

EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE PRETRATAMIENTO REQUERIDOS
PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LOS RESIDUOS DE ACEITES
USADOS DE MOTOR DIÉSEL

ANGIE CAROLINA CUERVO SUÁREZ
JUAN DAVID VALDIRI PALACIOS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE PRETRATAMIENTO REQUERIDOS
PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LOS RESIDUOS DE ACEITES
USADOS DE MOTOR DIÉSEL

ANGIE CAROLINA CUERVO SUÁREZ
JUAN DAVID VALDIRI PALACIOS

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

Directora
DIANA MARCELA CUESTA PARRA
Ingeniera Ambiental

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota de Aceptación (Subdirector Operativo de Investigaciones)

Firma Docente Investigador

Firma Docente Jurado 1

Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D.C., Febrero de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director General de Investigación y Proyección Social

Dr. MANUEL CANCELADO JIMÉNEZ

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la 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.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para afrontar cada reto y permitirme culminar esta etapa de mi vida y de mi formación profesional.

A mi madre, Doris Suárez, por su apoyo incondicional, por cada día motivarme a ser mejor persona, por todo su esfuerzo y dedicación y por todo su amor.

A mi padre, Miguel Cuervo, por brindarme su apoyo y por todo su esfuerzo.

A mi hermano Esteban, por ser siempre mi compañía, mi cómplice, por alegrar mis días y brindarme todo su apoyo.

A mi familia y amigos por creer en mí y apoyarme a lo largo de todo este proceso.

A Juan David Valdiri, por permitirme compartir este proyecto y sueño juntos, por su apoyo incondicional, confiar en mí, por toda su paciencia y siempre motivarme a ser mejor persona. Gracias por cada momento compartido en estos años y por alegrar mis días.

A mis maestros, por su esfuerzo y dedicación, por enseñarme y brindar sus conocimientos para mi desarrollo profesional y de vida.

Angie Carolina Cuervo Suárez

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida y de mi formación profesional.

A mi madre, Dora Palacios Manrique, por su amor, por ser mi compañía, mi consejera y darme fortaleza durante todo este camino, por cada día motivarme a ser mejor y alcanzar todo lo que me proponga.

A mi padre, Juan Alberto Valdiri, por siempre estar para darme apoyo, por su amor, comprensión y alegría, por la motivación en momentos difíciles.

A mi hermano Santiago, por siempre motivarme a dar lo mejor de mí y apoyarme a lo largo de este camino.

A mis tías Gloria y Marina, porque sin ellas este sueño no se estaría cumpliendo, gracias por su apoyo y amor incondicional.

A mi familia y mi abuelita, por siempre creer en mí y apoyarme a lo largo de todo este proceso. Gracias por todo el esfuerzo que hacen para darme siempre lo mejor.

A Angie Carolina Cuervo, porque sin ella nada de esto habría sido posible, por afrontar conmigo todos los desafíos que ha traído este proceso, por darme su apoyo, confiar en mí, motivarme a superarme cada día y por su paciencia. Gracias por ser la más grata compañía estos años, gracias por ayudarme a construir este sueño de poder ser Ingeniero Químico.

A mis amigos, sin ellos este camino no habría sido tan grato e inolvidable, gracias totales.

A todos y cada uno de los profesores que de una u otra forma tuvieron que ver con mi proceso formativo, cada enseñanza que me dejaron me hará un gran profesional. Gracias a cada uno de ellos por brindarme las herramientas tanto técnicas como humanas para poder desempeñarme como Ingeniero Químico y contribuir a la sociedad.

Juan David Valdiri Palacios

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Universidad de América, por acogernos estos años, brindarnos un entorno agradable y propicio para formarnos como Ingenieros Químicos.

Al grupo de investigación en Energías Alternativas, por generar en nosotros un pensamiento de curiosidad, por invitarnos a ver más a fondo de las cosas, por incentivar a la investigación.

Al SENA-Centro de Tecnologías del Transporte (CTT), por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto, y adicionalmente brindarnos apoyo técnico, humano y financiero cuando lo necesitamos.

A la línea de biotecnología y nanotecnología del Tecnoparque nodo Bogotá, por brindarnos un espacio agradable de trabajo, apoyarnos y suministrarnos materiales, equipos y asesorías técnicas.

A nuestra directora e Ingeniera Ambiental Diana Marcela Cuesta Parra, por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto, por su paciencia, por acompañarnos y estar siempre pendiente de nosotros a lo largo de este trayecto.

A nuestra co-directora y Microbióloga Industrial Adriana Inés Páez Morales, por su apoyo y asesoría durante el desarrollo del proyecto.

Al microbiólogo Diego Fajardo, gestor en la red de Tecnoparque, por acompañarnos a lo largo de este proceso, estar siempre pendiente de nosotros y brindarnos su asesoría técnica de forma permanente.

A Daniel Alejandro Lozano, profesional en investigación del SENA-Centro de Tecnologías del Transporte (CTT), por su paciencia y su apoyo en el desarrollo experimental del proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	23
1. MARCO TEÓRICO	24
1.1 ACEITES LUBRICANTES	24
1.1.1 Elaboración de aceites lubricantes	24
1.1.2 Aditivos en los aceites lubricantes	25
1.1.3 Propiedades de los aceites lubricantes	26
1.1.4 Clasificación de los lubricantes	27
1.2 ACEITES USADOS	31
1.2.1 Características de los aceites usados	31
1.2.2 Sustancias contaminantes presentes en los aceites usados	32
1.2.3 Normatividad sobre la disposición y manejo de aceites usados	33
1.2.4 Destino y reutilización de los aceites usados	36
1.2.5 Aplicaciones del aceite usado	36
1.2.6 Efectos de los contaminantes presentes en los aceites usados	37
1.3 REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES	38
1.3.1 Métodos de reacondicionamiento	39
1.3.2 Re-refinación	40
1.3.3 Técnicas de caracterización	42
2. METODOLOGÍA	45
2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL ACEITE USADO DE MOTOR DIÉSEL	45
2.1.1 Muestreo	45
2.1.2 Técnicas de caracterización de aceites lubricantes	45
2.2 TRATAMIENTO DEL ACEITE USADO DE MOTOR	47
2.2.1 Selección de los tratamientos	48
2.2.2 Reacondicionamiento de la muestra	49
2.3 TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ACIDIFICACIÓN	49
2.3.1 Metodología	51
2.3.2 Diseño de experimentos	52
2.4 TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ADSORCIÓN	52
2.4.1 Parámetros de Diseño	55
2.4.2 Construcción de la torre de adsorción	63
2.4.3 Diseño de experimentos	69

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	70
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL ACEITE USADO DE MOTOR DIÉSEL	70
3.1.1 Muestreo	70
3.1.2 Densidad	71
3.1.3 Viscosidad	72
3.1.4 pH	74
3.1.5 Elementos de desgaste	75
3.2 REACONDICIONAMIENTO DE MUESTRA	80
3.3 TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ACIDIFICACIÓN	83
3.4 TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ADSORCIÓN	90
4. CONCLUSIONES	97
5. RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	106

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición de aceite base	24
Tabla 2. Características típicas del aceite Movil Delvac MX 15W40	26
Tabla 3. Características típicas de los aceites usados	31
Tabla 4. Componentes contaminantes de los aceites usados.	32
Tabla 5. Distribución del mercado de aceites lubricantes en Colombia	34
Tabla 6. Normatividad colombiana para tratamiento y manejo de aceites	35
Tabla 7. Métodos para el reacondicionamiento de aceite lubricante usado	39
Tabla 8. Métodos de re-refinamiento de aceites	41
Tabla 9. Caracterizaciones para aceite lubricante usado	42
Tabla 10. Diseño de experimentos para tratamiento de acidificación	52
Tabla 11. Composición de la ilmenita	58
Tabla 12. Propiedades físicas y químicas de la ilmenita	59
Tabla 13. Parámetros para la construcción del filtro de adsorción	63
Tabla 14. Datos para cálculo de tasa de filtración	67
Tabla 15. Tasa de filtración para filtros de carbón activado e ilmenita	69
Tabla 16. Diseño de experimentos para tratamiento de adsorción	69
Tabla 17. Datos experimentales de densidad para aceite lubricante usado de motor diésel	71
Tabla 18. Datos experimentales de viscosidad dinámica para aceite lubricante usado de motor diésel	72
Tabla 19. Datos calculados de viscosidad cinemática para aceite lubricante usado de motor diésel	73
Tabla 20. Datos experimentales de pH para aceite lubricante usado de motor diésel	74
Tabla 21. Datos experimentales de densidad para aceite lubricante usado de motor diésel después de filtración	81
Tabla 22. Datos experimentales de viscosidad dinámica para aceite lubricante usado de motor diésel después de filtración	82
Tabla 23. Datos calculados de viscosidad cinemática para aceite lubricante usado de motor diésel después de filtración	82
Tabla 24. Desarrollo del diseño de experimentos para tratamiento de acidificación, en % de remoción	89
Tabla 25. Análisis de Varianza ANOVA para el tratamiento de acidificación	90
Tabla 26. Desarrollo del diseño de experimentos para tratamiento de adsorción, en % de remoción	95
Tabla 27. Análisis de Varianza ANOVA para el tratamiento de adsorción	96

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Volumen total año de aceite lubricante usado dispuestos correctamente por operadores avalados FAU Vs. Total estimado generado	34
Figura 2. Montaje Filtración	49
Figura 3. Diagrama de bloques de proceso de acidificación	50
Figura 4. Diagrama de bloques de proceso de adsorción con carbón activado	54
Figura 5. Diagrama de bloques de proceso de adsorción con ilmenita	54
Figura 6. Medios de filtración	56
Figura 7. Carbón activado granular	57
Figura 8. Ilmenita	60
Figura 9. Grava	61
Figura 10. Alturas de lechos de filtración	62
Figura 11. Dimensiones del filtro de adsorción	63
Figura 12. Partes del filtro de adsorción	66
Figura 13. Filtros de adsorción	67

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Norma SAE J300, clasificación de aceites lubricantes.	28
Cuadro 2. Clasificación API de los aceites	29
Cuadro 3. Materiales para la construcción del filtro de adsorción	64
Cuadro 4. Resultados de la caracterización del aceite usado de motor diésel	70
Cuadro 5. Estado de los parámetros de análisis	80
Cuadro 6. Requisitos de las bases lubricantes re-refinadas según norma NTC 5995	83
Cuadro 7. Resultados obtenidos para el tratamiento de acidificación	84
Cuadro 8. Comparación NTC 5995 frente al aceite tratado con 15%v/v de ácido sulfúrico	85
Cuadro 9. Comparación estado original del aceite frente a la muestra final con tratamiento de acidificación	86
Cuadro 10. Comparación elementos que aumentan, disminuyen o se mantienen después del tratamiento de acidificación	86
Cuadro 11. Porcentaje de remoción de metales de desgaste para tratamiento de acidificación	88
Cuadro 12. Resultados obtenidos para el tratamiento de adsorción	91
Cuadro 13. Comparación NTC 5995 frente al aceite tratado en filtro de adsorción con lecho de ilmenita	92
Cuadro 14. Comparación estado original de aceite frente a la muestra final tratada por adsorción	93
Cuadro 15. Comparación de elementos que aumentan, disminuyen o se mantienen después del tratamiento de adsorción	93
Cuadro 16. Porcentaje de remoción de metales de desgaste para tratamiento de adsorción	94

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción de ácido sulfúrico con metales	50
Ecuación 2. Reacción de neutralización con hidróxido de calcio	50
Ecuación 3. Relación del diámetro y altura del filtro de adsorción	62
Ecuación 4. Tasa de filtración	68
Ecuación 5. Área filtrante	68
Ecuación 6. Viscosidad cinemática	73
Ecuación 7. Porcentaje de remoción	87

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Caracterización de aceite usado sin tratar laboratorio SGS	107
Anexo B. Caracterización de aceite usado sin tratar laboratorio Gecolsa	108
Anexo C. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 5% de ácido sulfúrico	109
Anexo D. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 5% de ácido sulfúrico. Replica 1	110
Anexo E. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 5% de ácido sulfúrico. Replica 2	111
Anexo F. caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 10% de ácido sulfúrico	112
Anexo G. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 10% de ácido sulfúrico. Replica 1	113
Anexo H. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 10% de ácido sulfúrico. Replica 2	114
Anexo I. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 15% de ácido sulfúrico	115
Anexo J. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 15% de ácido sulfúrico. Replica 1	116
Anexo K. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de acidificación con 15% de ácido sulfúrico. Replica 2	117
Anexo L. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de adsorción con carbón activado	118
Anexo M. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de adsorción con carbón activado. Replica 1	119
Anexo N. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de adsorción con ilmenita	120
Anexo O. Caracterización de aceite usado con tratamiento fisicoquímico de adsorción con ilmenita. Replica 1	121
Anexo P. Protocolo para determinación de densidad	122
Anexo Q. Protocolo para determinación de viscosidad	125
Anexo R. Protocolo para determinación de pH	128

LISTA DE ABREVIATURAS

API	American Petroleum Institute (Instituto Americano de Petróleo)
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials)
CTT	Centro de Tecnologías del Transporte
cP	Centipoise
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
NTC	Norma Técnica Colombiana
p/p	Relación peso a peso
ppm	Partes por millón
sCt	Centistokes
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices)
TAN	Total Acid Number (Número Ácido Total)
TBN	Total Base Number (Número Básico Total)
v/v	Relación peso a peso

GLOSARIO

ACEITE LUBRICANTE DE MOTOR: los aceites lubricantes son sustancias líquidas derivadas del petróleo, compuestas en su mayoría por hidrocarburos, que se utilizan para proteger contra la corrosión, evitar la fricción entre piezas, entre otras aplicaciones¹.

ACEITE LUBRICANTE USADO: aceite lubricante usado, bien sea de motor, de transmisión o hidráulicos, con base mineral o sintética, de desecho, generado a partir del momento en que deja de cumplir la función inicial para la cual fue creado².

ACEITE USADO TRATADO: es aquel aceite que ha sido sometido mediante métodos físicos, químicos o biológicos a un proceso de limpieza o remoción de elementos tales como sedimentos, compuestos de cloro, metales pesados y otros elementos³.

ACIDIFICACIÓN: el aceite lubricante usado se somete a una evaporación de aquellos productos ligeros como agua e hidrocarburos del rango de la gasolina. Posteriormente el aceite es tratado con ácido sulfúrico se provoca un aumento en la acidez total de la muestra en el que se busca la oxidación de sulfatos. El producto obtenido después del tratamiento ácido se envía a filtración con arcilla y cal, para mejorar su color y su acidez⁴.

ADSORCIÓN: operación que se realiza generalmente en una torre de adsorción, donde ocurre un intercambio iónico entre el fluido y un sólido insoluble, con el fin de remover iones de carga positiva a negativa agregando una carga similar o equivalente⁵.

BASE LUBRICANTE RE-REFINADA: producto obtenido a partir de procesos fisicoquímicos de purificación de aceite lubricante usado y el posterior tratamiento de refinación⁶.

¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor industrial. 2 ed. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014. p. 6

² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 3.

³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual técnico. Op. Cit., p. 17

⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 8.

⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual técnico. Op. Cit., p. 61.

⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 3.

CARACTERIZACIÓN: técnicas usadas con el fin de determinar la composición y propiedades de una muestra problema.

CARBÓN ACTIVADO: adsorbente con área superficial extensa, alta porosidad de bajo costo, usado principalmente para adsorción de metales pesados y compuestos orgánicos⁷.

ELEMENTOS DE DESGASTE: elementos presentes en el aceite de motor, su incremento representa el desgaste del aceite y la reducción de su vida útil. Constituyentes de aceites producidos a raíz de su desgaste en el motor o ingreso de contaminante desde el exterior. Entre ellos se pueden destacar el calcio, magnesio, molibdeno, fósforo, zinc, silicio, sodio, aluminio, cromo, cobre, hierro, plomo, níquel, estaño, potasio, vanadio, hollín, oxidación, nitración, sulfatación, agua y combustible. Debido a su toxicidad, la presencia de cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá con gran número de los usos del aceite o agua.

ILMENITA: mineral de aspecto similar a la arcilla o la arena, se compone principalmente de óxido de hierro y óxido de titanio⁸.

PRE-TRATAMIENTO: consiste en eliminar una parte importante de los contaminantes del aceite usado como agua, hidrocarburos ligeros, lodos, partículas gruesas, entre otros⁹.

PROCESO DE RE-REFINACIÓN: tratamiento por el cual un aceite lubricante usado se procesa y se refina para obtener una base lubricante que cumpla los requisitos establecidos por la normatividad y pueda ser usado en la fabricación de aceites y grasas lubricantes¹⁰. En este proceso se eliminan las impurezas, solubles e insolubles, que contiene el aceite usado¹¹.

RECUPERACIÓN: proceso industrial cuyo objeto es aprovechar los aceites usados, bien sea en forma de materias primas o energía¹².

⁷ REYES, Erik; CERINO, Felipe y SUÁREZ, Martha. Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. En: Ingenierías. Abril-Junio, 2006. Vol. IX, No. 31, p. 62.

⁸ GONZÁLEZ, Diana y NAISA, Lina. Evaluación de la actividad fotocatalítica de películas de ilmenita para la degradación de H₂S. Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería Química, año 2018, p. 24.

⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 8.

¹⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 3.

¹¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. cit., p. 8.

¹² *Ibíd.*, p. 8. Manual técnico

TRATAMIENTO: fase en la que se eliminan aditivos, metales pesados y lodos asfálticos del aceite usado¹³.

¹³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 8.

RESUMEN

A lo largo de su vida útil los aceites de motor pierden propiedades debido a la aparición de contaminantes e impurezas resultantes de procesos de oxidación indeseables. Se caracterizó aceite lubricante usado de motor diésel con el fin de establecer sus contaminantes, mediante el uso de técnicas analíticas y reducir su toxicidad mediante la aplicación de pretratamientos fisicoquímicos, brindando una solución ambiental como una alternativa de aprovechamiento de residuos de aceites de la industria automotriz.

El aceite lubricante de motor diésel proveniente del Centro de Tecnologías del Transporte fue caracterizado fisicoquímicamente, en este se determinaron parámetros como viscosidad, densidad, pH, TBN, TAN y elementos de desgaste. A partir de la caracterización fisicoquímica del aceite objeto de estudio presenta una viscosidad a 100°C de 6,2 cSt, una densidad de 0,87 g/ml, un pH dio 6,82, número ácido total (TBN) de 6,0 mgKOH/g y número básico total (TAN) de 2,15 mgKOH/g. De igual forma se encontraron altos niveles de agua y de contaminantes como hierro, aluminio, silicio, sodio, cobre.

Los tratamientos seleccionados para dar tratamiento al aceite usado son acidificación con ácido sulfúrico y adsorción. Para la acidificación se varía el porcentaje de ácido sulfúrico (5%, 10% y 15%) y para el tratamiento de adsorción se escogieron como adsorbente el carbón activado y la ilmenita. En el tratamiento de adsorción se obtuvieron porcentajes de remoción de elementos de desgaste máximos del 60% con ilmenita y un porcentaje máximo de remoción de 49% para carbón activado. Por otra parte, para tratamiento de acidificación se obtuvieron mayores remociones para el tratamiento con 15%v/v de ácido sulfúrico logrando remociones hasta del 80% para elementos como el fósforo, zinc y sodio, sin embargo, se evidencia un aumento superior al 100% de elementos como calcio, aluminio y manganeso

El proyecto, que se lleva a cabo con el apoyo del grupo de investigación en Energías Alternativas de la Universidad de América en conjunto con el Centro de Tecnologías del Transporte (CTT) de Sena.

Palabras clave: aceite de motor usado; reutilización; adsorción; acidificación; tratamiento.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos líquidos producto de derivados de petróleo y combustibles fósiles representa un serio problema ambiental, económico y social a nivel mundial, debido a su crecimiento exponencial, esto dado a que por ejemplo en Colombia según el RUNT¹⁴ hay cerca de 13,637 millones de automóviles, los cuales en promedio realizan un cambio de aceite dos veces por año, esto equivale a aproximadamente 26 millones de galones de aceite usado por año.

Los residuos provenientes de los aceites lubricantes de motor son catalogados como sustancias peligrosas según el Convenio de Basilea adoptado por Colombia en la Ley 253 de 1996 y ratificada en la Ley 1623 de 2013. Estos se consideran sustancias peligrosas debido a su alta concentración de compuestos orgánicos y metales pesados los cuales si no se clasifican y se tratan correctamente pueden convertirse en un riesgo para el ambiente y la salud.

Debido a la demanda de aceites lubricantes usados se ve la oportunidad de plantear una serie de pretratamientos fisicoquímicos para acondicionar el aceite lubricante, con el fin de dar un posterior tratamiento biológico.

Con el fin de conocer las condiciones iniciales del aceite usado proveniente del Centro de Tecnologías del Transporte (CTT) del SENA, se realiza una caracterización inicial, donde se determinan los parámetros de viscosidad, densidad y las concentraciones de elementos de desgaste.

El objetivo de la presente investigación es evaluar los procesos de pretratamiento fisicoquímicos requeridos para el tratamiento biológico de los residuos de aceites usados de motor diésel. Se habla de pretratamiento puesto que el aceite analizado y tratado en esta investigación pasara posteriormente a la siguiente fase del proyecto el cual involucra tratamientos biológicos.

Para el tratamiento y/o recuperación de aceites de motor diésel las tecnologías más aplicadas tienen su fundamento en técnicas fisicoquímicas, es por ello que para la realización de esta investigación se aplicaron las técnicas de acidificación y adsorción, ambas usadas ampliamente a nivel industrial. Mediante la aplicación de los tratamientos seleccionados se busca la remoción en la concentración de elementos de desgaste presentes en el aceite usado.

