1159,000			
58,500	3507,000	1175,000			
59,000	3563,000	1190,000			
59,500	3619,000	1206,000			
60,000	3676,000	1222,000			
60,500	3734,000	1238,000			
61,000	3792,000	1254,000			

ANEXO E
Flujo de caja

meses	0	1	2	3	4	5
Ingresos						
Ingresos por ventas		\$ 82.500.000,00	\$ 82.500.000,00	\$ 90.000.000,00	\$ 90.000.000,00	\$ 108.000.000,00
Total ingresos		\$ 82.500.000,00	\$ 82.500.000,00	\$ 90.000.000,00	\$ 90.000.000,00	\$ 108.000.000,00
ICA		\$ 82.500,00	\$ 82.500,00	\$ 90.000,00	\$ 90.000,00	\$ 108.000,00
A. ingresos despues de ica		\$ 82.417.500,00	\$ 82.417.500,00	\$ 89.910.000,00	\$ 89.910.000,00	\$ 107.892.000,00
Egresos						
Costos Materias primas		\$ 40.000.000,00	\$ 40.000.000,00	\$ 45.000.000,00	\$ 45.000.000,00	\$ 45.000.000,00
Gasto Servicios publicos		\$ 1.028.585,00	\$ 1.028.585,00	\$ 1.028.585,00	\$ 1.028.585,00	\$ 1.028.585,00
Mantenimiento equipos		\$ 13.583.324,00	\$ 13.583.324,00	\$ 13.583.324,00	\$ 13.583.324,00	\$ 13.583.324,00
Gastos administrativos		\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00
Depresiacion		\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00
Nomina		\$ 20.926.447,00	\$ 21.972.122,00	\$ 23.017.797,00	\$ 24.063.472,00	\$ 25.109.147,00
Gastos Financieros		\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00
Total De Egresos		\$ 76.556.005,00	\$ 77.601.680,00	\$ 83.647.355,00	\$ 84.693.030,00	\$ 85.738.705,00
A1-B1 Utilidad antes de imporrenta		\$ 5.861.495,00	\$ 4.815.820,00	\$ 6.262.645,00	\$ 5.216.970,00	\$ 22.153.295,00
Imporrenta		\$ 1.934.293,35	\$ 1.589.220,60	\$ 2.066.672,85	\$ 1.721.600,10	\$ 7.310.587,35
Utilidad Despues de imporrenta		\$ 3.927.201,65	\$ 3.226.599,40	\$ 4.195.972,15	\$ 3.495.369,90	\$ 14.842.707,65
Depresiacion		\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00	\$ 1.017.649,00
Flujo de caja operacional		\$ 4.944.850,65	\$ 4.244.248,40	\$ 5.213.621,15	\$ 4.513.018,90	\$ 15.860.356,65
Inversion	\$ 11.176.490,00					
Diferidos						
Activos Fijos "equipos	\$ 10.176.490,00					
Amortizacion		\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00
Prestamo	\$ 0,00					
FCN	-\$ 21.352.980,00	\$ 4.944.850,65	\$ 4.244.248,40	\$ 5.213.621,15	\$ 4.513.018,90	\$ 15.860.356,65

VNP	\$ 1.610.202,50
TIR	14%
TVR	14%
IR	1,08
R B/c	1

empresa						
Años	0	1	2	3	4	5
cantidad		165	165	180	180	180
Presio de recuperacion		500.000	500.000	500.000	500.000	600.000

	Cantidad	salario mensual unitario (incluido parafiscales)	Total por cargo
operarios fase 3	1	\$ 1.656.731	\$ 1.656.731
		Total Nomina	\$ 1.656.731

Servicios publicos por año	\$ 1.200.000
mantenimiento equipos	\$ 13.583.324
Gastos administrativos Mensuales	\$ 0
Activo fijo "maquinaria"	\$ 10.176.490

Servicios publicos por año	\$ 1.200.000
mantenimiento equipos	\$ 13.583.324
Gastos administrativos Mensuales	\$ 0
Activo fijo "maquinaria"	\$ 10.176.490

Anexo h

Equipos

FICHA TÉCNICA: HORNO PARA EVAPORACION



Fuente.

<https://spanish.alibaba.com/product-detail/price-of-industrial-evaporator-60758328472.html?spm=a2700.8699010.normalList.79.3b907f60OhfxA1>

Marca: zombo

Modelo: TR200

Material: Acero inoxidable

TIPO:1 2: Rotacion pelicula delgada

Voltaje: 380 V

Capacidad de producción: 300 a 1400 kg/h

POTENCIA: 1.5kw

Dimeciones: 2m x 3.50mm x 5m

. Tiene una buena eficacia en la transferencia de calor, y su capacidad y fuerza de evaporación pueden alcanzar 200 kg/m² · hr, con una alta eficiencia térmica.