Para el proceso de acidificación se evaluaron diferentes volúmenes de adición de ácido para determinar cuál de ellos tiene una mayor incidencia en el porcentaje de

¹⁴ RUNT. REGISTRO UNICO DE NACIONAL DE TRÁNSITO. Estadísticas del RUNT. [En línea] Diciembre de 2017. [Citado en 4 de Febrero de 2018.] <http://www.runt.com.co/cifras?field_fecha_de_la_norma_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2017&field_grafica_value=5>

remoción de elementos de desgaste. Por otra parte, en cuanto al proceso de adsorción se presenta una variación frente al método convencional, este elemento diferenciador radica en la utilización de ilmenita como agente adsorbente, de igual manera se utilizará el agente adsorbente convencional, el carbón activado, finalmente se analizará cuál de los dos agentes reduce en mayor cantidad los elementos de desgaste.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los procesos de pretratamiento fisicoquímicos requeridos para el tratamiento biológico de los residuos de aceites usados de motor diésel.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente el aceite usado de motor diésel.
- Implementar los tratamientos seleccionados al aceite usado de motor.
- Comparar las condiciones resultantes del acondicionamiento fisicoquímico.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ACEITES LUBRICANTES

Los aceites lubricantes son sustancias líquidas derivadas del petróleo, compuestas en su mayoría por hidrocarburos, que se utilizan para proteger contra la corrosión, evitar la fricción entre piezas, entre otras aplicaciones. Estos aceites lubricantes se componen de dos partes fundamentales: aceite base y aditivos. Los aceites base, están compuestos entre un 75% y 85% por hidrocarburos, estos dan al aceite su carácter lubricante y pueden ser de tipo mineral cuando se obtienen del petróleo, sintéticos si se producen a partir de procesos de síntesis química y semi-sintéticos cuando son una mezcla de mineral y sintético. Y los aditivos, que son sustancias químicas adicionadas al aceite en un porcentaje de entre 15% a 25% en volumen, permiten aumentar la eficiencia, el rendimiento y la vida útil del aceite lubricante¹⁵.

1.1.1 Elaboración de aceites lubricantes. El aceite lubricante está compuesto por un aceite base, el cual puede ser de origen mineral o de origen sintético, dicho aceite proporciona los requisitos básicos de lubricación de un motor, pero esta base lubricante debe estar acompañada por una serie de aditivos para que este no se degrade y su vida útil se extienda¹⁶. La composición del aceite base se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de aceite base

Tipo de sustancia	Hidrocarburo	Composición
Parafinas	Alcanos	45-76%
Naftenos	Ciclo alcanos	13-45%
Aromáticos	Aromáticos	10-30%

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor industrial. 2 ed. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014. p. 14.

1.1.1.1 Aceites minerales. Los aceites base de tipo mineral son productos refinados de aceites crudo de petróleo, están compuestos por parafina, nafteno y compuestos aromáticos principalmente. El proceso de refinado inicia con una destilación en vacío, en esta se separan componentes en diferentes gamas de viscosidades, posterior a estos se requiere una purificación con el fin de extraer compuestos indeseables, como pueden ser ceras, azufre y compuestos aromáticos. Los aceites de base minerales predominan en la formulación de aceites para

¹⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. cit., p. 14.

¹⁶ PADILLA, Noel. Análisis de aceite para detección temprana de fallas en motores Caterpillar. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero mecánico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería, 2013. 65 p. 2.

motores¹⁷.

1.1.1.2 Aceites Sintéticos. Se forman por procesos en los cuales se hacen reaccionar compuestos químicos con una composición específica para lograr un producto final con propiedades planificadas y predecibles. Como resultado final se logra un producto con índices de viscosidad altos y de fluidez más baja, esto le da al lubricante una mayor acción lubricante en comparación con el aceite de base mineral. Como gran desventaja se tiene que para su obtención se requiere una alta inversión y, por ende, las existencias de este producto son bajas¹⁸.

1.1.2 Aditivos en los aceites lubricantes. Con el fin de mejorar las capacidades lubricantes del aceite base, y así mismo reforzar o modificar sus características para que pueda cumplir con las normativas establecidas, se requiere la adición de aditivos, como pueden ser: detergentes, dispersantes, inhibidores de oxidación, entre otros.

1.1.2.1 Detergentes. Su función es mantener limpio el motor, esto debido a que puede detener la formación y el depósito de compuestos insolubles. Generalmente son sales metálicas como sulfonatos, fosfanatos y salciltos¹⁹.

1.1.2.2 Agentes que aumentan la alcalinidad. Su función principal es neutralizar los ácidos producidos durante la combustión y la oxidación en sales neutralizadas. En la mayoría de casos los detergentes usados adicionalmente cumplen la función de neutralizantes²⁰.

1.1.2.3 Inhibidores de oxidación. Contribuyen a evitar el aumento de la viscosidad en el aceite, así mismo evita el desarrollo de ácidos orgánicos. Los inhibidores pueden ser: ditiofosfatos de zinc, sulfuros de fenato y esterres sulfurizados²¹.

1.1.2.4 Dispersante. Se adicionan dispersantes con el fin de impedir la formación de sedimentos, y así separar los contaminantes manteniéndolos en suspensión²².

1.1.2.5 Mejoradores del índice de viscosidad. Para que la viscosidad del aceite no se vea disminuida a raíz del aumento de temperatura se hace necesario adicionar al aceite base un mejorador del índice de viscosidad, estos generalmente

¹⁷ *Ibíd.*, p. 2.

¹⁸ *Ibíd.*, p. 3.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 4.

²⁰ *Ibíd.*, p. 4.

²¹ *Ibíd.*, p. 4.

²² *Ibíd.*, p. 5.

son productos como: poliisobutenos, polimetacrilatos y copolímeros de etileno y propileno²³.

1.1.3 Propiedades de los aceites lubricantes. Existe una amplia variedad de aceites lubricantes de motor en el mercado, entre ellos se encuentra el aceite Mobil Delvac MX 15W-40, este tiene un alto rendimiento en motores diésel y adicionalmente produce bajas emisiones de contaminantes²⁴. El aceite lubricante Mobil Delvac MX 15W-40 será utilizado para contrastar las condiciones de un aceite nuevo frente a las obtenidas tras la aplicación de los tratamientos, puesto que este es el aceite utilizado en los procesos de formación del Centro de Tecnologías del Transporte del SENA.

Algunas de las propiedades del aceite lubricante Mobil Delvac MX 15W-40 se describen a continuación y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características típicas del aceite Mobil Delvac MX 15W40.

Mobil Delvac MX 15W40	
Grado SAE	15W40
Viscosidad, ASTM D 445	
cSt a 40°C	106
cSt a 100°C	145
Índice de viscosidad, ASTM D 2270	140
Cenizas Sulfatadas, %peso, ASTM D 874	1,1
TBN, mg KOH/g, ASTM D 2896	10
Punto de fluidez, °C, ASTM D 97	30
Punto de inflamación, °C, ASTM D 92	230
Densidad a 15°C kg/L, ASTM D 4052	0,88

Fuente: MOBIL. Mobil Delvac MX 15W-40. [En línea]. Junio 2018. [Citado el 26 de Noviembre de 2018]. Disponible en Internet: <<https://www.mobil.com/spanish-cl/commercial-vehicle-lube/pds/asxxmobil-delvac-mx-15w40>>

1.1.3.1 Viscosidad. Es la propiedad más importante de un lubricante líquido y está directamente ligada al índice de viscosidad, esta relaciona la variación de viscosidad entorno a la temperatura, por ende, un mayor índice de viscosidad conllevará a una mayor resistencia del fluido a variar su viscosidad ante cambios de

²³ Ibíd., p. 5.

²⁴ MOBIL. Mobil Delvac MX 15W-40. [En línea]. Junio 2018. [Citado el 26 de Noviembre de 2018]. Disponible en Internet: <<https://www.mobil.com/spanish-cl/commercial-vehicle-lube/pds/asxxmobil-delvac-mx-15w40>>

temperatura²⁵.

1.1.3.2 Color de los aceites. Según la hoja de seguridad Movil Delvac MX 15W40, la coloratura y la apariencia indicada para el aceite de motor diésel debe ser de un líquido color marrón o ámbar²⁶.

1.1.3.3 Número básico total (TBN). Una de las funciones principales del aceite lubricante es neutralizar los ácidos que se forma en el motor a raíz de sus procesos normales, más exactamente el ácido sulfúrico y sulfuroso, así como los ácidos orgánicos que se producen en la oxidación. Los aditivos en el aceite contienen compuestos que tienen como función neutralizar dichos ácidos, la capacidad de estos compuestos alcalinos para neutralizar ácidos se mide por medio del Número Total Básico (TBN), en general, cuanto mayor es el valor del TBN, mayor será la capacidad del aceite para neutralizar ácidos²⁷.

1.1.3.4 Características de un aceite nuevo. El Movil Delvac MX 15W40 es un aceite diésel, combina una mezcla de aceites base de alta calidad con aditivos que proporciona un control adecuado de los contaminantes del aceite, que se producen a raíz del proceso de combustión²⁸.

1.1.4 Clasificación de los lubricantes. Tal como se definió en la sección 1.1.2, los aceites lubricantes están compuestos por un aceite base y una serie de aditivos que ayudan a mejorar sus características fisicoquímicas y su desempeño en el motor. Con el fin de estandarizar el mercado comercial de aceites lubricantes de motor, tres entidades internacionales establecen normas para la clasificación de estos aceites, en Colombia las más utilizadas son las emitidas por la SAE (Society of Automotive Engineers - Sociedad de Ingenieros Automotrices) y el API (American Petroleum Institute – Instituto Americano de Petróleo).

1.1.4.1 Clasificación de los aceites según SAE. Los aceites lubricantes para la SAE se clasifican según la Norma J300 que categoriza los aceites de acuerdo con su viscosidad. Cada uno de los niveles o grados de viscosidad tiene su límite en cuanto a la viscosidad del aceite a cierta temperatura. La letra W en la identificación del aceite designa que este es adecuado para uso en temporada de invierno, es por esto que adicionalmente de realizar la medición a 100°C como es

²⁵ GULF. Manual técnico de Aceites lubricantes. [En línea], [Citado el 26 de Noviembre de 2018]. Disponible en internet <<https://es.scribd.com/document/323148813/ManualTecnico-Gulf>>

²⁶ MOBIL. Mobil Delvac MX 15W-40. [En línea]. Junio 2018. [Citado el 26 de Noviembre de 2018]. Disponible en Internet: <<https://www.mobil.com/spanish-cl/commercial-vehicle-lube/pds/asxxmobil-delvac-mx-15w40>>

²⁷ PADILLA. Op. cit., p. 33.

²⁸ MOBIL. Op. Cit., p. 4.

habitual (para tomar la viscosidad de referencia), se realiza una evaluación de viscosidad a una temperatura entre los -40 y -10 °C²⁹. La normatividad para la clasificación SAE se muestra a continuación en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Norma SAE J300, clasificación de aceites lubricantes.

Viscosidad SAE	Arranque en frío (cP)	Bombeabilidad en frío (cP)	Mínima Cinemática (cSt)	Máxima Cinemática (cSt)	Cizallamiento (cP)
0W	6200 a -35°C	60000 a -40°C	3,8	-	-
5W	6600 a -30°C	60000 a -35°C	3,8	-	-
10W	7000 a -25°C	60000 a -30°C	4,1	-	-
15W	7000 a -20°C	60000 a -25°C	5,6	-	-
20W	9500 a -15°C	60000 a -20°C	5,6	-	-
25W	13000 a -10°C	60000 a -15°C	9,3	-	-
8			4	<6,1	1,7
12			5	<7,1	2
16			6,1	<8,2	2,3
20			6,9	<9,3	2,6
30			9,3	<12,5	2,9
40			12,5	<16,3	3,5 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
40			12,5	<16,3	3,7 (15W-40, 20W-40, 25W-40, 40 monogrado)
50			16,3	<21,9	3,7
60			21,9	<26,1	3,7

Fuente: WIDMAN INTERNATIONAL SRL. SAE J300. [En línea]. Noviembre de 2018. [Citado 25 de noviembre, 2018] Disponible en Internet: <<https://www.widman.biz/Seleccion/j300.html>>

1.1.4.2 Clasificación de los aceites según API. Para aceites de motor diésel la API designa dos letras para la identificación de estos, la primera siempre es una C, la siguiente letra está determinada aleatoriamente, aunque en la mayoría de casos sigue una secuencia de orden alfabético, adicionalmente puede venir

²⁹ *Ibíd.*, p. 8.

acompañada por un número, dependiendo de la versión de la norma³⁰. La normatividad para la clasificación API se muestra a continuación en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación API de los aceites

Categoría	Estado	Servicio
CA	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los automóviles Diésel fabricados después del año 1959.
CB	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los automóviles Diésel fabricados después del año 1961.
CC	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los automóviles Diésel fabricados después del año 1990.
CD	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los automóviles Diésel fabricados después del año 1994.
CD – II	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los automóviles Diésel fabricados después del año 1994.
CE	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los automóviles Diésel fabricados después del año 1994.
CF	Obsoleto	Se utilizó en el año 1994 para motores de vehículos todo terreno, de inyección directa y otros motores diésel.
CF – 2	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los motores de automóviles diésel fabricados después del año 2009.
CF – 4	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los motores de automóviles diésel fabricados después del año 2009.
CG – 4	Obsoleto	No es adecuado para la mayoría de los motores de automóviles diésel fabricados después del año 2009.

³⁰ Ibíd., p. 9.

Cuadro 2. (Continuación)

Categoría	Estado	Servicio
CH – 4	Actual	Se comenzó a utilizar en el año 1998, en motores diésel de alta velocidad con ciclos de cuatro tiempos. Está diseñado para cumplir con las normas de emisiones de gases de escape del año 1998.
CI – 4	Actual	Se comenzó a utilizar en el año 2004, en motores diésel de alta velocidad con ciclos de cuatro tiempos, diseñados para cumplir con la norma de emisiones de gases de escape del año 2004.
CJ – 4	Actual	Se utiliza para motores diésel de alta velocidad con ciclos de cuatro tiempos. Estos aceites están formulados para su utilización en todas las aplicaciones con combustibles diésel con un contenido de azufre hasta de 500ppm.
CK - 4	Actual	Estos aceites están diseñados para brindar una mejor protección contra la oxidación del aceite, la pérdida de viscosidad debido a la cizalla y la aireación del aceite, así como protección contra la contaminación del catalizador, bloqueo de filtros de partícula, desgaste del motor, formación de depósitos en pistones, degradación de las propiedades a baja y alta temperatura, e incremento de la viscosidad debida al hollín.

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. ¿Qué tipo de aceite es el adecuado para usted? Oil Matters. [En línea]. [Citando 25 de Noviembre, 2018]. p. 4.

1.2 ACEITES USADOS

La gestión de residuos líquidos producto de derivados de petróleo y combustibles fósiles representa un serio problema ambiental, económico y social a nivel mundial. Los residuos provenientes de los aceites lubricantes de motor son catalogados como sustancias peligrosas debido a su alta concentración de compuestos orgánicos y metales pesados³¹ los cuales si no se clasifican y se tratan de una manera especial pueden convertirse en un riesgo para el cuerpo hídrico donde se vierten.

1.2.1 Características de los aceites usados. Con el paso del tiempo y el constante uso del aceite, el aceite va acumulando contaminantes que se degradan haciendo que pierda sus características originales, por lo cual se hace necesaria la sustitución por aceites nuevos, lo que conlleva a la generación de residuos conocidos como aceite usado. Estos aceites usados provienen del uso de aceite sintético, líquido de transmisión, aceite de motor, aceite de refrigeración, líquidos hidráulicos industriales y en general aceites de procesos industriales³². Las características comúnmente evaluadas que presentan los aceites usados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características típicas de los aceites usados

Características	Automotriz	Industrial
Viscosidad a 40°C, SSU	97 – 120	143 – 330
Gravedad a 15.6°C, °API	19 – 22	25.7 - 26.2
Peso específico a 15.6°C	0.9396 - 0.8692	0.9002 - 0.8972
Agua, %vol.	0.2 - 33.8	0.1 - 4.6
Insolubles en benceno, %peso	0.1 - 4.2	0.0
Solubles en gasolina, %vol.	0.56 - 33.3	0.0
Punto de ignición, °C	78 – 220	157 – 179
Potencia calorífica, MJ/Kg	32.560 - 44.880	40.120 - 41.840

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor industrial. 2 ed. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014. p. 15.

El aceite usado conserva muchas de las características del aceite en su estado original como lo son los hidrocarburos y los aditivos³³. Debido a los diferentes procesos que se llevan a cabo dentro del motor, así como el desgaste de sus piezas internas se presenta la aparición de elementos de desgaste tales como el plomo,

³¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Manual técnico para el manejo integral de aceites lubricantes usados. Bogotá, D.C: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006. 90 p. ISBN: 958-97878-8-6

³² COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. cit., p. 16-17.

³³ *Ibíd.*, p. 19.

cromo, hierro, aluminio, níquel, cobre, sílice, estaño y manganeso, que provienen de partes del motor debido a su desgaste³⁴. Estos contaminantes pueden fácilmente ser liberados al ambiente como consecuencia de la inapropiada disposición de estos residuos, de escapes de motores o derrames del aceite, por lo que estos pueden movilizarse y acumularse a través de fuentes hídricas, del suelo, del aire e incluso en animales y personas, lo que provoca efectos ambientales y riesgos para la salud³⁵.

1.2.2 Sustancias contaminantes presentes en los aceites usados. En el proceso de combustión se producen diferentes sustancias dentro del motor, algunas sustancias se diluyen dentro del motor y no representan un riesgo ambiental, por otra parte, existen sustancias para las cuales la dilución no funciona, estos son los metales pesados y los compuestos orgánicos sintéticos no biodegradables, estas sustancias tienden a ser Aorbidas y concentradas por los seres vivos, causándoles serios problemas de salud y adicionalmente tienen serios impactos ambientales³⁶.

1.2.2.1 Elementos de desgaste. Los elementos de desgaste se generan a raíz de mal funcionamiento del motor y de las piezas del mismo. Metales como el plomo, mercurio, cadmio, estaño, cromo y zinc son peligrosos, y en la industria se utilizan en plaguicidas y algunas medicinas³⁷. Las principales fuentes de aparición de elementos de desgaste se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Componentes contaminantes de los aceites usados

Componente	Origen
Agua	Combustión
Hidrocarburos polinucleares aromáticos	Combustión Incompleta
Hidrocarburos livianos	Dilución del combustible
Plomo	Gasolina plomada – Desgaste de piezas
Bario	Aditivos detergentes
Calcio	Aditivos detergentes
Magnesio	Aditivos detergentes
Zinc	Aditivos Antidesgaste y antioxidantes

³⁴ *Ibíd.*, p. 20.

³⁵ *Ibíd.*, p. 19-21

³⁶ ORTIZ, Leonardo. Evaluación de la gestión integral del manejo de aceite usado vehicular en Bogotá. Trabajo de grado en maestría de gestión ambiental. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de estudios ambientales y rurales, 2007. p. 29.

³⁷ *Ibíd.*, p. 29.

Tabla 4. (Continuación)

Componente	Origen
Fósforo	Aditivos Antidesgaste y antioxidantes
Hierro	Desgaste
Cromo	Desgaste
Niquel	Desgaste
Aluminio	Desgaste
Cobre	Desgaste
Estaño	Desgaste
Cloro	Aditivos – Gasolinas plomadas
Silicio	Aditivos
Azufre	Base lubricante – Productos de la combustión

Fuente: ORTIZ, Oscar Leonardo, Evaluación de la gestión integral del manejo de aceite usado vehicular en Bogotá – Pontificia Universidad Javeriana, 2007.

1.2.2.2 Compuestos orgánicos sintéticos no biodegradables. Pueden ser hidrocarburos halogenados, en donde uno o más de sus átomos de hidrógeno han sido intercambiados por cloro, bromo, fluoruro o yodo. Estas sustancias son altamente tóxicas y peligrosas, ya que el cuerpo los asimila como cualquier otra sustancia orgánica³⁸.

1.2.3 Normatividad sobre la disposición y manejo de aceites usados. Los lubricantes son considerados residuos peligrosos según el Convenio de Basilea adoptado por Colombia en la Ley 253 de 1996 y ratificada en la Ley 1623 de 2013 donde el estado aprueba la enmienda sobre la prohibición del ingreso de residuos nucleares y tóxicos en el país. La disposición realizada en rellenos sanitarios generaba lixiviados que posteriormente eran filtrados en el suelo y en las fuentes subterráneas. El entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial lanza el Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados en el año 2006, donde plantea las actividades que se requieren para el acopio, transporte, aprovechamiento y disposición final de estos residuos.

En Colombia, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible³⁹, el 95% de los aceites lubricantes es producido por empresas multinacionales afiliadas a la Asociación Colombiana del Petróleo -ACP, Chevron, Texaco, ExxonMobil, Petrobras, Castrol y por las empresas nacionales Terpel y Brío. El 5% restante corresponde a producción de otros productores nacionales que no reportan a ninguna entidad, ni tienen alguna agrupación que les agrupe. Del 95% generado

³⁸ *Ibíd.*, p. 29.

³⁹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Op. cit.*, p. 15.

por las multinacionales, se ha establecido la distribución de aceites según el mercado como se muestra en la Tabla 5.

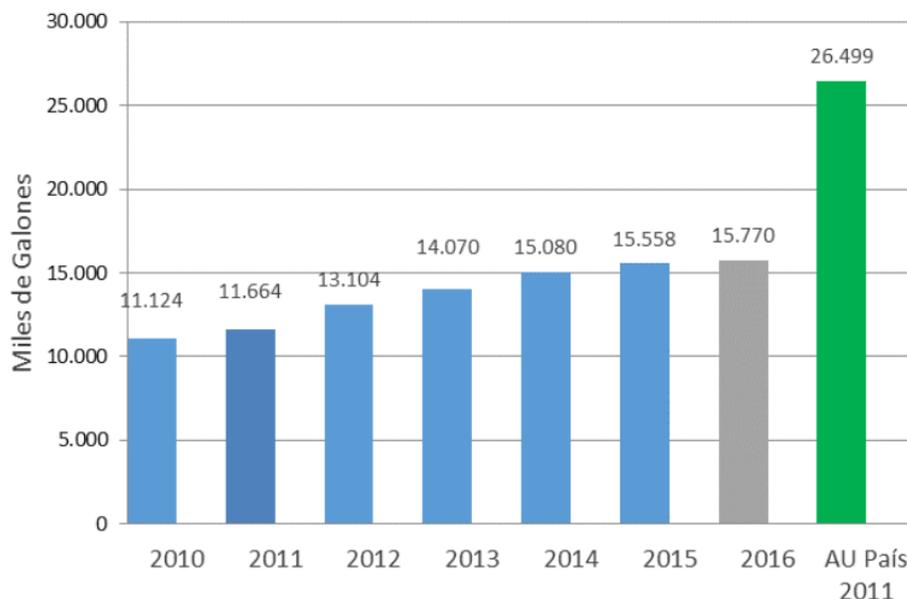
Tabla 5. Distribución del mercado de aceites lubricantes en Colombia

Segmento	Porcentaje
Industrial	13%
De proceso	19%
Automotor	68%

Fuente: Asociación Colombiana del Petróleo -ACP, 2013. Informe Estadístico Petrolero. Citado por COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor industrial. 2 ed. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014. p. 15.