- El tiempo de calentamiento del Material es corto, de 5 segundos a 10 segundos. En condiciones de vacío, el equipo puede conservar los diversos ingredientes del material sensible al calor y producir una no descomposición para garantizar la calidad de los productos.

La viscosidad del Material puede ser de hasta 10 millones de tabor (CP). Seguridad, economía, eficiencia, mantenimiento.

Anexo I

FICHA TÉCNICA: TANQUE DE MEZCLA	
	<p>Marca: SPX motor simens Modelo: S-J-B-P Uso: solidos acidos fuertes Capacidad: 5000L Voltaje: 220 V Energia : 0.5KW Dimension: 7m*5m*2760mm</p>
<p>Fuente. https://spanish.alibaba.com/product-detail/spx-anti-corrosion-pp-pvc-mixing-machine-pp-tank-for-disinfectant-60464207769.html?spm=a2700.8699010.normalList.106.fab05bafPUBOCX</p>	<p>Características: -La Olla mezcladora está hecha de PP. PVC de plástico material es muy difícil de reacción con cualquier producto químico. la hoja de agitación está hecha de esmalte. esta máquina tiene motor Preventor de explosión. es muy fácil de manejar, ligero.</p>

Anexo J

FICHA TÉCNICA: TANQUE DE SEDIMENTACION



Fuente.

<https://spanish.alibaba.com/product-detail/Scrapers-for-Sedimentation-Tank-Clarifier-62001389908.html?spm=a2700.galleryofferlist.normalList.56.3a48538cyspdvE>

Marca: AFTIPAK
Modelo: Tanque circular
Peso: 50kg
tamaño: 38M
Potencia: 2.2 KW
CONTROL: PLC
PROFUNDIDAD: 4.05 M *4m*
ANCHO DE ENTRADA:4 M
Capacidad:40 -50kg/h

Características:

-Tanque con sensor de nivel para diferentes procesos de sedimentación a un precio accesible con control de interruptor simple y conteo de nivel
-contiene brazos giratorios en hojas de rascador para una sedimentación adecuada y rápida

FICHA TÉCNICA: CENTRIFUGA



Fuente

• <https://spanish.alibaba.com/product-detail/ps-industrial-centrifuge-60481640084.html?spm=a2700.8699010.normalList.10.47a727feTILGKO&s=p>

Marca: PEONIA
Modelo: SS304
Peso: 180 KG
Potencia: 1,5 kw
Revoluciones: 3600 r.p.m
Voltaje: 380 V
Dimensiones :
2.25m*265m*1480
Capacidad: 5000sets

Características:

-Este tipo de centrifugadoras son equipos de filtrado de tipo de cierre hermético y descarga superior.

-funciona y se ajusta por PLC y se descarga manualmente desde la cubierta superior.

- El cuenco puede estar hecho de acero inoxidable 304.

- funcionamiento suave, control fácil, cierre hermético, reducción de la contaminación cruzada. 800

FICHA TÉCNICA: Destilador



Fuente

https://www.alibaba.com/product-detail/High-quality-stainless-steel-essential-oil_60511871493.html?spm=a2700.gallery_search_cps.normalList.23.49ab54642UVu3r

Marca: semens
Modelo: SS316l
Peso: 35.5kg
Tamaño: 5000L
Espesor :1.2 m
Dimensiones :
6,0X7,0X1,80 cm
Capacidad: 55
galones/h
Potencia: 1.1kw

Características:

Destilador usado en aceites esenciales aguas solventes y otro precio accesible con capacidad amplia en plantas piloto acero inoxidable automático

CARGO FIJO \$/Suscriptor/2 meses	dic-2018	ene-2019	feb-2019	mar-2019	abr-2019	may-2019	jun-2019	jul-2019	ago-2019	sep-2019
COMERCIAL	9.190,38	9.190,38	9.190,38	9.467,94	9.467,94	9.467,94	9.467,94	9.467,94	9.467,94	9.467,94
INDUSTRIAL	8.026,26	8.026,26	8.026,26	8.268,66	8.268,66	8.268,66	8.268,66	8.268,66	8.268,66	8.268,66
OFICIAL	6.126,92	6.126,92	6.126,92	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96
ESPECIAL	6.126,92	6.126,92	6.126,92	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96	6.311,96
CONSUMO \$/m3	dic-2018	ene-2019	feb-2019	mar-2019	abr-2019	may-2019	jun-2019	jul-2019	ago-2019	sep-2019
COMERCIAL	3.979,58	3.979,58	3.979,58	4.095,71	4.095,71	4.095,71	4.095,71	4.095,71	4.095,71	4.093,95
INDUSTRIAL	3.793,86	3.793,86	3.793,86	3.904,57	3.904,57	3.904,57	3.904,57	3.904,57	3.904,57	3.902,90
OFICIAL	2.653,05	2.653,05	2.653,05	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.729,30
ESPECIAL	2.653,05	2.653,05	2.653,05	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.730,47	2.729,30