Es por esto que la recolección de aceites usados y su aprovechamiento ha sido de importancia para el gobierno colombiano, implementando así normas que estipulen el correcto tratamiento. Es así como el porcentaje de recolección de aceite usado se ha venido incrementando en los últimos años como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Volumen total año de aceite lubricante usado dispuestos correctamente por operadores avalados FAU Vs. Total estimado generado



Fuente: COLOMBIA. FONDO DE ACEITES USADOS, ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Panorama general del aceite lubricante usado - informe año 2016. [Diapositivas] Bogotá, D.C.: Asociación colombiana del petróleo, 2017.

A partir de la expedición de la Constitución Política de 1991, Colombia empezó una nueva era ambiental, en la cual se crearon diferentes entes y normas los cuáles están encargados de la supervisión del buen manejo de recursos ambientales y así mismo prevenir la contaminación de dichos recursos.

Para el correcto tratamiento y manejo de aceites de usados de motor en Colombia existe una normatividad específica, descrita en la Tabla 6.

Tabla 6. Normatividad colombiana para tratamiento y manejo de aceites

Norma	Artículo (Art.)	Descripción
Resolución 1446 de 2005.	Art. 2	Establece los requisitos y condiciones para aprovechar el aceite de desecho o usado generado en el país, como combustible. ⁴⁰
Decreto 4741 de 2005	Art. 14	Se debe garantizar el manejo seguro y responsable de los envases, empaques, embalajes y residuos del producto o sustancia química con propiedad peligrosa; declarar a los consumidores y a los receptores el contenido químico o biológico de los residuos o desechos peligrosos que su producto o sustancia pueda generar; comunicar el riesgo de sus sustancias o productos con propiedad peligrosa a los diferentes usuarios o consumidores. ⁴¹
	Art. 5, inciso 3	La mezcla de un residuo o desecho peligroso con uno que no lo es, le confiere a este último características de peligrosidad y debe ser manejado como residuo o desecho peligroso. ⁴²

⁴⁰ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1446 de 2005. [En línea]. 2005. [Citado el 27 de Noviembre, 2018]. Disponible en internet: <<http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/b0-Resoluci%C3%B3n%201446%20de%202005%20-Modifica%20Resoluci%C3%B3n%20415%20de%201998.pdf>>

⁴¹ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Decreto 4741 de 2005- [En línea]. 2005. [Citado el 27 de Noviembre, 2018]. Disponible en internet: <<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/526371/Decreto+4741+2005+PREVENCION+Y+MANEJO+DE+REIDUOS+PELIGROSOS+GENERADOS+EN+GESTION+INTEGRAL.pdf/491df435-061e-4d27-b40f-c8b3afe25705>>

⁴² *Ibíd.*, p. 4.

Tabla 6. (Continuación)

Norma	Artículo (Art.)	Descripción
Decreto 4741 de 2005	Art. 19	El responsable de la contaminación de un sitio por efecto de un manejo o una gestión inadecuada de residuos o desechos peligrosos, estará obligado entre otros, a diagnosticar, remediar y reparar el daño causado a la salud y el ambiente. ⁴³

Fuente: Elaboración propia.

1.2.4 Destino y reutilización de los aceites usados. En Colombia la secretaría distrital de ambiente con apoyo del Fondo de Aceites Usados está a cargo de garantizar el adecuado manejo, tratamiento y disposición de aceites según lo expuesto en el Manual de Normas y Procedimientos para la Gestión de Aceites Usados⁴⁴.

El proceso general consta de 6 actores esenciales: generador, acopiador, almacenador, procesador, movilizador y finalmente, dispositor; cada uno de estos actores tiene un rol en la cadena de manejo de aceites. El punto de inicio se da con el generador, que tiene como responsabilidad llevar al acopiador los desechos de aceite, este se encargará temporalmente de almacenar el aceite con el fin de llevarlo donde el almacenador final que se encargará de distribuirlo al procesador, transformador y/o dispositor que tendrán como función transformar el aceite para convertirlo en un producto al que se le pueda dar un aprovechamiento posterior⁴⁵.

1.2.5 Aplicaciones del aceite usado. Mediante la aplicación de diferentes tratamientos de re-refinamiento y/o recuperación de aceite se busca darle un nuevo uso o aplicación al aceite, este nuevo uso estará ligado a su aplicación en diferentes sectores productivos⁴⁶, como lo son:

- Producción de bases plastificantes
- Combustible para procesos de combustión

⁴³ *Ibíd.*, p. 10.

⁴⁴ COLOMBIA. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Gestión de los Aceites Usados. Secretaría Distrital de Ambiente. 2008. p. 7.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 9.

⁴⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Gestión de Aceites Usados en Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2003. p 34.

1.2.6 Efectos de los contaminantes presentes en los aceites usados. Una fracción de los aceites lubricantes usados se libera al ambiente proveniente de escapes en el motor y también puede entrar al ambiente como consecuencia de su disposición en vertederos, contaminando fuentes hídricas, suelos y aire.

1.2.6.1 Impacto ambiental. Los aceites lubricantes usados son considerados peligrosos debido a su baja biodegradabilidad y toxicidad. Su inadecuada disposición genera contaminación hídrica, contaminación atmosférica por la combustión deficiente de los aceites y contaminación de los suelos por su afectación sobre la permeabilidad de la tierra⁴⁷.

- **Contaminación del agua.** El proceso de biodegradación y disolución de los aceites puede tardar entre 10 y 15 años para su eliminación. Los aceites forman en el agua finas películas impermeables que separan las fases entre el aire y el agua, impidiendo que el oxígeno contenido en la atmosfera se disuelva en el cuerpo hídrico, afectando el desarrollo de la vida acuática, pues provoca la muerte de organismos aerobios. Igualmente, al diluirse el aceite en el agua se extienden los productos tóxicos que contienen generando así una intoxicación directa o indirecta de organismos que puedan ingerir el agua contaminada. Se ha demostrado que 1L de aceite contamina 1.000.000 litros de agua y que concentraciones de 1 mg/L de aceite usado en agua hace que el agua sea inapropiada para el consumo humano⁴⁸.
- **Contaminación de suelos.** A la contaminación de fuentes hídricas se suma la contaminación de suelos, ya que la lenta degradación de los hidrocarburos saturados contenidos en aceites usados, al igual que en el agua, genera una película impermeable que impide el normal desarrollo de la actividad biológica y química del suelo destruyendo la vegetación y por lo tanto la fertilidad del suelo⁴⁹.
- **Contaminación del aire.** Se presentan graves impactos en el aire generados por la incineración de aceites usados, en donde la combustión es el principal método de eliminación de estos aceites. Por otra parte, los aceites usados son mezclados con combustible u otros aceites en concentraciones mayores que las permitidas y son utilizadas como combustibles para hornos y calderas. La quema inadecuada es altamente nociva ya que la incineración de 5L de aceite usado puede provocar la contaminación del aire que respira una persona en 3 años⁵⁰.

⁴⁷ MUÑOZ, Édinson; MONTOYA, Daniel y MUÑOZ, Alejandra. Informe de investigación Fundación con Vida. Planteamiento y solución de la problemática de los aceites usados en Colombia. [En línea]. Mayo de 2017. [Citado 4 de Febrero, 2018]. p. 5.

⁴⁸ MUÑOZ, Op. cit., p. 6.

⁴⁹ MUÑOZ, Op. cit., p. 6-7.

⁵⁰ MUÑOZ, Op. cit., p. 7-8.

1.2.6.2 Impactos en la salud. En Colombia se generan el promedio 10.527 muertes relacionadas con la contaminación del aire. Su impacto radica en la concentración de material particulado con tamaño menor a 2,5 micras, en donde este microscópico material es nocivo para la salud, puesto que el organismo no tiene la capacidad de evitar que estas micropartículas llegue directamente a los pulmones y al torrente sanguíneo. Entre los efectos conocidos de los componentes de los aceites usados está el asma, la bronquitis, efectos tóxicos en los riñones y los pulmones, así como efectos cancerígenos⁵¹.

1.2.6.3 Impacto legal. En Colombia, aproximadamente el 30% de los aceites lubricantes que se comercializan son fraudulentos y provienen del reúso, sin prácticamente ningún tratamiento, dado que son más económicos haciéndolos atractivos al consumidor. Sin embargo, el uso de esos aceites falsificados se traduce en emisiones nocivas para la salud y en pérdida de la vida útil de los motores. Adicionalmente, dadas las características de viscosidad y color oscuro los aceites usados facilitan el uso de este como medio de mezcla para ocultar, transportar y disponer ilegalmente residuos líquidos tóxicos o peligrosos. Otro uso ilegal de los aceites usados de motor es en actividades del narcotráfico para la producción de pasta de coca, lo que conlleva a consecuencias sociales y de seguridad pública.

1.3 REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES

La importancia de los tratamientos de aceites radica en que no solo la normatividad estipula la adecuada disposición de los residuos, en pro de tener un compromiso con la salud pública y el medio ambiente, sino también en términos económicos, puesto que, el petróleo y sus derivados presentan altos costos en el mercado, haciendo que el aceite reciclado sea una opción viable y rentable en variadas aplicaciones industriales⁵².

En Colombia del total de aceites y lubricantes consumidos en el país, se reutiliza aproximadamente el 38% de estos⁵³. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible⁵⁴, el aceite usado que es recuperado es tratado y transformado en combustibles secundarios para uso en la industria con o sin mezcla de otros combustibles tradicionales.

⁵¹ MUÑOZ, Op. cit., p. 1, 5.

⁵² JONES, Matías. Diseño de un sistema de reciclaje de aceite lubricante usado. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Chile: Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias de la ingeniería. Escuela de ingeniería mecánica, 2007. p 20.

⁵³ MUÑOZ, Op. cit., p. 3.

⁵⁴ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. cit., p. 17.

Los tratamientos aplicados al aceite usado, permiten aumentar el porcentaje de base lubricante en el aceite, de manera que sea apto para su formulación y reutilización⁵⁵, logrando minimizar la cantidad de contaminantes en el aceite. El aceite tratado tiene una elevada capacidad calorífica, por lo cual posee un gran potencial para ser empleado como combustible, siempre y cuando se logre eliminar los componentes que lo hacen ser un residuo peligroso. Este puede ser utilizado para procesos como combustión en calderas, hornos, secadores, entre otros⁵⁶.

Son diversos los métodos empleados para la recuperación de aceites lubricantes, estos métodos se pueden dividir en principalmente en dos grupos: reacondicionamiento y re-refinación⁵⁷.

1.3.1 Métodos de reacondicionamiento. Estos métodos consisten en la extracción de impurezas, partículas en suspensión y agua contenida en el aceite. Son útiles en aceites que no están oxidados. Entre los métodos de reacondicionamiento se encuentran filtración, separación magnética, deshidratación en vacío⁵⁸. Los métodos de reacondicionamiento se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Métodos para el reacondicionamiento de aceite lubricante usado

Proceso	Descripción
Filtración	La finalidad del filtrado es la separación del líquido de los sólidos suspendidos en él. Para asegurar que la filtración se dé de manera efectiva se hace necesaria una buena selección del medio filtrante, este se selecciona de manera específica o con afinidad al medio que se quiera separar. Una variable importante en este proceso es la temperatura, ya que un aumento en la temperatura del fluido disminuye su viscosidad lo que facilita el proceso de filtración ⁵⁹ .
Separación Magnética	Este proceso es utilizado para la extracción de partículas metálicas del aceite lubricante usado. Para este proceso se utilizan dos tipos de extractores magnéticos que puede ser un cilindro con una rejilla, o con un cilindro rotatorio ⁶⁰ .

⁵⁵ DELGADO, Emilio y PARRA, Jaime. Combustibles alternativos a partir de aceites. AVANCE Investigación en Ingeniería, 2007. No.6, p. 111.

⁵⁶ *Ibíd.*, p. 111.

⁵⁷ JONES, Op. cit., p 20.

⁵⁸ *Ibíd.*, p. 20-24.

⁵⁹ *Ibíd.*, p. 21-22.

⁶⁰ *Ibíd.*, p. 22-23.

Tabla 7. (Continuación)

Proceso	Descripción
Deshidratación en vacío	Es un proceso en cual se busca separar del aceite el agua otras impurezas como solventes o gases disueltos mediante destilación en vacío. Este proceso se puede complementar de cierta forma con procesos de separación debido a la inmiscibilidad del agua en el aceite ⁶¹ .
Separación Centrífuga	El aceite usado es sometido a una fuerza centrífuga con el fin de precipitar de una manera más rápida y efectiva los sólidos suspendidos, esto gracias al aumento de la aceleración. Para facilitar la separación se necesita un aumento de temperatura, ya que con este disminuirá la viscosidad ⁶² .
Destilación e hidrotratamiento	El aceite usado es destilado en una columna de alto vacío, como es de esperarse las impurezas saldrán por el fondo de la columna, las cuáles se extraerán después. El aceite posteriormente se llevará a un reactor donde se calentará para fraccionarlo en las distintas partes de del lubricante ⁶³ .

Fuente: Elaboración propia.

1.3.2 Re-refinación. Estos métodos se usan cuando el aceite tiene mayor concentración de contaminantes y esta oxidado y los métodos de reacondicionamientos no son factibles. Los métodos de re-refinación no solo remueven contaminantes sino también remueven productos solubles, ácidos, gases, entre otros. Entre los métodos de re-refinación se encuentran extracción por solvente, tratamiento por Aorbente, destilación e hidrotratamientos. Estos procesos son usados principalmente cuando se tienen grandes volúmenes de aceite⁶⁴. Los procesos nombrados anteriormente se describen en la Tabla 8.

⁶¹ *Ibíd.*, p. 23.

⁶² *Ibíd.*, p. 24.

⁶³ *Ibíd.*, p. 26.

⁶⁴ *Ibíd.*, p. 24-26.

Tabla 8. Métodos de re-refinamiento de aceites

Proceso	Descripción
Proceso ácido-arcilla	El aceite lubricante usado pasa por una evaporación, en la que se busca eliminar productos ligeros como el agua e hidrocarburos del rango de la gasolina. Posteriormente el aceite es tratado con ácido sulfúrico, con el que se logra obtener un rendimiento aproximado de 85% en relación al producto tratado, el porcentaje restante se compone de un desecho aceitoso y ácido. El producto obtenido pasa a un proceso de filtración con arcilla y cal, con lo cual se busca mejorar el color y acidez del aceite. El proceso global tiene un rendimiento de 70% en peso ⁶⁵ .
Extracción por solvente	Esta técnica es uno de los procesos más económicos y más eficientes en la recuperación de aceites usados. Presenta ventajas frente al proceso de ácido arcilla puesto que produce un lodo orgánico útil y no un lodo toxico como lo es el residuo del de ácido arcilla. Con este proceso se logra remover entre un 10 a 14% del aceite usado como contaminante, lo que corresponde a los aditivos e impurezas presentes en el aceite. El aceite pasa primeramente por un proceso de sedimentación con el fin de sedimenta partículas grandes, luego se adiciona un solvente para retener los aditivos y las impurezas orgánicas que se encuentran en los aceites usados ⁶⁶ .
Adsorción e intercambio iónico	Este método se utiliza para remover metales pesados del aceite. El proceso consiste es hacer pasar el aceite por una torre de adsorción que contenga en su interior un sólido adsorbente. El intercambio iónico se realiza mediante un sólido insoluble, el cual permite remover iones de carga positiva o negativa agregando una carga similar o equivalente en el aceite usado ⁶⁷ .

Fuente: Elaboración propia.

⁶⁵ DELGADO, Op. cit., p. 112.

⁶⁶ *Ibíd.*, p. 112-113.

⁶⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. cit., p. 61.

1.3.3 Técnicas de caracterización. Para medir la eficiencia de los tratamientos aplicados a los aceites deben hacerse una serie de procedimientos que permitan cuantificar las propiedades físicas y químicas de estos. Por consiguiente, se usan caracterizaciones que permitan hacer un seguimiento de las propiedades de los aceites. Internacionalmente están las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y en Colombia las NTC (Norma Técnica Colombiana), normas que permiten conocer la correcta aplicación de técnicas para medir propiedades como por ejemplo viscosidad, densidad, contenido de agua, contenido de metales pesados, carbón residual, pH, entre otras. En la Tabla 9 se muestran las caracterizaciones y las respectivas normas a utilizar.

Tabla 9. Caracterizaciones para aceite lubricante usado

Parámetro	Norma	Descripción
Densidad	NTC 336	Esta norma especifica el método para determinar la densidad (masa por volumen convencional) mediante un picnómetro Jaulmes o Gay – Lussac ⁶⁸ .
Viscosidad	ASTM D2983	Este procedimiento especifica el uso de viscosímetros rotacionales con un rango de torsión apropiado y un husillo específico para la determinación de la viscosidad de los fluidos de transmisión automática, aceites para engranajes, fluidos hidráulicos y algunos lubricantes ⁶⁹ .
pH	ASTM D7946	Este método de prueba cubre los procedimientos para la determinación del pH inicial (i-pH) en lubricantes nuevos y en servicio, se utiliza para indicar los cambios relativos que se producen en el aceite durante el uso en condiciones de oxidación o debido a la contaminación ⁷⁰ .

⁶⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad (masa por volumen convencional). NTC 336. Bogotá D.C.: NTC, 2016. p. 1-2.

⁶⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Low-Temperature Viscosity of Automatic Transmission Fluids, Hydraulic Fluids, and Lubricants using a Rotational Viscometer. ASTM D2983. Estados Unidos: ASTM, 2017. p. 1.

⁷⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Initial pH (i-pH)-Value of Petroleum Products. ASTM D7946-14. Estados Unidos: ASTM, 2014. p. 1.

Tabla 9. (Continuación)

Parámetro	Norma	Descripción
TAN (Total acid number) y TBN (Total base number)	ASTM D974	Esta técnica permite determinar constituyentes ácidos o básicos en productos derivados del petróleo y lubricantes solubles o casi solubles en mezclas de tolueno y alcohol isopropílico. Los productos de petróleo nuevos y usados pueden contener constituyentes básicos o ácidos que están presentes como aditivos o como productos de degradación formados durante el servicio, tales como productos de oxidación. La cantidad relativa de estos materiales puede determinarse titulando con ácidos o bases. Este número, ya sea expresado como número de ácido o número de base, es una medida de esta cantidad de sustancias ácidas o básicas, respectivamente, en el aceite, siempre bajo las condiciones de la prueba. Este número se usa como una guía en el control de calidad de las formulaciones de aceite lubricante y la degradación del lubricante en el servicio ⁷¹ .
Residuo de carbón	ASTM D189	Este método de prueba abarca la determinación de la cantidad de residuos de carbono que quedan después de la evaporación y pirólisis de una muestra de aceite, y tiene la finalidad de proporcionar alguna indicación de la propensión a la formación de coque ⁷² .
Metales de desgaste y contaminantes	ASTM D6595	Este procedimiento permite determinar metales de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes usados y fluidos hidráulicos nuevo o usados por electrodos de disco giratorio espectroscopia de emisión atómica (RDE-AES) ⁷³ .

⁷¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. ASTM D974-04. Estados Unidos: ASTM 2004. p. 1-2.

⁷² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products. ASTM D189. Estados Unidos: ASTM, 2014. p. 1.

⁷³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry. ASTM D6595. Estados Unidos: ASTM, 2017. p. 1.

Tabla 9. (Continuación)

Parámetro	Norma	Descripción
Condiciones de servicio	ASTM E2412	Esta práctica permite diagnosticar la condición operativa de la máquina basándose en las condiciones de falla observadas en el aceite. Los contaminantes monitoreados incluyen agua, hollín, etilenglicol, combustibles y aceite incorrecto. La oxidación, nitración y sulfonación de las reservas básicas se monitorean como evidencia de degradación ⁷⁴ .

Fuente: Elaboración Propia

⁷⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM E2412. Estados Unidos: ASTM, 2018. p. 1.

2. METODOLOGÍA

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL ACEITE USADO DE MOTOR DIÉSEL

El Centro de Tecnologías del Transporte (CTT) del SENA presta un servicio de preparación y capacitación laboral del sector automotriz y de transporte, sus aprendices se forman en cursos de mantenimiento predictivo de motores diésel, estas actividades de formación práctica generan residuos de aceites usados para motor, este aceite será objeto de estudio a lo largo de la investigación.

Se pretende remover los contaminantes del aceite usado para su posible recuperación y/o reutilización, para esto se requiere conocer sus características fisicoquímicas y compararlas con las condiciones estándares de los aceites nuevos.

2.1.1 Muestreo. El muestro, almacenamiento y manejo del aceite lubricante usado se hace como lo indica la norma NTC 5836-1: Manual de estándares de medición de petróleo, sección muestreo. Práctica normativa para el petróleo y productos del petróleo. Parte 1: muestreo manual. De esta forma el aceite es almacenado en recipientes plásticos con tapa. Los recipientes deben mantenerse cerrados con el fin de prevenir pérdida del material. Durante el almacenamiento las muestras deben protegerse de la luz y el calor con el fin de prevenir su desgaste y/o degradación. Para el manejo de la muestra, esta deberá mezclarse uniformemente antes de ser transferida a otro recipiente con el fin de asegurar que la muestra transferida sea representativa⁷⁵.

2.1.2 Técnicas de caracterización de aceites lubricantes. Para caracterizar el aceite usado de motor diésel se utilizaron métodos de análisis para el estudio de derivados de hidrocarburos basados en normas nacionales como lo son la Norma Técnica Colombiana (NTC) y normas internacionales como la American Society For Testing And Materials (ASTM). Adicionalmente se contrató con los laboratorios SGS Colombia y Gecolsa.

SGS es una empresa internacional, que cuenta con sede en Colombia, y ofrece productos y servicios que cubre todos los sectores industriales como agricultura y alimentos, ciencias biológicas, construcción, energía, minería, petróleo y gas, productos químicos, entre otros. Mediante procesos de laboratorio ofrecen el servicio de análisis fisicoquímico de aceites lubricantes usados y diagnóstico del

⁷⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Manual de estándares de medición de petróleo, sección muestreo. Práctica normativa para el petróleo y productos del petróleo. Parte 1: muestreo manual. NTC 5836-1. Bogotá D.C.: NTC, 2011. 42 p.

estado de lubricantes y de los equipos asociados, herramienta básica para las labores de mantenimiento en la industria en general⁷⁶.

General Equipos de Colombia S.A., GECOLSA es una empresa colombiana que provee asistencia técnica y suministro de equipos para sectores productivos como: construcción, minería, industria y petróleo, así como servicio de laboratorios certificados como lo son los laboratorios de fluidos y de metrología. Mediante el análisis de fluidos como aceites, refrigerantes y combustibles, permite identificar contaminantes y elementos de desgaste presentes en estos, con el fin de determinar la intervención de equipos y maquinaria⁷⁷.

Los parámetros a evaluar en el aceite son:

- **Densidad:** se realiza de acuerdo con la norma NTC 336, a 24°C, los resultados se reportan en g/ml. Esta norma específica el método para determinar la densidad de fluidos por medio del proceso de masa por volumen convencional mediante un picnómetro Jaulmes o Gay – Lussac⁷⁸.
- **pH:** se realiza conforme a la norma ASTM D7946. Este método se utiliza para indicar los cambios relativos que se producen en el aceite durante el uso en condiciones de oxidación o debido a contaminación. Este método de prueba cubre los procedimientos para la determinación del pH inicial (i-pH) en lubricantes nuevos y en servicio, el procedimiento se realiza mediante un phmetro⁷⁹.
- **Viscosidad:** se realiza según la norma ASTM D7279 por medio del método del tubo de viscosímetro Houillon que permite la determinación automatizada de la viscosidad cinemática y ASTM D2983 mediante un viscosímetro rotacional. La viscosidad se mide a 100°C y los resultados se reportan en centistokes (cSt).
- **Análisis infrarrojo:** se realiza de acuerdo con la norma ASTM E2412 y permite determinar niveles de oxidación, nitración, hollín y sulfatación, estos resultados se reportan en A/0,1mm. De igual forma se determina el porcentaje en volumen de glicol, de agua y de combustible presentes en el aceite lubricante. El procedimiento se realiza para el monitoreo de condiciones de lubricantes en

⁷⁶ SGS. [En línea]. [Citado 11 de enero, 2019] Disponible en Internet: <<https://www.sgs.co>>

⁷⁷ GECOLSA CAT. [En línea]. [Citado 11 de enero, 2019] Disponible en Internet: <<https://gecolsa.com/>>

⁷⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad (masa por volumen convencional). NTC 336. Bogotá D.C.: NTC, 2016. p. 1-2.

⁷⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Initial pH (i-pH)-Value of Petroleum Products. ASTM D7946. Estados Unidos: ASTM, 2014. p. 1.

servicio mediante análisis de tendencias por medio de espectrometría de infrarrojo de transformada de Fourier (FT-IR)⁸⁰.

- **Espectrometría:** se realiza según la norma ASTM D6595 y determina la concentración de metales de desgaste en partes por millón (ppm) presentes en el aceite, estos son: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Molibdeno (Mo), Fósforo (P), Zinc (Zn), Boro (B), Silicio (Si), Sodio (Na), Aluminio (Al), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Plata (Ag), Estaño (Sn), Titanio (Ti), Vanadio (V), Bario (Ba) y Potasio(K). Este método se realiza por espectroscopia de emisión atómica de electrodo de disco giratorio RDE-AES⁸¹.
- **TAN:** se realiza de acuerdo con la norma ASTM D664 y ASTM D974 para determinar el número total de acidez del aceite lubricante, los resultados se reportaron en mgKOH/g. Para determinar el número de ácido, se realiza una titulación de la muestra, esta se disuelve en una mezcla de tolueno, alcohol isopropílico, agua y un indicador y se valora con una base alcohólica estándar, el punto final se indica por el cambio de color de la solución⁸².
- **TBN:** se realiza según la norma ASTM D2896 y ASTM D974, permite determinar el número total de basicidad del aceite lubricante y los resultados se reportaron en mgKOH/g. Para determinar el número de base, se realiza una titulación de la muestra, esta se disuelve en una mezcla de tolueno, alcohol isopropílico, agua y un indicador y se valora con una solución de ácido alcohólico, el punto final se indica por el cambio de color de la solución⁸³.
- **Residuo de carbón:** se realiza según la norma ASTM D189. Este método de determina la cantidad de residuos de carbono en porcentaje en masa que quedan después de la evaporación y pirólisis de una muestra de aceite⁸⁴.

2.2 TRATAMIENTO DEL ACEITE USADO DE MOTOR

Debido al crecimiento exponencial en Colombia de vehículos, el consumo y el desecho de aceites usados de motor tendrán un incremento con el pasar de los años. Según el RUNT, para el año 2017 el consumo de aceite fue de

⁸⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM E2412. Estados Unidos: ASTM, 2018. p. 1.

⁸¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry. ASTM D6595. Estados Unidos: ASTM, 2017. p. 1.

⁸² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. ASTM D974-04. Estados Unidos: ASTM 2004. p. 1-2.

⁸³ *Ibíd.*, p. 1-2.

⁸⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products. ASTM D189. Estados Unidos: ASTM, 2014. 7 p.

aproximadamente de 26 millones de galones⁸⁵. A partir de la gran cantidad de desechos de aceite generados cada año se plantean diferentes procedimientos para la recuperación de estos. Según cifras de la EPA se necesitan 42 galones de petróleo crudo para producir 2 cuartos y medio de aceite lubricante nuevo de alta calidad, pero sólo un galón de aceite usado para tener los mismos resultados, además al refinar el aceite usado se requiere de un tercio de la energía necesaria para refinar petróleo crudo hasta convertirlo en lubricante⁸⁶.

2.2.1 Selección de los tratamientos. Para los procesos de recuperación de aceites usados se cuenta con diferentes procedimientos, los cuales buscan reducir contaminantes como lo son metales pesados y mejorar el aspecto físico del aceite.

Como se describió en la sección 1.3, existen métodos de reacondicionamiento y re-refinación para aceites usados. La caracterización realizada al aceite de motor evidenció una cantidad crítica de algunos metales pesados al igual que contenidos altos de agua. De acuerdo con las características descritas anteriormente se escogió el proceso de filtración para el reacondicionamiento del aceite. Si bien todos los tratamientos pueden ser aplicables al aceite objeto de estudio se escogen los procesos de acidificación, también llamado ácido-arcilla, y adsorción. De acuerdo con Stan⁸⁷, el proceso más utilizado en un 90% de la industria y el más económico es el proceso ácido-arcilla, y gracias investigaciones como la de Emam⁸⁸ se logran remover contaminantes como hierro, zinc y cobre mediante este proceso. Por otra parte, para el tratamiento de líquidos que contienen metales pesados, existen diferentes métodos fisicoquímicos, entre los que se destaca el proceso de adsorción, el cual es un proceso fácil de operar, que permite la remoción de contaminantes mediante la fijación de metales pesados en los adsorbentes, lo que hace que la recuperación de metales pesados sea posible y que el adsorbente pueda ser regenerado⁸⁹.

⁸⁵ RUNT. REGISTRO UNICO DE NACIONAL DE TRÁNSITO. Estadísticas del RUNT. [En línea]. Diciembre de 2017. [Citado 4 de Febrero, 2018]

⁸⁶ EPA. AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL. Manejando Aceite Usado. Consejo para empresas pequeñas. Washington, DC: 1996, p. 2.

⁸⁷ STAN, Cornelia; ANDREESCU, Cristian y TOMA, Marius. Some aspects of the regeneration of used motor oil. *Procedia Manufacturing*. Abril, 2018. Vol. 22, p. 710.

⁸⁸ EMAM, Eman y SHOAI, Abeer. Re-refining of Used Lube Oil, II- by Solvent/Clay and Acid/Clay-Percolation Processes. En: *ARPN Journal of Science and Technology*. Diciembre, 2012. Vol. 2, No. 11, p. 1038.

⁸⁹ REYES, Erik; CERINO, Felipe y SUÁREZ, Martha. Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. *En: Ingenierías*. Abril-Junio, 2006. Vol. IX, No. 31, p. 61.

2.2.2 Reacondicionamiento de la muestra. Un proceso de filtración consiste en la separación los sólidos suspendidos de un líquido⁹⁰. Como método de reacondicionamiento de la muestra de aceite se realiza una filtración con el fin de eliminar impurezas como arena, residuos de metal y otras micro impurezas que contaminaron el aceite lubricante durante su periodo de uso⁹¹.

Se realizó un proceso de filtración al vacío, mediante un montaje conformado por una bomba de vacío, un Erlenmeyer con desprendimiento lateral, un embudo Büchner y papel filtro de celulosa con capacidad para retener partículas con diámetro mayor a los 2,5 μm ⁹², ilustrado en la Figura 2.

Figura 2. Montaje Filtración



Fuente: Elaboración propia.

2.3 TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ACIDIFICACIÓN

En este proceso, el aceite usado se trata con ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico es un ácido mineral polifuncional que puede actuar como agente sulfonante y oxidante⁹³. El ácido sulfúrico reacciona con polímeros, asfaltos, aditivos degradados⁹⁴, compuestos aromáticos, ácidos orgánicos, partículas metálicas⁹⁵ y

⁹⁰ JONES, Op. cit., p. 21-22.

⁹¹ UDONNE, J y BAKARE, O. Recycling of Used Lubricating Oil Using Three Samples of Acids and Clay as a Method of Treatment. International Archive of Applied Sciences and Technology. Junio, 2013. Vol. 4, No. 2, p. 9.

⁹² ZOGBI. Filtros de celulosa. [En línea]. [Citado 11 de enero, 2019]. Disponible en Internet: <<http://www.dczogbi.com/filtros.html>>

⁹³ *Ibíd.*, p. 26

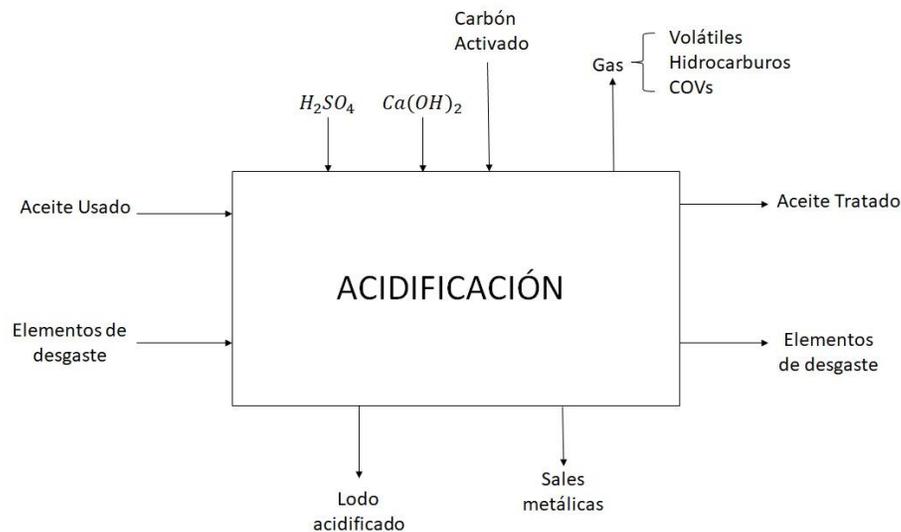
⁹⁴ JONES, Op. cit., p. 25.

⁹⁵ DELGADO, Op. cit., p. 114.

otras sustancias propias de la degradación del aceite, formando un lodo el cual fue filtrado y separado de la mezcla. Con el fin de mejorar el olor y el color del aceite, este se sometió a un proceso de blanqueamiento con carbón activado. El aceite se neutralizó con hidróxido de calcio y finalmente se filtró para remover sólidos⁹⁶, el proceso general se puede ver en la Figura 3.

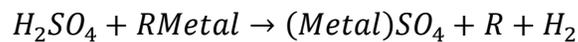
Por medio del proceso de acidificación se retiran los metales pesados de la mezcla de aceite, dicho comportamiento se puede ver en las ecuaciones 1 y 2, donde R representa la composición química del aceite (compuesta por hidrocarburos).

Figura 3. Diagrama de bloques de proceso de acidificación



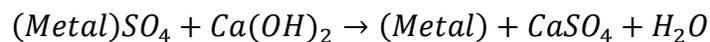
Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 1. Reacción de ácido sulfúrico con metales



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 2. Reacción de neutralización con hidróxido de calcio



Fuente: Elaboración propia.

⁹⁶ ISAH, A. G. *et al.* Regeneration of Used Engine Oil. En: Proceedings of the World Congress on Engineering. Julio, 2013. Vol. 1. p. 566.

2.3.1 Metodología. Para la implementación del proceso de acidificación se siguen los lineamientos propuestos por Isah *et al.*⁹⁷ y se presentan a continuación.

- a) Tratamiento Ácido.** Con el fin de acondicionar la muestra, se eleva la temperatura hasta 170 °C, con esto se busca evaporar el agua y compuestos volátiles como la gasolina, así se asegura que el ácido sulfúrico que se adicionará (en porcentajes de 5%, 10% y 15% v/v) no reaccione al momento de su adición con los altos contenidos de agua que presenta el aceite. Se agrega ácido para oxidar y eliminar las impurezas carbonáceas, los componentes metálicos y otros materiales oxidados⁹⁸.
- b) Sedimentación/Decantación.** Posterior al tratamiento ácido se procede a dejar decantar el aceite durante 24 horas, una vez se cumple este tiempo se procede a filtrar la mezcla resultante para retirar la arcilla ácida de la mezcla ácida⁹⁹.
- c) Blanqueamiento.** El aceite físicamente presenta un color oscuro, por lo cual se realiza un blanqueamiento mediante la aplicación de carbón activado a la mezcla de aceite ácido, para que la mezcla se pueda dar de forma correcta, la mezcla debe ser previamente calentada hasta una temperatura de 130 °C¹⁰⁰.
- d) Activación del Carbón.** Si bien el carbón utilizado ya es carbón activado, se procede a activarlo nuevamente, para esto se lava para retirar impurezas como arena o tierra, para evaporar el agua que puede permanecer contenida dentro del carbón este pasa a ser calentando durante 3 a 4 horas a una temperatura entre 250°C y 300°C. El carbón activado se agregará en una proporción del 6% p/p¹⁰¹.
- e) Neutralización.** Dado que se requiere un pH neutro para el aceite tratado, es necesario neutralizar la mezcla de aceite ácido, esto se logra gracias a una adición de hidróxido de calcio en un porcentaje de 4% p/p¹⁰².
- f) Filtración.** Para culminar el proceso es necesaria una filtración final con el fin de separar la nata resultante y el exceso de carbón del aceite tratado, el cual finalmente será dispuesto en diferentes recipientes para su análisis¹⁰³.

⁹⁷ *Ibíd.*, p. 566.

⁹⁸ Process for re-refining used oil. Inventor: Benjamin S. Santos. Int. CL: C10M 175/02. Fecha de solicitud: 4, Junio, 1993. Estados Unidos, patente de investigación. US 5,514,272A. 7, mayo, 1996.

⁹⁹ ISAH, A. G. *et al.* Op. cit., p. 566.

¹⁰⁰ *Ibíd.*, p. 566.

¹⁰¹ *Ibíd.*, p. 566.

¹⁰² *Ibíd.*, p. 566.

¹⁰³ *Ibíd.*, p. 566.

2.3.2 Diseño de experimentos. El desarrollo del proceso de acidificación se basa en un diseño factorial, en el que se analizaran factores de tratamiento para el aceite usado. Se utiliza un modelo factorial asimétrico 3^2 , dos factores con tres niveles cada uno. Un factor A correspondiente a la proporción de ácido adicionado al aceite: 5%, 10% y 15%. Se selecciona este factor con el objetivo de identificar la influencia que tiene la cantidad de ácido sulfúrico en la capacidad de recuperación del aceite usado en el proceso de acidificación. Un factor B que corresponde a 3 elementos de desgaste: Fósforo, Zinc y Cobre. La variable de respuesta es la concentración en ppm de cada uno de los metales pesados seleccionados después del tratamiento con ácido sulfúrico.

Para completar el diseño factorial se requirieron de 9 corridas y con el fin de minimizar errores experimentales para cada corrida se realizaron 3 repeticiones. Los factores experimentales y sus niveles correspondientes se muestran en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10. Diseño de experimentos para tratamiento de acidificación

Elementos de desgaste	%v/v Ácido Sulfúrico		
	5%	10%	15%
Fósforo	1	10	19
	2	11	20
	3	12	21
Zinc	4	13	22
	5	14	23
	6	15	24
Cobre	7	16	25
	8	17	26
	9	18	27

Fuente: Elaboración propia.

2.4 TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ADSORCIÓN

La adsorción es un proceso que consiste en poner en contacto un fluido, bien sea líquido o gas, conocido como el adsorbato, con un sólido llamado adsorbente¹⁰⁴. Para llevar a cabo la adsorción se usan lechos empacados¹⁰⁵ en donde uno o más de los componentes del fluido son atraídos a la superficie del adsorbente, los cuales

¹⁰⁴ WANKAT, Phillip. Capítulo 17: Introducción a la adsorción, cromatografía e intercambio iónico. En: Ingeniería de procesos de separación. Traducción de Virgilio González y Pozo; revisión técnica de Sergio Antonio Gómez Torres. 2 ed. México: Pearson Educación, 2008. p. 609.

¹⁰⁵ *Ibíd.*, p. 610.

pueden ser separados de otros componentes que son menos atraídos a la superficie¹⁰⁶.

El adsorbato se alimenta a un adsorbente de lecho sólido. Inicialmente el adsorbato se adsorbe en la zona inferior del lecho sólido y a medida que transcurre el tiempo se disminuye la capacidad de adsorción en la zona inferior del lecho, esto ocurre puesto que el adsorbato va ocupando los poros libres del adsorbente hasta llenarlos por completo, entonces se da la saturación o ruptura del lecho en la que la concentración del adsorbato a la salida del adsorbente será igual a la concentración a la entrada de este¹⁰⁷.

De acuerdo con Wankat¹⁰⁸, los procesos de adsorción son usados comúnmente para limpiar fluidos, eliminando componentes de los mismos o para recuperar los componentes de estos fluidos.

Entre las características más importantes de los adsorbentes se encuentra la porosidad y el área superficial, los cuales deben ser muy porosos, ya que la mayor parte de la adsorción se da aquí (98%) y en menor medida en la superficie (2%), y con áreas superficiales grandes, ya que así se aumenta la capacidad de adsorción en la superficie¹⁰⁹.

El diagrama del proceso de adsorción aplicado al aceite se muestra en las figuras 4 y 5.

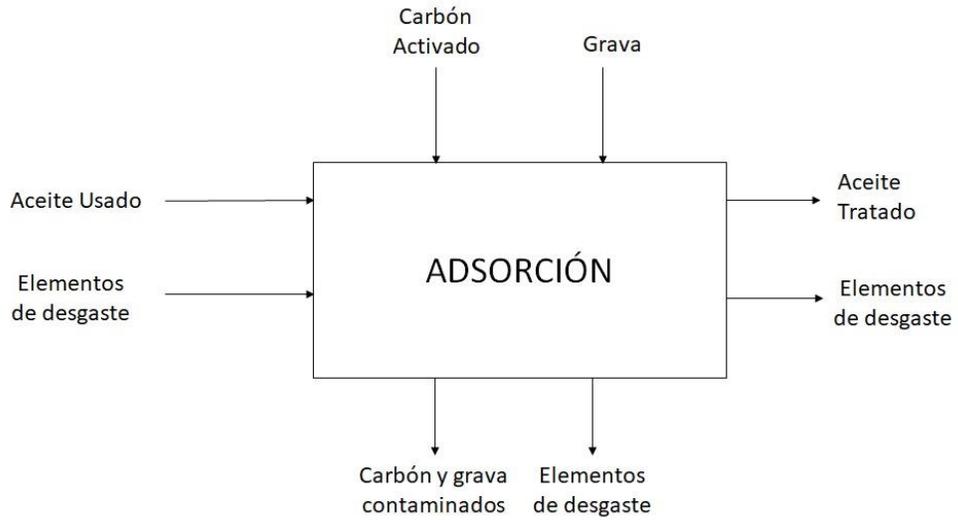
¹⁰⁶ *Ibíd.*, p. 609.

¹⁰⁷ HIGUERA, Oscar; ARROYAVE, Juan y FLOREZ, Luis. Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación por cromo generado en las industrias del curtido de cueros. En: *Dyna*. Diciembre, 2009. Vol. 6, No. 160, p. 108.

¹⁰⁸ WANKAT, Op. cit., p. 609.

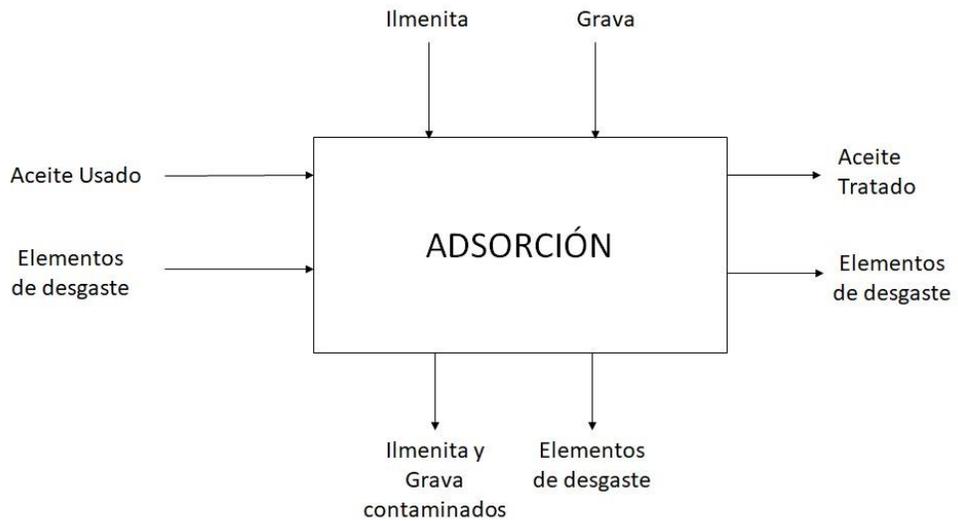
¹⁰⁹ *Ibíd.*, p. 612.

Figura 4. Diagrama de bloques de proceso de adsorción con carbón activado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Diagrama de bloques de proceso de adsorción con ilmenita



Fuente: Elaboración propia.

2.4.1 Parámetros de Diseño. El proceso por el cual un filtro retiene y remueve material suspendido depende de mecanismos físicos y químicos como la adsorción. Entre las principales variables para el diseño de filtros están las características del medio filtrante, la porosidad del adsorbente, la profundidad del lecho, la tasa de filtración y características del fluido¹¹⁰.

2.4.1.1 Tipo de filtro. Los sistemas de filtración se pueden clasificar de acuerdo con la dirección del flujo, el tipo de lecho filtrante, la fuerza impulsora y la tasa de filtración¹¹¹.

- **Dirección de flujo:** de acuerdo con la dirección del flujo, los filtros se pueden clasificar en flujo hacia abajo, hacia arriba o de flujo dual¹¹².
- **Fuerza impulsora:** existen filtros de gravedad o de presión dependiendo de la fuerza impulsora utilizada para vencer la resistencia del lecho filtrante. El filtro de gravedad es usado principalmente para tratamientos de purificación, mientras que los filtros a presión son usados comúnmente en aguas para piscinas y pequeñas plantas de tratamiento¹¹³.
- **Tasa de filtración:** según la tasa de filtración los filtros pueden ser lentos con tasas de filtración de menores a 12 m/d, filtros rápidos con tasas de filtración de 120 m/d y filtros de alta tasa con velocidades de filtración de 180 a 480 m/d¹¹⁴.

A partir de lo anterior se trabajó con un filtro con flujo hacia abajo, impulsado por gravedad.

2.4.1.2 Tipo de lecho filtrante. Los filtros utilizan generalmente un solo medio: arena o antracita, un medio dual: arena y antracita, o un lecho mezclado: arena, antracita y granate o ilmenita. El material soporte de los filtros se puede clasificar en dos categorías: no adsorbente como la arena o la grava y adsorbente como carbón activado¹¹⁵. Lo anterior se ilustra en la Figura 6.

¹¹⁰ ROMERO, Jairo. Capítulo 6: Filtración. En: Acuípurificación: Diseño de sistemas de purificación de aguas. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995. p. 182.

¹¹¹ ROMERO, Op. cit., p. 185.

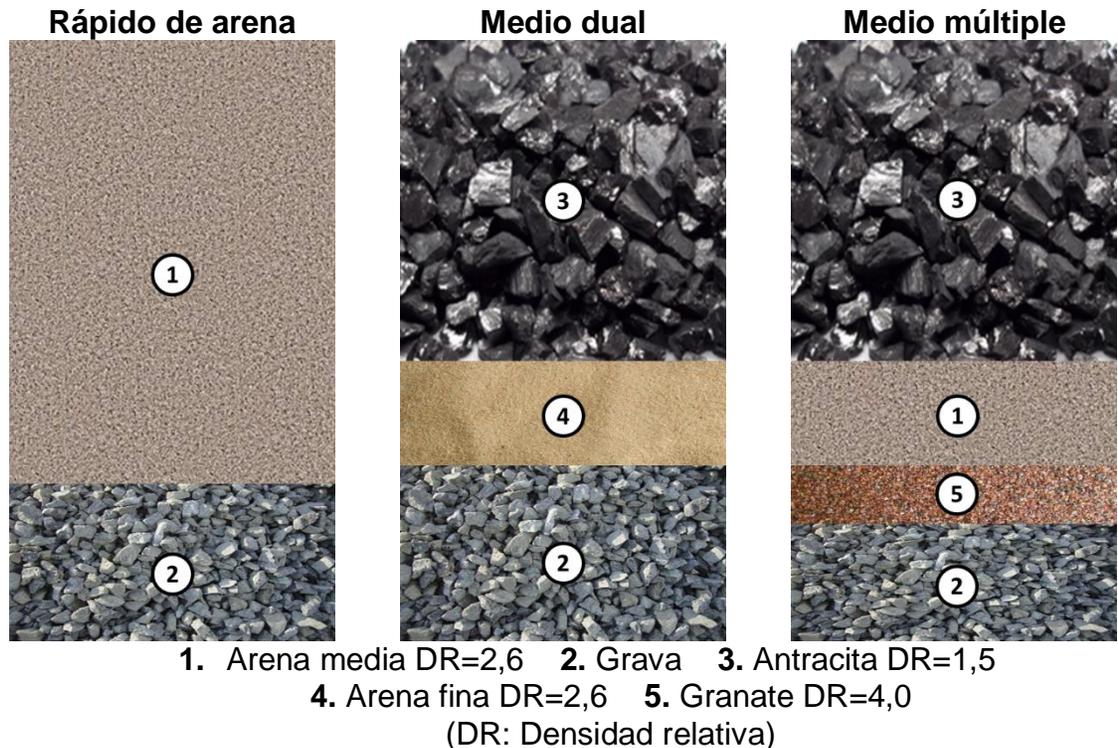
¹¹² *Ibíd.*, p. 185.

¹¹³ *Ibíd.*, p. 186.

¹¹⁴ *Ibíd.*, p. 186-187.

¹¹⁵ RODRÍGUEZ, Javier. Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. España: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2003. p. 206.

Figura 6. Medios de filtración



Fuente: ROMERO, Jairo. Capítulo 6: Filtración. En: Acuípurificación: Diseño de sistemas de purificación de aguas. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995. p. 186.

Basados en las investigaciones de Higuera¹¹⁶, quien utiliza filtros de medio dual y rápidos de arena, para remoción de cromo en aguas residuales. Fueron seleccionados un filtro rápido de arena constituido de carbón activado y grava y otro por ilmenita y grava.

2.4.1.3 Selección del lecho filtrante. Las técnicas de adsorción son importantes en la industria para múltiples procesos como catálisis heterogénea, separación de mezclas, tratamientos de residuos y purificación de agua y aceites¹¹⁷. Para estas aplicaciones se utilizan adsorbentes como el carbón activado y la ilmenita.

- **Carbón activado:** es uno de los adsorbentes más usados gracias a que posee un área superficial extensa, es poroso y de bajo costo. El carbón se obtiene carbonizando materiales lignocelulósicos, como madera o coque, y para

¹¹⁶ HIGUERA, Op. cit.,

¹¹⁷ CARRIAZO, José; SAAVEDRA, Martha y MOLINA, Manuel. Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. En: Educación Química. Julio, 2010. Vol. 21, No. 3, p. 224.

aumentar la porosidad y la capacidad de adsorción del material se activa comúnmente con dióxido de carbono o vapor de agua. El carbón activado posee una superficie no polar por lo cual el agua se adsorbe débilmente mientras que los compuestos orgánicos se adsorben fuertemente. Se pueden producir carbones activados con diferentes propiedades dependiendo de la materia prima, las condiciones de preparación como la temperatura y el tiempo de activación o tratamientos químicos adicionales que se le apliquen. El carbón activado es usado para separaciones de líquidos o gases, para controlar la contaminación del agua eliminando compuestos orgánicos presentes en esta, para procesar azúcar, purificar alcohol, en mascarar para gases, entre otras aplicaciones^{118 119}. Su gran superficie y alta porosidad hacen que el carbón activado sea un material idóneo para llevar a cabo el proceso de adsorción de metales pesados y compuestos orgánicos¹²⁰.

Figura 7. Carbón activado granular



Fuente: Elaboración propia.

La muestra de carbón activado empleada en el presente trabajo posee una granulometría de 0,5 - 3,15 mm y un peso molecular de 12,01 g/mol, datos obtenidos del proveedor, Minerales Industriales.

¹¹⁸ *Ibíd.*, p. 224.

¹¹⁹ WANKAT, *Op. cit.*, p. 613.

¹²⁰ REYES, *Op. cit.*, p. 62.

- **Ilmenita:** es uno de los minerales más comunes en la corteza terrestre¹²¹. De aspecto similar a la arcilla o la arena¹²², se compone principalmente de óxido de hierro y óxido de titanio y trazas de óxidos como óxido de magnesio, de calcio, de manganeso, de potasio, entre otros¹²³, de fórmula molecular FeTiO_3 ¹²⁴. Se forma en magmas y posteriormente cuando la roca se descompone por la meteorización y se concentra en arenas de ríos y playas. Para su obtención se requiere un tratamiento de pulverización, inicialmente se separa la magnetita mediante un imán muy potente, posteriormente es necesario remover otros elementos adheridos mediante ácidos como el sulfúrico, el clorhídrico y el nítrico. De esta forma se logra la purificación de la ilmenita, logrando un alto contenido de dióxido de titanio y óxido de hierro¹²⁵. La ilmenita puede ser modificada térmicamente, este incremento de la temperatura de calcinación permite el aumento del radio de poro promedio, haciendo que los grupos hidroxilos de la estructura presentes sean retirados, alterando la estabilidad del material¹²⁶.

Tabla 11. Composición de la ilmenita

Elemento	Composición (%)
Na_2O	0,2
MgO	1,2
Al_2O_3	1,0
SiO	4,1
P_2O_5	0,3
SO_3	<0,1
K_2O	0,1

¹²¹ CHEN, Y.H. Synthesis, characterization and dye adsorption of ilmenite nanoparticles. En: Journal of Non-Crystalline Solids. Enero, 2011. Vol. 357, p. 136.

¹²² UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ilmenita: mineral que ayuda a purificar el agua. [En línea]. Diciembre de 2011. [Citado 12 de noviembre, 2018] <<http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/ilmenita-mineral-que-ayuda-a-purificar-el-agua.html>>

¹²³ GONZÁLEZ, Diana y NAISA, Lina. Evaluación de la actividad fotocatalítica de películas de ilmenita para la degradación de H_2S . Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería Química, año 2018, p. 24.

¹²⁴ SUARÉZ, Paola. Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación de la ilmenita sobre la actividad microbiana en presencia de luz visible. Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería Química, año 2017, p 19.

¹²⁵ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ilmenita: mineral que ayuda a purificar el agua. [En línea]. Diciembre de 2011. [Citado 12 de noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <<http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/ilmenita-mineral-que-ayuda-a-purificar-el-agua.html>>

¹²⁶ SUARÉZ, Paola. Op. cit., p 19.

Tabla 11. (Continuación)

Elemento	Composición (%)
CaO	0,5
TiO ₂	47,3
Cr ₂ O ₃	0,1
MnO	0,5
Fe ₂ O ₃	44,6
ZrO	<0,1
ZrO ₂	0,2
Nb ₂ O ₅	<0,1

Fuente: GONZÁLEZ, Diana y NAISA, Lina. Evaluación de la actividad fotocatalítica de películas de ilmenita para la degradación de H₂S. Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería Química, año 2018, p. 25.

En países como Australia, China, India y Noruega cuenta con yacimientos donde se explota industrialmente la ilmenita. En Colombia se ha investigado ilmenita proveniente de Guaviare, Guainía y Putumayo para la degradación de contaminantes¹²⁷. Algunas de las propiedades físicas y químicas de la ilmenita se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Propiedades físicas y químicas de la ilmenita

Propiedad	Valor
Color	Negro
Brillo	Metálico
Dureza	5,5 a 6
Densidad	4,7 g/cm ³
Óptica	Opaco
Solubilidad	Soluble en ácido sulfúrico

Fuente: MATÍAS, Diógenes. Ilmenita. Distribuidores de ilmenita [En línea]. [Citado el 12 de noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <<http://distribuidoresdeilmenita.com/>>

¹²⁷ USTARIZ, José. Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación sobre las propiedades estructurales y fotocatalíticas del mineral ilmenita para la generación de hidrogeno. Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería con énfasis en Energías Alternativas. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de ingeniería. Maestría en Ingeniería énfasis Energías Alternativas, año 2015. p. 14.

Se reportan depósitos de ilmenita en regiones del Atlántico, Orinoquia y sur del país. Algunas de las aplicaciones de la ilmenita es la degradación de contaminantes en el agua, degradación de fenol, mineralización de materia orgánica, circuitos integrados y aplicaciones ambientales de remediación¹²⁸.

Figura 8. Ilmenita



Fuente: Elaboración propia.

La muestra de ilmenita utilizada en el presente trabajo posee una pureza de 93-96%, un tamaño granular AFS No. 75 – 95, que indica el índice de finura y distribución de grano según la American Foundry Society¹²⁹, un tamaño medio de grano de 0,1 - 0,2 mm y un diámetro del grano de 0,074 - 0,0029 pulgadas, datos obtenidos del proveedor, Comercializadora Cyma S.A.S

- **Grava:** la grava o gravilla es un conjunto de rocas, de tamaño variable, procedentes de minerales y rocas fragmentadas por acción de la naturaleza, también puede ser producida por el hombre y a esta se le denomina piedra partida¹³⁰. En un filtro se requiere de una o más capas de grava cuando el tamaño de los orificios del sistema de descarga del filtro es más grande que el de las partículas del medio filtrante, esta sirve de soporte para prevenir que el medio filtrante se escape y tape la salida del filtro¹³¹.

¹²⁸ GONZÁLEZ, Diana y NAISA, Lina. Op. cit., p. 25.

¹²⁹ BISBAL, Ruth, et al. Evaluación de las características y propiedades de fundición de arena de olivino venezolana (Parte I). En: Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V. Julio, 2015. Vol. 30, No. 3, p. 97.

¹³⁰ MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. La Grava. [En línea]. Enero de 2012. [Citado 12 de noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <<http://materiales-de-construccion-ujcv.blogspot.com/2012/01/la-grava.html>>

¹³¹ CARBOTECHNIA. Filtros de grava, arena sílica y antracita. México: Carbotechnia S.A., 2007. Boletín técnico AG-009.

Figura 9. Grava



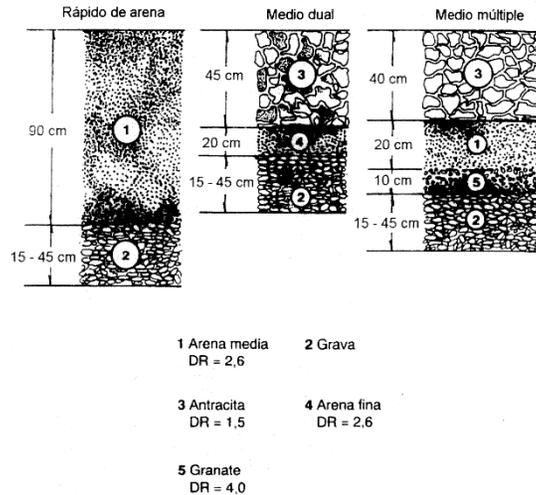
Fuente: Elaboración propia.

La muestra de grava manejada en el presente trabajo posee un diámetro del grano de 3/4 de pulgada, datos obtenidos del proveedor, Minerales Industriales.

2.4.1.4 Dimensionamiento del filtro de adsorción. De acuerdo con Romero¹³² se puede usar un lecho de 60 a 70 cm de profundidad de carbón activado o antracita, es decir aproximadamente entre el 60% al 70% de la altura del filtro, mientras que la profundidad del lecho de grava ocupara el porcentaje restante, usualmente se usa una profundidad de 45 cm en filtros rápidos. Algunas de las alturas típicas para los lechos se muestran en la Figura 10. De esta forma para el dimensionamiento del filtro de adsorción se selecciona una profundidad de 60 cm para el lecho de carbón activado e ilmenita, y de 45 cm para el lecho de grava. Para realizar el escalado a laboratorio y con el fin de facilitar la manipulación, las alturas de los lechos se reducirán en un factor de 5. Con el fin de evitar problemas de rebose se deja una holgura de 20% de la altura de los lechos y se toma esta misma consideración para la sección de recolección del aceite tratado. Por lo tanto, la altura del filtro de adsorción será de 29,4 cm.

¹³² ROMERO, Op. cit., p. 211.

Figura 10. Alturas de lechos de filtración



Fuente: ROMERO, Jairo. Capítulo 6: Filtración. En: Acuípurificación: Diseño de sistemas de purificación de aguas. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995. p. 186.

Según Higuera¹³³ la relación del diámetro y altura del filtro de adsorción se toma como se muestra a continuación:

Ecuación 3. Relación del diámetro y altura del filtro de adsorción

$$\frac{h}{d} = 3,81$$

Fuente: HIGUERA, Oscar; ARROYAVE, Juan y FLOREZ, Luis. Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación por cromo generado en las industrias del curtido de cueros

Donde:

h: Altura del filtro de adsorción (cm)

d: Diámetro del filtro de adsorción (cm)

De acuerdo con la Ecuación 3 el diámetro del filtro obtenido fue de 7,7 cm. Teniendo en cuenta el material disponible a nivel comercial, se trabajó con diámetros de 3 pulgadas. Finalmente, las dimensiones utilizadas para la construcción de la torre se resumen en la Tabla 13.

¹³³ HIGUERA, Oscar; ARROYAVE, Juan y FLOREZ, Luis. Op. cit., p. 108.

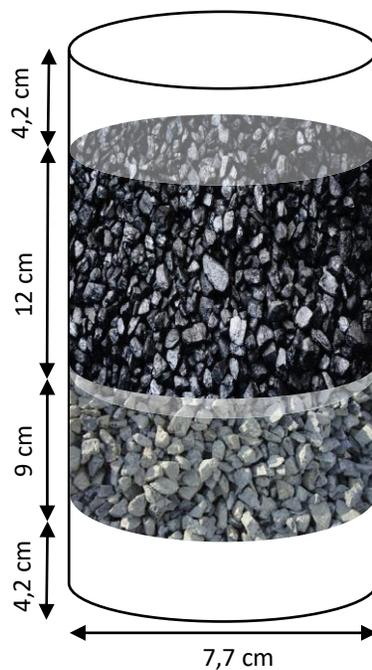
Tabla 13. Parámetros para la construcción del filtro de adsorción

Parámetro	Valor (cm)
Diámetro	7,7
Alturas	
Total	29,4
Lecho de carbón activado/ilmenita	12
Lecho de grava	9
Rebose	4,2
Colector	4,2

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se observan las dimensiones y distribución del filtro de adsorción.

Figura 11. Dimensiones del filtro de adsorción



Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Construcción de la torre de adsorción. Para la selección de los materiales para la construcción del filtro se tiene en cuenta la disponibilidad en el mercado de estos. En la Cuadro 3 se hace una descripción de los diferentes materiales empleados.

Cuadro 3. Materiales para la construcción del filtro de adsorción

Materiales	Descripción	Imagen
Tubo de PVC de 3"	Los tubos de PVC serán usados como la base para la construcción del filtro de adsorción.	
Unión de PVC de 3"	Esta pieza permite unir el tubo de PVC con la tapa, así como contener la placa de acrílico.	
Tapa de PVC de 3"	Permite recoger el aceite tratado luego de salir de los lechos.	
Placa de acrílico	Se usa una placa de acrílico con orificios de diámetro menor que el diámetro de los granos de grava. Esta permite soportar los lechos adsorbentes del filtro y pasar el aceite tratado.	

Cuadro 3. (Continuación)

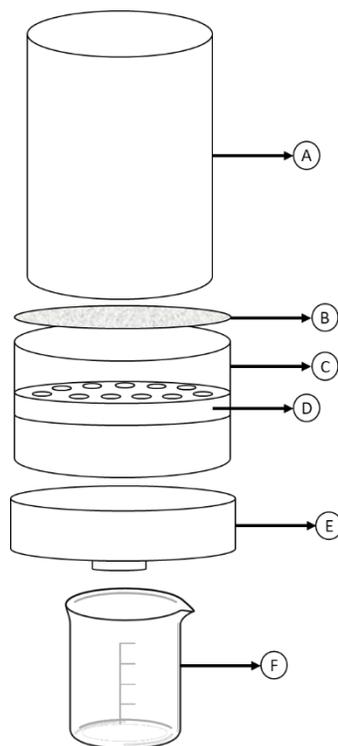
Materiales	Descripción	Imagen
Papel filtro	Se utiliza papel filtro con el fin de retener partículas de los adsorbentes que puedan quedar en el aceite. El papel filtro usado es un filtro de celulosa con capacidad para retener partículas con diámetro mayor a los 2,5 μm ¹³⁴ .	
Beaker	Recipiente plástico con capacidad de 1000 ml empleado para recolectar el aceite tratado proveniente del filtro de adsorción.	

Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de los filtros se requiere de un tubo de PVC de 3" que se utiliza como base del filtro que contiene los lechos, seguido a este se coloca una unión de PVC de 3" la cual une el tubo con la tapa y en su interior contiene la placa de acrílico perforada permitiendo el paso del aceite filtrado hacia la salida, adicionalmente se coloca papel filtro para retener partículas de adsorbente que puedan salir con el aceite. Se sitúa una tapa de PVC de 3" que cumple la función de recolectar el aceite filtrado. Finalmente se coloca un beaker con capacidad de 1000 ml, el cual permite depositar el aceite que sale del filtro y a su vez sostener el filtro.

¹³⁴ ZOGBI. Filtros de celulosa. [En línea]. [Citado 11 de enero, 2019]. Disponible en Internet: <<http://www.dczogbi.com/filtros.html>>

Figura 12. Partes del filtro de adsorción

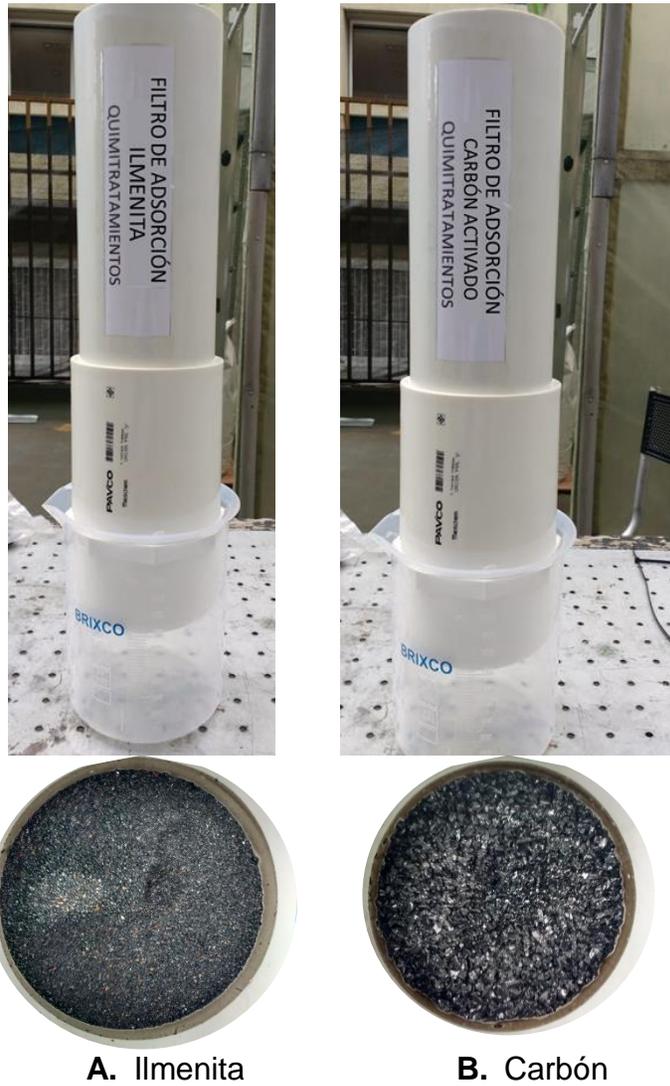


A. Tubo PVC de 3'', **B.** Papel filtro, **C.** Unión PVC de 3'', **D.** Placa de acrílico perforada, **E.** Tapa PVC de 3'', **F.** Beaker de 1000 ml

Fuente: Elaboración propia.

Para el desarrollo experimental se construyen 2 filtros de adsorción, uno contiene lechos de grava y carbón y el otro contiene lechos de grava e ilmenita. En la Figura 13 se observan los filtros terminados.

Figura 13. Filtros de adsorción



A. Ilmenita
Fuente: Elaboración propia

B. Carbón

Una vez construidos los filtros se procede a calcular la tasa de filtración, para ello se hacen pasar 100 ml de aceite y se contabiliza el tiempo que este tarda en pasar por el filtro, y así se determinó el caudal, obteniendo los datos de la Tabla 14.

Tabla 14. Datos para cálculo de tasa de filtración

	Carbón	Ilmenita
Volumen (m³)	1x10 ⁻⁴	1x10 ⁻⁴
Tiempo (h)	1	3
Caudal (m³/h)	1x10 ⁻⁴	3,33x10 ⁻⁵

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos anteriores se calcula la tasa de filtración mediante la Ecuación 4.

Ecuación 4. Tasa de filtración

$$v_f = \frac{Q}{A_f}$$

Fuente: PONCE, Efraín. Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada. Trabajo de grado para optar por el título de Licenciado en Ingeniería Civil. México: Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería, 2005. p. 47.

Donde:

v_f : Tasa de filtración ($m^3/m^2/d$ o m/d)

Q : Caudal (m^3/d)

A_f : Área filtrante (m^2)

Ecuación 5. Área filtrante

$$A_f = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Fuente: UNIVERSO FORMULAS. Área del círculo. [En línea]. [Citado 11 de agosto, 2018] Disponible en Internet: <<https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/area-circulo/>>

Donde:

D : Diámetro del filtro (m)

De este modo se calcularon los valores de tasa de filtración para el filtro de carbón activado y para ilmenita como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Tasa de filtración para filtros de carbón activado e ilmenita

Adsorbente	Tasa de filtración (m/d)
Carbón activado	0,51
Ilmenita	0,17

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos anteriores los filtros construidos corresponden a filtros lentos puesto que poseen tasa de filtración menor a 12 m/d.

2.4.3 Diseño de experimentos. El desarrollo del proceso de adsorción se basa en un diseño factorial, en el que se analizaran factores de tratamiento para el aceite usado. Se utiliza un modelo factorial 3×2, con un factor A con dos niveles y un factor B con tres niveles. El factor A corresponde al lecho adsorbente utilizado: Carbón activado e Ilmenita. Se selecciona este factor con el objetivo de identificar la influencia que tiene el tipo de adsorbente en la capacidad de recuperación del aceite usado en el proceso de adsorción. El factor B que corresponde a 3 elementos de desgaste: Fósforo, Zinc y Cobre. La variable de respuesta es la concentración en ppm de cada uno de los metales pesados seleccionados después del tratamiento con ácido sulfúrico.

Para completar el diseño factorial se requirieron de 6 corridas y con el fin de minimizar errores experimentales para cada corrida se realizó 1 repetición. Los factores experimentales y sus niveles correspondientes se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Diseño de experimentos para tratamiento de adsorción

Metales Pesados	Lecho	
	Carbón Activado	Ilmenita
Fósforo	1	7
	2	8
Zinc	3	9
	4	10
Cobre	5	11
	6	12

Fuente: Elaboración propia

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL ACEITE USADO DE MOTOR DIÉSEL

3.1.1 Muestreo. Las muestras de aceite fueron suministradas por el Centro de Tecnologías del Transporte (CTT) del Sena, corresponden a una mezcla de aceites lubricantes usados de motor diésel SAE 15W-40 de diferentes automotores.

Los resultados respecto a la caracterización del aceite residual evaluado mediante análisis realizados por los autores y por los laboratorios externos SGS Colombia y Gecolsa se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Resultados de la caracterización del aceite usado de motor diésel

Parámetro	Unidad	Valor	
Densidad	g/ml	0,87	
Viscosidad	100°C cSt	6,2	
	40°C cSt	59,9	
pH	-	6,82	
Elementos de desgaste		Gecolsa	SGS
Oxidación	A/0,1 mm	0,21	0,70
Nitración	A/0,1 mm	0,09	0,09
Hollín	A/0,1 mm	0,2	0,23
Sulfatación	A/0,1 mm	0,17	0,09
Agua	% vol	E	0,00
Fuel	% vol	N	4,63
Calcio (Ca)	ppm	1100	1154
Magnesio (Mg)	ppm	458	552
Molibdeno (Mo)	ppm	20	29
Fósforo (P)	ppm	628	785
Zinc (Zn)	ppm	779	821
Boro (B)	ppm	-	4
Silicio (Si)	ppm	43	52
Sodio (Na)	ppm	101	95
Aluminio (Al)	ppm	15	19
Cromo (Cr)	ppm	1	3
Cobre (Cu)	ppm	14	18
Hierro (Fe)	ppm	58	62
Plomo (Pb)	ppm	0	2

Cuadro 4. (Continuación)

Elementos de desgaste		Gecolsa	SGS
Manganeso (Mn)	ppm	-	1
Niquel (Ni)	ppm	0	1
Plata (Ag)	ppm	-	0
Estaño (Sn)	ppm	0	0
Titanio (Ti)	ppm	-	1
Vanadio (V)	ppm	0	0
Bario (Ba)	ppm	-	0
Potasio (K)	ppm	6	-
TAN	mgKOH/g	-	2,15
TBN	mgKOH/g	-	6,0
Residuo de Carbón	% peso	-	1,38

N: Negativo ; E: Excesivo

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Densidad. El análisis de densidad realizado para la muestra de aceite usado de motor diésel se hace conforme a la norma NTC 336 y extraída en el protocolo “Densidad (masa por volumen convencional)” (ANEXO P). Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Datos experimentales de densidad para aceite lubricante usado de motor diésel

Repetición	Densidad (g/ml)
1	0,87
2	0,87
3	0,86
4	0,87
5	0,87
6	0,87
7	0,86
8	0,87
9	0,87
10	0,87
Promedio	0,87
Desviación Estándar	0,0048

Fuente: Elaboración propia.

Conforme a la bibliografía la densidad de los aceites usados de motor se encuentra en un rango de 0,86 a 0,99 g/ml ^{135 136}, mientras que la densidad de aceites nuevos es aproximadamente de 0,88 g/ml ¹³⁷.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación y consignados en la Tabla 17, se observa que la densidad promedio del aceite lubricante usado de motor diésel es de 0,87 g/ml, valor que no presenta variación importante respecto al valor de densidad de un aceite nuevo.

La muestra de aceite usado presenta una densidad dentro del rango de densidades de aceite usado de motor presentado por diversos autores. Fong¹³⁸ analiza 8 referencias diferentes de aceites usados obteniendo densidades desde 0,8659 g/ml hasta 0,9884 g/ml, el autor sugiere que la variación de la densidad de un aceite usado con respecto a un aceite nuevo se debe a contaminantes presentes en el aceite como agua, tierra, polvo y partículas de desgaste¹³⁹.

3.1.3 Viscosidad. El análisis de viscosidad realizado para la muestra de aceite usado de motor diésel se realiza conforme a la norma ASTM D2983 y de acuerdo con lo establecido en el manual de operación del viscosímetro “Alpha Series: Rotational Viscosimeter, Instruction Manual” y a lo estipulado en el protocolo “Determinación de Viscosidad por medio de viscosímetro rotacional” (ANEXO Q).

3.1.3.1 Viscosidad dinámica. De acuerdo con el procedimiento descrito en el ANEXO Q se obtienen los siguientes datos:

Tabla 18. Datos experimentales de viscosidad dinámica para aceite lubricante usado de motor diésel

Repetición	Viscosidad dinámica (cP)
1	51,6
2	51,5
3	51,1
4	51,4
5	51,3

¹³⁵ DELGADO, Op. cit., p. 114.

¹³⁶ FONG, Waldyr; QUIÑONEZ, Edgar y TEJADA, Candelaria. Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje. Prospectiva, Julio, 2017, Vol. 15, p. 139.

¹³⁷ *Ibíd.*, p. 140.

¹³⁸ *Ibíd.*, p. 139 - 143.

¹³⁹ *Ibíd.*, p. 143.

Tabla 18. (Continuación)

6	51,2
7	51,1
8	51,4
9	51,6
10	51,2

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.2 Viscosidad cinemática. A partir de los datos obtenidos de viscosidad dinámica y de densidad se procede a realizar el cálculo de la viscosidad cinemática haciendo uso de la Ecuación 6. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

Ecuación 6. Viscosidad cinemática

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática (cSt)

μ : Viscosidad dinámica (cP)

ρ : Densidad ($\frac{g}{ml}$)

Tabla 19. Datos calculados de viscosidad cinemática para aceite lubricante usado de motor diésel

Repetición	Viscosidad cinemática (cSt)
1	59,6
2	59,5
3	59,0
4	59,3
5	59,2
6	59,1
7	59,0
8	59,3
9	59,6
10	59,1
Promedio	59,3
Desviación Estándar	0,21

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados reportados por Fong¹⁴⁰ la viscosidad se encuentra en un rango de valores entre 50 y 60 cSt¹⁴¹ para aceites usados, mientras la viscosidad de un aceite nuevo a 40°C es de 106 cSt¹⁴² y a 100°C es de 14,5 cSt¹⁴³.

Conforme a los datos de Fong¹⁴⁴ se puede determinar que el aceite sin tratar se encuentra entre los valores esperados. Por otra parte, las viscosidades de aceite usado comparado con aceite nuevo varían de manera significativa. Esta variación en la viscosidad es causada principalmente a raíz de diluciones que se pueden presentar debido a contenidos altos de humedad, combinaciones con otros aceites, combustibles o aditivos¹⁴⁵. La presencia de viscosidades bajas afectará directamente el comportamiento del aceite lubricante, ya que su acción lubricante disminuirá y por consiguiente se generará mayor desgaste en el motor¹⁴⁶.

3.1.4 pH. El análisis de pH realizado a la muestra de aceite usado de motor diésel se realiza conforme a la norma ASTM D7946-14 y de acuerdo a lo estipulado en el protocolo “Método de prueba estándar para pH inicial (i-pH) de productos derivados del petróleo.” (ANEXO R). Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Datos experimentales de pH para aceite lubricante usado de motor diésel

Repetición	pH
1	6,74
2	6,88
3	6,77
4	6,81
5	6,93
6	6,82
7	6,86
8	6,81
9	6,79
10	6,78
Promedio	6,82
Desviación Estándar	0,057

Fuente: Elaboración propia.

¹⁴⁰ FONG, Op. cit., p. 139.

¹⁴¹ *Ibíd.*, p. 139

¹⁴² MOBIL. Mobil Delvac MX 15W-40. [En línea]. Junio 2018. [Citado el 26 de Noviembre de 2018].

¹⁴³ *Ibíd.*, [Citado el 26 de Noviembre de 2018].

¹⁴⁴ FONG, Op. cit., p. 139.

¹⁴⁵ *Ibíd.*, p. 139.

¹⁴⁶ *Ibíd.*, p. 139.

Si bien este parámetro no es de gran importancia en la caracterización del aceite, se realiza puesto que en el proceso de acidificación es necesario con el fin de determinar la neutralización del aceite finalizado este tratamiento.

3.1.5 Elementos de desgaste. Para el análisis de elementos de desgaste se envió una muestra de aceite lubricante usado de motor diésel los laboratorios Gecolsa S.A., distribuidores de Caterpillar en Colombia, y SGS Colombia arrojando los resultados incluidos en la Cuadro 4. (ANEXO A y B)

El análisis de contenido de metales de desgaste, metales de contaminación y metales de aditivo se hace mediante espectrometría de acuerdo a la norma ASTM D 6595, los análisis de oxidación, sulfatación, nitración, hollín, porcentaje en volumen de glicol, de agua y de combustible se realizan mediante infrarrojo según la norma ASTM E2412.

3.1.5.1 Calcio. El calcio se encuentra en el aceite en una concentración de 1100 ppm, lo que lo hace el mayor contaminante de la muestra. La presencia de calcio en el aceite puede deberse a aditivos detergentes en el aceite, los cuales tienen la función de neutralizar ácidos presentes en el aceite permitiendo que este se mantenga limpio. Los niveles de calcio en el aceite dependen del tipo, la función y el uso del aceite¹⁴⁷.

3.1.5.2 Magnesio. El contenido de magnesio en la muestra de aceite es de 458 ppm. Al igual que el calcio puede atribuirse la presencia de magnesio debido a los aditivos detergentes del aceite¹⁴⁸.

3.1.5.3 Molibdeno. Se encuentra molibdeno en la muestra de aceite en una concentración de 20 ppm. La presencia de molibdeno en el aceite se atribuye a fallas en los anillos de pistón y vástagos de válvulas¹⁴⁹.

3.1.5.4 Fosforo. El fosforo se encuentra en una concentración de 628 ppm, y al igual que el zinc se atribuye su presencia a aditivos antidesgaste y antioxidantes¹⁵⁰.

3.1.5.5 Zinc. En la muestra de aceite se encuentra zinc en una concentración 779 ppm. La concentración de zinc en el aceite depende de la aplicación del aceite. El zinc junto con el fosforo se adicionan al aceite como aditivos antidesgaste y

¹⁴⁷ FONG, Op. cit., p. 142.

¹⁴⁸ ORTIZ, Op. cit., p. 28.

¹⁴⁹ BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

¹⁵⁰ ORTIZ, Op. cit., p. 28.

antioxidantes, con el fin de lubricar y proteger el motor ^{151 152}.

3.1.5.6 Silicio. El contenido de silicio en la muestra de aceite es de 43 ppm, valor de concentración inaceptable para este contaminante puesto que supera una concentración de 20 ppm¹⁵³, como se observa en el Cuadro 5. Esta concentración de silicio puede atribuirse a los aditivos, antiespumantes y refrigerantes que contiene el aceite. Adicionalmente puede deberse a tierra o polvo que ingresa del ambiente a través del filtro o sistema de admisión de aire¹⁵⁴.

3.1.5.7 Sodio. El sodio se encuentra en la muestra de aceite con una concentración de 101 ppm, valor considerado como inaceptable, debido a que supera una concentración de 20 ppm¹⁵⁵, como se puede ver en el Cuadro 5. Las concentraciones de sodio se presentan debido fugas de líquido refrigerante del motor. La presencia de sodio puede ocasionar pérdida de potencia en el motor¹⁵⁶.

3.1.5.8 Aluminio. La muestra presenta una concentración de 15 ppm de aluminio, concentración que indica un nivel inaceptable de este contaminante como se muestra en el Cuadro 5, puesto que supera las 10 ppm. La presencia de aluminio puede ocasionarse debido al desgaste de piezas en el motor, como rodamientos, pistones, válvulas, tornillos, así como de tierra y polvo provenientes del ambiente^{157 158}.

3.1.5.9 Cromo. La muestra de aceite presenta una concentración de 1 ppm, esta concentración no genera alerta, sin embargo, está muy cerca del límite de mal funcionamiento¹⁵⁹ de acuerdo con el Cuadro 5. La presencia de cromo se atribuye a la entrada de refrigerante a la cámara de combustión lo que genera residuos de sodio y cromo¹⁶⁰.

3.1.5.10 Cobre. En la muestra de aceite se encuentra una concentración de 14 ppm de cobre, lo cual según el Cuadro 5 indica un nivel crítico llegando casi a un nivel inaceptable de este contaminante. La presencia de cobre en el aceite usado

¹⁵¹ *Ibíd.*, p. 28.

¹⁵² FONG, *Op. cit.*, p. 142.

¹⁵³ BUCHELLI, *Op. cit.*, p. 88.

¹⁵⁴ FONG, *Op. cit.*, p. 142.

¹⁵⁵ BUCHELLI, *Op. cit.*, p. 88.

¹⁵⁶ FONG, *Op. cit.*, p. 141.

¹⁵⁷ FONG, *Op. cit.*, p. 141.

¹⁵⁸ ORTIZ, *Op. cit.*, p. 28.

¹⁵⁹ BUCHELLI, *Op. cit.*, p. 88.

¹⁶⁰ FONG, *Op. cit.*, p. 142.

de motor puede deberse al desgaste de rodamientos¹⁶¹.

3.1.5.11 Hierro. El contenido de hierro para la muestra de aceite fue de 58 ppm, siendo esta una concentración inaceptable de este contaminante de acuerdo a los valores del Cuadro 5. Estos niveles de hierro pueden atribuirse al desgaste de los cilindros del motor, así como también se puede deber a la oxidación de las piezas en el motor¹⁶².

3.1.5.12 Plomo. La muestra de aceite no presenta concentraciones de plomo, se considera valor de alerta cuando la concentración supera un valor de 1,32 ppm¹⁶³. La presencia de plomo en aceites usados, puede deberse al uso de gasolina plomada o el desgaste de piezas en el motor¹⁶⁴.

3.1.5.13 Níquel. La muestra de aceite no presenta concentraciones de níquel, se considera un valor de alerta cuando la concentración supera un valor de 3 ppm¹⁶⁵, como se observa en el Cuadro 5. La presencia de níquel en aceite usado puede presentarse debido a desgastes en el motor¹⁶⁶.

3.1.5.14 Estaño. No se encuentra estaño en el aceite, se considera valor de alerta cuando la concentración supera un valor de 1,27 ppm¹⁶⁷. La presencia de estaño en muestras de aceite usado se atribuye a desgastes en los rodamientos¹⁶⁸.

3.1.5.15 Potasio. La muestra de aceite presenta una concentración de 6 ppm de potasio. Al igual que el sodio, la presencia de potasio se atribuye a fugas de refrigerante¹⁶⁹.

3.1.5.16 Vanadio. No se encuentra concentraciones de vanadio en la muestra de aceite. Se consideran valores anormales cuando la concentración supera un valor de 13,44 ppm¹⁷⁰.

3.1.5.17 Hollín. El hollín es un residuo insoluble que ese genera en el

¹⁶¹ ORTIZ, Leonardo. Op. cit., p. 28.

¹⁶² FONG, Op. cit., p. 141.

¹⁶³ BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

¹⁶⁴ ORTIZ, Op. cit., p. 28.

¹⁶⁵ FONG, Op. cit., p. 142.

¹⁶⁶ ORTIZ, Op. cit., p. 28.

¹⁶⁷ BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

¹⁶⁸ ORTIZ, Op. cit., p. 28.

¹⁶⁹ WIDMAN INTERNATIONAL SRL. SAE J300. [En línea]. Noviembre de 2018. [Citado 25 de noviembre, 2018].

¹⁷⁰ BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

combustible¹⁷¹ debido a que se da una combustión incompleta¹⁷² y es la causa de que el aceite tome un color negro¹⁷³. Es un indicador de la eficiencia de la combustión, igualmente indica el mal funcionamiento del inyector, restricciones de la entrada de aire, sobrecarga o calentamiento excesivo¹⁷⁴. La muestra de aceite analizada presenta un valor de 0,2 A/0,1mm valor que indica una alerta de mal funcionamiento del aceite, pero no es un nivel crítico como se muestra en el Cuadro 5. Altas concentraciones de hollín pueden incurrir en daños en los cojines al imposibilitar el paso de lubricante¹⁷⁵.

3.1.5.18 Oxidación. La oxidación del aceite indica la vida útil del aceite, mostrando un sobrecalentamiento interno y un intervalo de drenaje extendido (envejecimiento)¹⁷⁶. La oxidación del aceite ocurre en presencia de oxígeno y calor. El oxígeno atmosférico reacciona con los hidrocarburos en el lubricante para formar ácidos carboxílicos, cuyas concentraciones van aumentando con el tiempo, lo cual puede causar corrosión en las piezas del motor, además de afectar las propiedades lubricantes del aceite lo que trae como consecuencia la disminución de la vida útil de los componentes del motor. La oxidación se ve afectada por la temperatura y contaminantes como los metales pesados. Para controlar la oxidación se debe mantener el aceite limpio, seco y lo más frío posible¹⁷⁷. La muestra de aceite presenta un valor de oxidación de 0,21 A/0,1 mm, valor que se considera crítico puesto que supera 0,18 A/0,1mm¹⁷⁸ como se puede observar en el Cuadro 5.

3.1.5.19 Nitración. La nitración es una medida de los compuestos de nitrógeno en el aceite¹⁷⁹. El calor puede hacer que el nitrógeno atmosférico y el oxígeno reaccionen, formando óxidos de nitrógeno (NOx). Estos óxidos nitrosos interactúan con el lubricante formando nitratos orgánicos o siendo recogidos como compuestos nitrosos solubles o insolubles. La nitración puede espesar el aceite aumentando su viscosidad. La nitración puede deberse a escapes de productos de la combustión,

¹⁷¹ PADILLA, Noel. Análisis de aceite para detección temprana de fallas en motores Caterpillar. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero mecánico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería, 2013. 65 p. 29.

¹⁷² BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

¹⁷³ PADILLA, Op. cit., p. 29.

¹⁷⁴ SOUTHERN FS. FS Lubricants. Oil Analysis Program. [En línea]. Estados unidos: southern FS. [Citado 22 de abril, 2018].

¹⁷⁵ PADILLA, Op. cit., p. 29.

¹⁷⁶ SOUTHERN FS. Op. cit.

¹⁷⁷ SPECTRO SCIENTIFIC. Guide to Measuring Oil Chemistry: Nitration, Oxidation and Sulfation. [En línea]. Octubre de 2017. [Citado 22 de abril, 2018].

¹⁷⁸ BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

¹⁷⁹ SOUTHERN FS. Op. cit.

una relación aire-combustible inadecuada, baja temperatura de funcionamiento y sellos de pistón con fugas¹⁸⁰. Los valores de nitración para la muestra de aceite fueron de 0,09 A/0,1mm, valor que no supera los 0,13 A/0,1mm el cual de acuerdo con el Cuadro 5 ya sería un signo de alerta del mal funcionamiento del aceite¹⁸¹.

3.1.5.20 Sulfatación. La sulfatación ocurre cuando se crea una reacción entre el oxígeno, el calor, el agua y el azufre del aceite, esta reacción puede crear compuestos sulfurosos que incluyen ácidos basados en azufre, estos ácidos reaccionan con los aditivos en el aceite. Cuando se trabaja a temperaturas bajas, como durante el arranque, los ácidos pueden condensarse y entrar en contacto más fácilmente con el aceite. Los productos de la sulfatación generalmente son expulsados a través del tubo de escape, sin embargo, parte de estos no son arrojados y llegan al motor. La sulfatación puede causar una mayor viscosidad y la formación lodos y sedimentos¹⁸². Para la muestra de aceite se observa un valor de sulfatación de 0,17 A/0,1mm, valor que esta entre lo normal, puesto que sólo los valores mayores a 0,2 A/0,1mm son signo de alerta del mal funcionamiento del aceite¹⁸³ de acuerdo con el Cuadro 5.

3.1.5.21 Agua. La muestra de aceite analizada presenta con contenido de agua de 1,5% en volumen. El agua en el aceite evita una lubricación adecuada y causa la formación de lodo e indica fugas de refrigerante y condensación debido a bajas temperaturas de operación o ventilación inadecuada del cigüeñal¹⁸⁴. Conforme con el Cuadro 5, los valores de agua se indican inaceptables cuando estos superan el 0,3% en volumen¹⁸⁵.

3.1.5.22 Combustible. La muestra de aceite no presenta cantidades significativas de combustible. La presencia de combustible indica posibles fugas de la bomba de combustible, calentamiento excesivo e inyectores defectuosos, causando adelgazamiento del aceite y reduciendo su capacidad de lubricación. Los fabricantes recomiendan acciones correctivas cuando los niveles

¹⁸⁰ SPECTRO SCIENTIFIC. Op. cit.

¹⁸¹ BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

¹⁸² *Ibíd.*, p. 88.

¹⁸³ *Ibíd.*, p. 88.

¹⁸⁴ SOUTHERN FS. Op. cit.

¹⁸⁵ BUCHELLI, Op. cit., p. 88.

exceden el 4.0%¹⁸⁶.

De acuerdo con BUCHELLI, Luis y GARCÍA, Vicente¹⁸⁷ los límites máximos permitidos para el uso aceites lubricantes de motor diésel se muestran en el Cuadro 5. A partir de estos datos se determinaron cuales elementos de desgaste se encuentran en parámetros críticos o inaceptables en el aceite usado.

Cuadro 5. Estado de los parámetros de análisis

Parámetros de Análisis			Alerta	Crítico	Inaceptable	
Cobre	ppm	14	>5	>6,76	>15	Crítico
Hierro	ppm	58	>15	>17,08	>25	Inaceptable
Cromo	ppm	1	>1,27	>1,38	>5	Aceptable
Aluminio	ppm	15	>5	>7,6	>10	Inaceptable
Plomo	ppm	0	>1,32	>1,47	>5	Aceptable
Estaño	ppm	0	>1,27	>1,38	>5	Aceptable
Silicio	ppm	43	>14,5	>16,6	>20	Inaceptable
Sodio	ppm	101	>10	-	>20	Inaceptable
Níquel	ppm	0	>3	-	>5	Aceptable
Vanadio	ppm	0	>13,44	>16	>47	Aceptable
Hollín	A/0,1mm	0,20	>0,15	>0,30	>2,00	Aceptable
Oxidación	A/0,1mm	0,21	>0,15	>0,18	>0,25	Aceptable
Nitración	A/0,1mm	0,09	>0,13	>0,18	>0,20	Aceptable
Sulfatación	A/0,1mm	0,17	>0,20	>0,25	>0,30	Aceptable
Agua	%Vol	1,5	-	-	>0,3	Inaceptable

Fuente: Adaptado de BUCHELLI, Luis y GARCÍA, Vicente. Detección temprana de fallas en motores de combustión interna a diésel mediante la técnica de análisis de aceite. En: Revista Ciencia UNEMI. Septiembre, 2015. Vol. 8, No.15, p 88.

Mediante la aplicación de los tratamientos seleccionados se buscará la reducción de los componentes en estado crítico o inaceptable.

3.2 REACONDICIONAMIENTO DE MUESTRA

Posterior a proceso de reacondicionamiento mediante filtración se evalúan nuevamente los parámetros de densidad y viscosidad del aceite usado de motor diésel.

¹⁸⁶ SOUTHERN FS. Op. cit.

¹⁸⁷ BUCHELLI, Op. cit., p. 88

3.2.1 Densidad. El análisis de densidad realizado para la muestra de aceite usado de motor diésel después de realizada la filtración se hace conforme a la norma NTC 436 y extraída en el protocolo “Densidad (masa por volumen convencional)” (ANEXO P). Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Datos experimentales de densidad para aceite lubricante usado de motor diésel después de filtración

Repetición	Densidad (g/ml)
1	0,87
2	0,87
3	0,87
4	0,87
5	0,86
6	0,87
7	0,86
8	0,87
9	0,86
10	0,87
Promedio	0,87
Desviación Estándar	0,0038

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 21, no se observa un cambio en la densidad del aceite usado luego de realizar la filtración respecto al aceite usado sin filtrar, esto debido a que en el proceso de filtración no se evidencia la presencia de impurezas ni sólidos suspendidos de gran tamaño.

3.2.2 Viscosidad. El análisis de viscosidad realizado para la muestra de aceite usado de motor diésel posterior a una filtración, se realiza conforme a la norma ASTM D2983-09 y de acuerdo con lo establecido en el manual de operación del viscosímetro “Alpha Series: Rotational Viscosimeter, Instruction Manual” y a lo estipulado en el protocolo “Determinación de Viscosidad por medio de viscosímetro rotacional” (ANEXO Q).

- **Viscosidad dinámica.** A partir del procedimiento realizado se obtienen los siguientes datos:

Tabla 22. Datos experimentales de viscosidad dinámica para aceite lubricante usado de motor diésel después de filtración

Repetición	Viscosidad dinámica (cP)
1	49,6
2	49,9
3	49,8
4	49,9
5	49,7
6	49,8
7	49,7
8	49,7
9	49,7
10	49,9

Fuente: Elaboración propia.

- **Viscosidad cinemática.** A partir de los datos obtenidos de viscosidad dinámica y de densidad de aceite usado después de realizada la filtración se procedió a calcular la viscosidad cinemática haciendo uso de la Ecuación 6.

Tabla 23. Datos calculados de viscosidad cinemática para aceite lubricante usado de motor diésel después de filtración

Repetición	Viscosidad cinemática (cSt)
1	57,2
2	57,5
3	57,4
4	57,5
5	57,3
6	57,4
7	57,3
8	57,3
9	57,3
10	57,5
Promedio	57,4
Desviación Estándar	0,12

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos de viscosidad cinemática de la Tabla 23, no se observa un cambio significativo en la viscosidad del aceite usado luego de realizar la filtración respecto al aceite usado sin filtrar que tiene una viscosidad de 59,3 cSt.

3.3 TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ACIDIFICACIÓN

Una vez aplicados los ensayos planteados se enviaron las muestras finales del aceite tratado a un laboratorio externo, los resultados obtenidos están dados en unidades de concentración (ppm).

Los resultados obtenidos se compararon con la norma NTC 5995 “Petróleo y sus derivados, bases lubricantes re – refinadas”. Esta norma establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse las bases lubricantes re-refinadas que se comercialicen en Colombia, obtenidas a partir de aceites lubricantes usados, y que van a usarse como materia prima en la elaboración de aceites y grasas lubricantes¹⁸⁸. Los parámetros estipulados por esta norma se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Requisitos de las bases lubricantes re-refinadas según norma NTC 5995

Característica	Criterio
Apariencia	Claro, brillante
Viscosidad Cinemática a 100°C, cSt	Reportar
Metales de aditivos (Calcio, Magnesio, Zinc), ppm, total máx	15
Contenido de fósforo (P), máx	15
Otros elementos contaminantes (Cadmio, Cromo, Arsénico, Níquel, Estaño, Bario, Hierro, Cobre, Silicio, Aluminio, Plomo, Vanadio), ppm, total máx	50

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 5.

De acuerdo con la norma NTC 5995, las bases lubricantes re-refinadas, deben ser claras y brillantes y estar libres de humedad y de material en suspensión, sin embargo, este parámetro no se cumple puesto en el proceso de acidificación el aceite continúa con un aspecto oscuro y el contenido de agua aumenta a pesar de que el aceite es sometido a un proceso de calentamiento a 100°C y 170°C.

Como se puede observar en el Cuadro 7, sin importar cual fuese el porcentaje de ácido adicionado siempre se logró reducir la concentración de elementos de desgaste en comparación a la muestra inicial.

¹⁸⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes re-refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. p. 1.

Cuadro 7. Resultados obtenidos para el tratamiento de acidificación

Elemento	Unidad	Original	5%	5% - R1	5% - R2	10%	10% - R1	10% - R2	15%	15% - R1	15% - R1
Agua	% vol	0,00	-	-	2,18	4,98	4,78	3,5	-	3,5	3,5
Calcio (Ca)	ppm	1154	4981	5270	6992	9883	7168	10162	9736	10034	9745
Magnesio (Mg)	ppm	552	191	193	384	207	305	263	219	214	230
Molibdeno (Mo)	ppm	29	10	9	11	5	5	4	6	6	6
Fósforo (P)	ppm	785	232	127	280	210	264	257	110	103	102
Zinc (Zn)	ppm	821	222	292	482	195	317	348	105	97	104
Boro (B)	ppm	4	1	0	2	1	1	1	1	1	1
Silicio (Si)	ppm	52	21	13	30	151	22	20	15	13	16
Sodio (Na)	ppm	95	31	142	60	64	43	40	17	16	16
Aluminio (Al)	ppm	19	13	49	21	119	18	15	17	16	13
Cromo (Cr)	ppm	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1
Cobre (Cu)	ppm	18	11	5	13	6	8	8	5	7	8
Hierro (Fe)	ppm	62	21	62	41	103	21	19	14	15	13
Plomo (Pb)	ppm	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Manganeso (Mn)	ppm	1	1	3	29	7	4	28	30	28	30
Niquel (Ni)	ppm	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
Plata (Ag)	ppm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estaño (Sn)	ppm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Titanio (Ti)	ppm	1	1	1	2	3	2	3	2	3	2
Vanadio (V)	ppm	0	1	1	1	2	2	2	1	1	1
Bario (Ba)	ppm	0	1	1	1	2	1	1	1	1	1
Residuo de Carbón	% peso	1,38	4,09	3,5	-	-	-	-	-	-	-



Aumenta



Disminuye



Igual

Dado que la opción de 15%v/v de ácido sulfúrico es la que mayor cantidad de elementos de desgaste retira esta fue objeto de comparación frente a los requerimientos estipulados en la norma NTC 5995, los resultados de dicha comparación se muestran a continuación en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Comparación NTC 5995 frente al aceite tratado con 15%v/v de ácido sulfúrico

Elemento de desgaste	Unidad	Concentración en ppm requerida por NTC 5995	Concentración promedio para 15%v/v Ac. Sulfúrico	Criterio
Calcio	ppm	15	9977	No cumple
Magnesio	ppm	15	232	No cumple
Fósforo	ppm	15	157	No cumple
Zinc	ppm	15	183	No cumple
Silicio	ppm	50	16	Cumple
Aluminio	ppm	50	16	Cumple
Cromo	ppm	50	1	Cumple
Cobre	ppm	50	7	Cumple
Hierro	ppm	50	16	Cumple
Plomo	ppm	50	0	Cumple
Níquel	ppm	50	0	Cumple
Estaño	Ppm	50	0	Cumple
Vanadio	Ppm	50	1	Cumple
Bario	ppm	50	1	Cumple

Fuente: Elaboración Propia

Frente a la NTC 5995 el aceite tratado no cumple con las concentraciones requeridas para elementos como calcio, magnesio, fósforo y zinc. Por otra parte, el aceite tratado cumple los parámetros de cromo, níquel, estaño, hierro, cobre, silicio, aluminio, plomo y vanadio exigidos por la norma. De igual forma, el aceite no cumple con el requisito de coloratura, ya que los procesos de blanqueo no fueron efectivos, esto puede deberse a que las moléculas de hollín que dan la coloratura oscura al aceite no están siendo adsorbidas por el carbón.

En comparación con las condiciones iniciales del aceite usado se evidencia una disminución en las concentraciones de elementos de desgaste, aun así, se presentan parámetros inaceptables, críticos y de alerta en comparación con los esperados para aceites usados, cabe resaltar la recuperación de parámetros como el hierro que pasó de un estado inaceptable a uno crítico como se muestra en el

Cuadro 9, así mismo se muestran valores comparativos para diferentes elementos de desgaste.

Cuadro 9. Comparación estado original del aceite frente a la muestra final con tratamiento de acidificación

Elemento de desgaste	Unidad	Alerta	Crítico	Inaceptable	Concentración inicial	Criterio	Concentración promedio para 15% v/v Ác. Sulfúrico	Criterio
Silicio	ppm	>14,5	>16,6	>20	43	Inaceptable	16	Crítico
Sodio	ppm	>10	-	>20	101	Inaceptable	24	Inaceptable
Aluminio	ppm	>5	>7,6	>10	15	Inaceptable	16	Inaceptable
Cromo	ppm	>1,27	>1,38	>5	1	Aceptable	1	Aceptable
Cobre	ppm	>5	>6,76	>15	14	Crítico	7	Crítico
Hierro	ppm	>15	>17,08	>25	58	Inaceptable	16	Alerta
Plomo	ppm	>1,32	>1,47	>5	0	Aceptable	0	Aceptable
Níquel	ppm	>3	-	>5	0	Aceptable	0	Aceptable
Estaño	ppm	>1,27	>1,38	>5	0	Aceptable	0	Aceptable
Vanadio	ppm	>13,44	>16	>47	0	Aceptable	1	Aceptable
Agua	%Vol	-	-	>0,3	1,5	Inaceptable	3,5	Inaceptable

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 10 se compara la cantidad de elementos de desgaste cuya concentración aumentó, disminuyó o permaneció igual para cada factor de acidificación y sus respectivas réplicas.

Cuadro 10. Comparación elementos que aumentan, disminuyen o se mantienen después del tratamiento de acidificación

Elementos	Aumenta	Total	Disminuye	Total	Igual	Total
5%	Ca, V, Ba	3	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Na, Al, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni	13	Mn, Ag, Sn, Ti	4
5% - R1	Ca, Na, Al, Mn, V, Ba	6	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Cr, Cu, Pb, Ni	10	Fe, Ag, Sn, Ti	4
5% - R2	Ca, Al, Mn, Ti, V, Ba	6	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Na, Cr, Cu, Fe, Pb	11	Ni, Ag, Sn	3
10%	Ca, Si, Al, Fe, Mn, Ti, V, Ba	8	Mg, Mo, P, Zn, B, Na, Cr, Cu, Pb, Ni	10	Ag, Sn	2
10% - R1	Ca, Mn, Ti, V, Ba	5	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Na, Al, Cr, Cu, Fe, Pb	12	Ni, Ag, Sn	3
10% - R2	Ca, Mn, Ti, V, Ba	5	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Na, Al, Cr, Cu, Fe, Pb	12	Ni, Ag, Sn	3
15%	Ca, Mn, Ti, V, Ba	5	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Na, Al, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni	13	Ag, Sn	2
15% - R1	Ca, Mn, Ti, V, Ba	5	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Na, Al, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni	13	Ag, Sn	2
15% - R1	Ca, Mn, Ti, V, Ba	5	Mg, Mo, P, Zn, B, Si, Na, Al, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni	13	Ag, Sn	2

Fuente: Elaboración propia.

En cada uno de los ensayos realizados se evidenció que existe una remoción de elementos de desgaste. Para las acidificaciones donde se aplicó un 15% de ácido sulfúrico se logró una disminución en la concentración de 13 elementos de desgaste, mientras que para las pruebas realizadas con un 5% de ácido sulfúrico solo se logró disminuir en promedio 11 elementos. Si bien la mejor opción fue la del primer ensayo realizado para el 5% de ácido, esta se puede tomar como un valor atípico ya que difiere en sus valores frente a las otras dos réplicas, es por esto que se determina que la mejor opción de acidificación sería la correspondiente a un 15%v/v de ácido sulfúrico, ya que disminuye la mayor cantidad de elementos de desgaste en comparación con los otros porcentajes evaluados, adicionalmente presenta los ensayos donde se aumentó la concentración en la menor cantidad de elementos de desgaste.

El porcentaje de remoción indica la fracción de contaminante (elemento de desgaste) que fue retirado de la muestra original, este porcentaje se calcula con el fin de determinar cuál de los tipos de acidificación aplicada al aceite es mejor, si la del 5%, 10% o el 15%. Se calculó el porcentaje de remoción como se indica en la Ecuación 7.

Ecuación 7. Porcentaje de remoción

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100$$

Donde:

C_o : Concentración inicial, ppm

C_f : Concentración final, ppm

Los datos cálculos del porcentaje de remoción de cada elemento de desgaste correspondiente a cada ensayo se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Porcentaje de remoción de metales de desgaste para tratamiento de acidificación

Elemento	5%	5% - R1	5% - R2	10%	10% - R1	10% - R2	15%	15% - R1	15% - R1
Ca	-331,6%	-356,7%	-505,9%	-756,4%	-521,1%	-780,6%	-743,7%	-769,5%	-744,5%
Mg	65,4%	65,0%	30,4%	62,5%	44,7%	52,4%	60,3%	61,2%	58,3%
Mo	65,5%	69,0%	62,1%	82,8%	82,8%	86,2%	79,3%	79,3%	79,3%
P	70,4%	83,8%	64,3%	73,2%	66,4%	67,3%	86,0%	86,9%	87,0%
Zn	73,0%	64,4%	41,3%	76,2%	61,4%	57,6%	87,2%	88,2%	87,3%
B	75,0%	100,0%	50,0%	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%
Si	59,6%	75,0%	42,3%	-190,4%	57,7%	61,5%	71,2%	75,0%	69,2%
Na	67,4%	-49,5%	36,8%	32,6%	54,7%	57,9%	82,1%	83,2%	83,2%
Al	31,6%	-157,9%	-10,5%	-526,3%	5,3%	21,1%	10,5%	15,8%	31,6%
Cr	66,7%	66,7%	33,3%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%
Cu	38,9%	72,2%	27,8%	66,7%	55,6%	55,6%	72,2%	61,1%	55,6%
Fe	66,1%	0,0%	33,9%	-66,1%	66,1%	69,4%	77,4%	75,8%	79,0%
Pb	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Mn	0,0%	-200,0%	-2800,0%	-600,0%	-300,0%	-2700,0%	-2900,0%	-2700,0%	-2900,0%
Ni	100,0%	100,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Aumenta
 Disminuye

Fuente: Elaboración propia.

Conforme con los resultados obtenidos se observa que para los ensayos donde se aplicó el 15%v/v de ácido sulfúrico, los porcentajes de remoción se mantienen más estables y adicionalmente son mayores frente a los presentados en los demás ensayos.

Cabe resaltar que no todos los elementos de desgaste tienen el comportamiento esperado, como el caso del calcio, que presentó un aumento en su concentración, esto se debe principalmente a que en el proceso de neutralización del ácido se requiere de la adición de hidróxido de calcio en grandes cantidades, esto debido a que no en todos los casos el porcentaje establecido en antecedentes era el acertado, este exceso de hidróxido adicionado provocó el aumento en la concentración de calcio en la muestra final.

Otro dato relevante está en la aparición de manganeso en la muestra final y en general en todos los ensayos realizados, dentro de los aditivos que se adicionan al aceite de motor se encuentra una amplia variedad de detergentes hechos a base de sales metálicas, en este caso de manganeso, en el proceso de acidificación se rompen cadenas de hidrocarburos, lo que conllevará a la separación de compuestos, en este caso el manganeso.

La remoción de elementos de desgaste se presenta a raíz de la reacción de neutralización del ácido adicionado, como se muestra en la Ecuación 2, en este punto se realiza una reacción de sustitución y en algunos casos de disociación, en donde se separará el metal, que se precipitará en el lodo acidificado, adicionalmente dependiendo de las características iónicas de cada uno de los metales presentes

en el aceite se verá más favorecida la remoción de unos compuestos frente a otros. A partir del diseño de experimentos formulado y los resultados obtenidos de los procesos de acidificación realizados se construyó la Tabla 24.

Para el análisis ANOVA se requiere del planteamiento de una hipótesis nula y una hipótesis alterna, las cuales se muestran a continuación:

Hipótesis nula: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

Hipótesis alterna: $H_i: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

La hipótesis nula para este caso se refiere a la posibilidad de que independientemente de los porcentajes de ácido adicionados las concentraciones de los elementos de desgaste se comporten de la misma manera. Por otra parte, si se cumple la hipótesis alterna significará que ya sea el metal específico o la cantidad adicionada de ácido tiene una incidencia en el comportamiento de la concentración de los elementos de desgaste.

Tabla 24. Desarrollo del diseño de experimentos para tratamiento de acidificación, en % de remoción

Elementos de desgaste	%v/v Ácido Sulfúrico		
	5%	10%	15%
Fósforo	70,4%	73,2%	86,0%
	83,8%	66,4%	86,9%
	64,3%	67,3%	87,0%
Zinc	73,0%	76,2%	87,2%
	64,4%	61,4%	88,2%
	41,3%	57,6%	87,3%
Cobre	38,9%	66,7%	72,2%
	72,2%	55,6%	61,1%
	27,8%	55,6%	55,6%

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de determinar la incidencia que tiene la variación en el porcentaje de ácido adicionado en el proceso frente a la remoción de metales, se realiza un análisis de varianza ANOVA, este se realiza mediante la herramienta Excel¹⁸⁹, para el análisis se utilizó un nivel de significancia α de 0,05, los resultados se muestran en la Tabla 25.

¹⁸⁹ Microsoft Excel. Versión 2004.

Tabla 25. Análisis de Varianza ANOVA para el tratamiento de acidificación

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Elementos de desgaste	7,668461	0,003900525	3,554557146
%v/v Ácido Sulfúrico	7,384323	0,004553298	3,554557146
Interacción	0,891596	0,489058811	2,927744173

Fuente: Elaboración propia.

Según Díaz¹⁹⁰, si la probabilidad es menor al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula y la prueba es significativa, como sucede para los elementos de desgaste y para las acidificaciones, ya que se rechaza la suposición de que independientemente del porcentaje de ácido adicionado o del elemento de desgaste, el porcentaje de remoción se mantendría constante, habrá una afectación de ambos factores sobre la concentración de salida, o el porcentaje de remoción.

De acuerdo con las Ecuaciones 1 y 2 el ácido reaccionará con el metal, el compuesto resultante así mismo reaccionará con hidróxido de calcio separando el metal, por ende, el porcentaje de ácido sulfúrico adicionado influirá en la cantidad de metal separado. Por otra parte, cada metal tiene una estructura iónica diferente, por lo cual sus interacciones con otros compuestos algunas veces se verán favorecidas, esto sustenta el hecho de que el factor “elemento de desgaste” tenga influencia, por ende, algunos metales tendrán una remoción más efectiva que otros.

3.4 TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACEITE USADO POR ADSORCIÓN

Una vez realizadas las prácticas planteadas se enviaron las muestras finales del aceite tratado a un laboratorio externo, en los resultados obtenidos se muestra la concentración de los elementos de desgaste en ppm.

El Cuadro 12 presenta la información obtenida para el tratamiento con el filtro de adsorción con lecho de carbón activado y el lecho de ilmenita. Con cada uno de los modelos planteados se logró reducir la concentración de contaminantes en el aceite, estos resultados se comparan con los valores obtenidos en el aceite caracterizado inicialmente.

Se determina que el tipo de lecho que mejores resultados presenta es el de ilmenita, puesto que remueve la mayor cantidad de contaminantes, esto se corroborará más adelante por medio del porcentaje de remoción.

¹⁹⁰ DÍAZ, Abel. Diseño estadístico de experimentos. 2ª edición. Antioquía. Universidad de Antioquía, 2009, p. 33. ISBN:978-958-714-264-8

Cuadro 12. Resultados obtenidos para el tratamiento de adsorción

Elemento	Unidad	Original	Carbón	Carbón R1	Ilmenita	Ilmenita - R1
Ca	Ppm	1100	902	837	758	804
Mg	Ppm	458	231	197	180	183
Mo	Ppm	20	13	13	13	13
P	Ppm	628	414	377	389	386
Zn	Ppm	779	542	487	419	395
Si	Ppm	43	43	33	37	32
Na	Ppm	101	160	182	120	126
Al	Ppm	15	14	9	13	11
Cr	Ppm	1	2	2	2	2
Cu	Ppm	14	12	10	12	11
Fe	Ppm	58	55	44	51	48
Pb	Ppm	0	1	1	0	1
Ni	Ppm	0	0	0	0	0
Sn	Ppm	0	0	0	0	0
V	Ppm	0	0	0	0	0
K	Ppm	6	19	22	10	9

Aumenta
 Disminuye
 Igual

Fuente: Elaboración propia.

Dado que la opción que mejor responde al objetivo de reducir la concentración de elementos de desgaste en la muestra es el filtro de adsorción con lecho de ilmenita esta será objeto de estudio y comparación frente a la normatividad establecida en la norma NTC 5995, dicha comparación se muestra en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Comparación NTC 5995 frente al aceite tratado en filtro de adsorción con lecho de ilmenita

Elemento de desgaste	Unidad	Concentración en ppm requerida por NTC 5995	Concentración promedio para Ilmenita	Criterio
Calcio	Ppm	15	781	No cumple
Magnesio	Ppm	15	182	No cumple
Fósforo	Ppm	15	388	No cumple
Zinc	Ppm	15	407	No cumple
Silicio	Ppm	50	35	Cumple
Aluminio	Ppm	50	12	Cumple
Cromo	Ppm	50	2	Cumple
Cobre	Ppm	50	12	Cumple
Hierro	Ppm	50	50	Cumple
Plomo	Ppm	50	1	Cumple
Níquel	Ppm	50	0	Cumple
Estaño	Ppm	50	0	Cumple
Vanadio	Ppm	50	0	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Frente a la NTC 5995 el aceite tratado no cumple con las concentraciones requeridas para elementos como calcio, magnesio, fósforo, zinc y hierro. Por otra parte, el aceite tratado cumple los parámetros de cromo, níquel, estaño, cobre, silicio, aluminio, plomo y vanadio exigidos por la norma.

Por otra parte, la coloratura exigida por la NTC 5995 es “clara y brillante”, para el modelo de adsorción no se contó con un proceso específico de blanqueo, por lo cual el aceite continuó con su apariencia oscura.

En comparación con las condiciones iniciales del aceite usado se evidencia una disminución en las concentraciones de elementos de desgaste para el aceite tratado por adsorción, aunque comparando con los parámetros establecidos y permisibles para aceites usados de motor, el aceite tratado permanece con las mismas condiciones de inaceptabilidad y criticidad en elementos como, silicio, sodio, aluminio, cobre y hierro; la comparación se muestra con mayor detalle en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Comparación estado original de aceite frente a la muestra final tratada por adsorción

Elemento de desgaste	Unidad	Alerta	Crítico	Inaceptable	Concentración inicial	Criterio	Concentración promedio para Ilmenita	Criterio
Silicio	ppm	>14,5	>16,6	>20	43	Inaceptable	35	Inaceptable
Aluminio	ppm	>5	>7,6	>10	15	Inaceptable	12	Inaceptable
Cromo	ppm	>1,27	>1,38	>5	1	Aceptable	2	Aceptable
Cobre	ppm	>5	>6,76	>15	14	Crítico	12	Crítico
Hierro	ppm	>15	>17,08	>25	58	Inaceptable	50	Inaceptable
Plomo	ppm	>1,32	>1,47	>5	0	Aceptable	1	Aceptable
Níquel	ppm	>3	-	>5	0	Aceptable	0	Aceptable
Estaño	ppm	>1,27	>1,38	>5	0	Aceptable	0	Aceptable
Vanadio	ppm	>13,44	>16	>47	0	Aceptable	0	Aceptable

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que no se logra cumplir con el criterio de aceptabilidad de los elementos de desgaste que se encontraban en estado crítico, se debe destacar que se presenta una reducción significativa, que para el silicio es del 18%, para el aluminio es del 20%, para el cobre es del 14% y para el hierro es del 16%. Lo anterior indica que el proceso implementado si es efectivo para la reducción de contaminantes, sin embargo, se deben evaluar nuevas condiciones u otros procesos que permitan complementar este tratamiento y así aumentar los porcentajes de remoción logrando que la concentración de los contaminantes cumpla con los parámetros establecidos.

En cada uno de los ensayos realizados se evidenció que existe una remoción de elementos de desgaste, sin embargo, los elementos que se atacaron no fueron los mismos para ambas adsorciones, para el proceso de adsorción con ilmenita se logró reducir 9 elementos de desgaste y se incrementaron en valor 3, mientras que para el caso del carbón activado se disminuyó la concentración en 8 pero se aumentó en 4 elementos. En el Cuadro 15 se muestra con mayor detalle esta comparación.

Cuadro 15. Comparación de elementos que aumentan, disminuyen o se mantienen después del tratamiento de adsorción

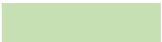
Elementos	Aumentan	Total	Disminuyen	Total	Mantienen	Total
Carbón	Na, Cr, Pb, K	4	Ca, Mg, Mo, P, Zn, Al, Cu, Fe	8	Si, Ni, Sn, V	4
Carbón R1	Na, Cr, Pb, K	4	Ca, Mg, Mo, P, Zn, Si, Al, Cu, Fe	9	Ni, Sn, V	3
Ilmenita	Na, Cr, K	3	Ca, Mg, Mo, P, Zn, Si, Al, Cu, Fe	9	Pb, Ni, Sn, V	4
Ilmenita R1	Na, Cr, Pb, K	4	Ca, Mg, Mo, P, Zn, Si, Al, Cu, Fe	9	Ni, Sn, V	3

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que para el proceso de acidificación se calcula el porcentaje de remoción de elementos de desgaste con el fin de determinar cuál de las dos opciones de lecho es más efectiva que la otra, estos porcentajes de remoción se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Porcentaje de remoción de metales de desgaste para tratamiento de adsorción

Elemento	Carbón	Carbón R1	Ilmenita	Ilmenita - R1
Ca	18,0%	23,9%	31,1%	26,9%
Mg	49,6%	57,0%	60,7%	60,0%
Mo	35,0%	35,0%	35,0%	35,0%
P	34,1%	40,0%	38,1%	38,5%
Zn	30,4%	37,5%	46,2%	49,3%
Si	0,0%	23,3%	14,0%	25,6%
Na	-58,4%	-80,2%	-18,8%	-24,8%
Al	6,7%	40,0%	13,3%	26,7%
Cr	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
Cu	14,3%	28,6%	14,3%	21,4%
Fe	5,2%	24,1%	12,1%	17,2%
K	-216,7%	-266,7%	-66,7%	-50,0%

 Aumenta  Disminuye

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que el proceso de adsorción con ilmenita posee unos porcentajes de remoción mejores que los del proceso de adsorción con carbón activado, por ende, se tomará este como la mejor opción.

Al igual que para el caso de la acidificación la tendencia general se dirige hacia el hecho de que se reduce la concentración para la gran mayoría de metales pesados, aunque para el caso de la ilmenita se presentan unos aumentos, más exactamente para el calcio, sodio y cromo, esto se puede deber a que dentro de la composición química de la ilmenita encontramos óxidos de cromo, calcio y potasio, los cuales en el intercambio iónico que se presenta dentro de la torre van a pasar a ser parte del aceite y por ende representan un aumento en la concentración.

La remoción de elementos de desgaste se presenta a raíz del intercambio iónico entre el aceite y los poros/sitios activos del lecho filtrante, una vez el aceite entra en contacto con el sólido poroso se inicia el intercambio iónico, por lo cual la mayoría de elementos de desgaste, más exactamente los metales se traspasarán al sólido separándose del aceite y reduciendo su concentración.

A partir del diseño de experimentos formulado y los resultados obtenidos de los procesos de adsorción realizados se construyó la Tabla 26.

Para el análisis ANOVA se requiere del planteamiento de una hipótesis nula y una hipótesis alterna, las cuales se muestran a continuación:

Hipótesis nula: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

Hipótesis alterna: $H_i: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

La hipótesis nula para este caso se refiere a la posibilidad de que independientemente del tipo de lecho usado las concentraciones de los elementos de desgaste se comporten de la misma manera. Por otra parte, si se cumple la hipótesis alterna significará que ya sea el metal específico o el lecho usado tiene una incidencia en el comportamiento de la concentración de los elementos de desgaste.

Tabla 26. Desarrollo del diseño de experimentos para tratamiento de adsorción, en % de remoción

Elementos de desgaste	Lecho	
	Carbón Activado	Ilmenita
Fósforo	34,1%	38,1%
	40,0%	38,5%
Zinc	30,4%	46,2%
	37,5%	49,3%
Cobre	14,3%	14,3%
	28,6%	21,4%

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de determinar la incidencia que tiene la variación del lecho usado en el proceso frente a la remoción de metales, se realiza un análisis de varianza ANOVA, este se realiza mediante la herramienta Excel¹⁹¹, para el análisis se utilizó un nivel de significancia α de 0,05, los resultados se muestran en la Tabla 27.

¹⁹¹ Microsoft Excel. Versión 2004.

Tabla 27. Análisis de Varianza ANOVA para el tratamiento de adsorción

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Elementos de desgaste	17,96751436	0,002929024	5,14325285
Lecho	1,514678395	0,264481366	5,987377607
Interacción	2,759906534	0,141291962	5,14325285

Fuente: Elaboración propia.

Según Díaz¹⁹², si la probabilidad es menor al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula y la prueba es significativa, como sucede para los elementos de desgaste, ya que se rechaza la suposición de que independientemente del elemento de desgaste, el porcentaje de remoción se mantendría constante, habrá una afectación del factor “elemento de desgaste” sobre la concentración de salida, o el porcentaje de remoción.

Por otra parte, cada metal tiene una estructura iónica diferente, por lo cual sus interacciones con otros compuestos algunas veces se verán favorecidas, esto sustenta el hecho de que el factor “elemento de desgaste” tenga influencia, por ende, algunos metales tendrán una remoción más efectiva que otros.

¹⁹² DÍAZ, Abel. Diseño estadístico de experimentos. 2ª edición. Antioquía. Universidad de Antioquía, 2009, p. 33. ISBN:978-958-714-264-8

4. CONCLUSIONES

- El aceite lubricante de motor diésel proveniente del Centro de Tecnologías del Transporte fue caracterizado fisicoquímicamente, en este se determinó que la viscosidad a 100°C fue de 6,2 cSt, la densidad fue de 0,87 g/ml, el pH dio 6,82, el TBN 6,0 mgKOH/g, el TAN 2,15 mgKOH/g, elementos de desgaste se encontraron en 1154 ppm para el calcio, magnesio en 552 ppm, molibdeno en 29 ppm, fósforo en 785 ppm, zinc en 821 ppm, boro en 4 ppm, silicio en 52 ppm, sodio en 95 ppm, aluminio en 19 ppm, cromo en 3 ppm, cobre en 18 ppm, hierro en 62 ppm, plomo en 2 ppm, manganeso, níquel y titanio en 1 ppm y plata, estaño, vanadio y bario en 0 ppm.
- Mediante revisión bibliografía fueron seleccionados los tratamientos de acidificación con ácido sulfúrico y adsorción para reducir la concentración de los elementos de desgaste. Para la acidificación se escogieron porcentajes de adición de 5%, 10% y 15% y los análisis se realizaron mediante un laboratorio externo, determinando el porcentaje de remoción de 20 elementos de desgaste. Para el caso del fósforo, zinc y sodio se tuvieron remociones de hasta el 80%, obteniendo las mayores remociones para el 15%v/v de ácido sulfúrico, mientras que en el caso del calcio, aluminio y manganeso sus concentraciones aumentaron en más del 100%. Para el tratamiento de adsorción se escogieron como adsorbente el carbón activado y la ilmenita, igualmente los análisis fueron realizados en un laboratorio externo. En este tratamiento se obtuvieron porcentajes de remoción máximos del 60% para magnesio con ilmenita, mientras que para el carbón activado el mayor porcentaje de remoción fue de 49% también para magnesio. Elementos como el sodio y el cromo aumentaron para ambos adsorbentes.
- Se realizó una comparación de las concentraciones obtenidas en los dos tratamientos con la norma NTC 5995 que establece los requisitos de las bases lubricantes re-refinadas en Colombia y los parámetros aceptables para el uso de aceites como lubricantes publicado por Buchelli. Según la norma NTC 5995, para ambos tratamientos no se cumplen con los requisitos de concentraciones de calcio, magnesio, fósforo y zinc puesto que superan 15 ppm, pero si se cumplen para silicio, aluminio, cromo, cobre, hierro, plomo, níquel, estaño, vanadio y bario. De acuerdo con los parámetros propuestos por Buchelli, las concentraciones de sodio, aluminio y agua son inaceptables, las de silicio y cobre críticas, la de hierro genera alerta, y cromo, plomo, níquel, estaño y vanadio se encuentran en concentraciones aceptables.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar una caracterización del lodo resultante del proceso de acidificación para evaluar posibles usos de este subproducto.
- Para el proceso de acidificación evaluar el uso de otros ácidos como el ácido clorhídrico, fosfórico o nítrico.
- Utilizar otros materiales adsorbentes para el proceso de adsorción como bentonita, tierras blanqueadoras o biomasa.
- Construir un filtro de adsorción de medio dual o múltiple y evaluar la eficiencia que tienen frente a un filtro rápido, así como las diferentes combinaciones de los medios filtrantes. Por ejemplo, combinar carbón activado e ilmenita en una misma torre.
- Combinar un método tradicional como la adsorción con un método nuevo como la biosorción para la remoción de contaminantes aplicables a procesos de descontaminación de aceites usados evitando problemas de contaminación por la generación de lodos químicos.
- Realizar un tratamiento conjunto de acidificación y adsorción y evaluar la eficiencia que tiene la implementación de estos dos procesos juntos para la re-refinación de aceites usados de motor.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. ¿Qué tipo de aceite es el adecuado para usted? Oil Matters. [En línea]. [Citando 25 de Noviembre, 2018]. 4 p. Disponible en Internet: <https://www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/2016-303_MotorOilGuide_Espaol_Lo.pdf>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM E2412. Estados Unidos: ASTM, 2018. 25 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. ASTM D974. Estados Unidos: ASTM 2004. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Initial pH (i-pH)-Value of Petroleum Products. ASTM D7946. Estados Unidos: ASTM, 2014. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products. ASTM D189. Estados Unidos: ASTM, 2014. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Low-Temperature Viscosity of Automatic Transmission Fluids, Hydraulic Fluids, and Lubricants using a Rotational Viscometer. ASTM D2983. Estados Unidos: ASTM, 2017. 18 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry. ASTM D6595. Estados Unidos: ASTM, 2017. 6 p.

ANDARGACHEW, Hayalu. Recycling of Used Lubricating Oil Using Acid-Clay Treatment Process. Tesis de Máster en Ingeniería Química en Ingeniería Ambiental. Addis Ababa: Universidad Addis Ababa. Addis Ababa Instituto de Tecnología (AAiT). Escuela de Química y Bioenergía, 2014. 80 p.

BISBAL, Ruth, *et al.* Evaluación de las características y propiedades de fundición de arena de olivino venezolana (Parte I). En: Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V. Julio, 2015. Vol. 30, No. 3, p. 95-110.

BUCHELLI, Luis y GARCÍA, Vicente. Detección temprana de fallas en motores de combustión interna a diésel mediante la técnica de análisis de aceite. En: Revista Ciencia UNEMI. Septiembre, 2015. Vol. 8, No.15, p 84-95. ISSN: 1390-4272.

CARBOTECNIA. Filtros de grava, arena sílica y antracita. México: Carbotecnia S.A., 2007. Boletín técnico AG-009.

CARRIAZO, José; SAAVEDRA, Martha y MOLINA, Manuel. Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. En: Educación Química. Julio, 2010. Vol. 21, No. 3, p. 224-229.

CHEN, Y.H. Synthesis, characterization and dye adsorption of ilmenite nanoparticles. En: Journal of Non-Crystalline Solids. Enero, 2011. Vol. 357, p. 136-139.

COLOMBIA, DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN COLCIENCIAS. Tipología de proyectos clasificados de carácter científico, tecnológico e innovación. Febrero de 2018. Versión 5. 73 p.

COLOMBIA. FONDO DE ACEITES USADOS, ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Panorama general del aceite lubricante usado - informe año 2016-. [Diapositivas] Bogotá, D.C.: Asociación colombiana del petróleo, 2017. 15 diapositivas.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor industrial. 2 ed. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014. 78 p. ISBN: 978-958-8491-87-5.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Gestión de Aceites Usados en Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2003. 39 p.

COLOMBIA. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Gestión de los Aceites Usados. Secretaría Distrital de Ambiente. 2008. p. 7.

DELGADO, Emilio y PARRA, Jaime. Combustibles alternativos a partir de aceites. En: AVANCE Investigación en Ingeniería, 2007. No.6, p 110 – 115.

DÍAZ, Abel. Diseño estadístico de experimentos. 2ª edición. Antioquía. Universidad de Antioquía, 2009, p. 33. ISBN:978-958-714-264-8

EMAM, Eman y SHOAI, Abeer. Re-refining of Used Lube Oil, II- by Solvent/Clay and Acid/Clay-Percolation Processes. En: ARPN Journal of Science and Technology. Diciembre, 2012. Vol. 2, No. 11, p. 1034-1041. ISSN 2225-7217.

EPA. AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL. Manejando Aceite Usado. Consejo para empresas pequeñas. Washington, DC: 1996, 4 p. Disponible en Internet: <<https://p2infohouse.org/ref/05/04990.pdf>>

FONG, Waldyr; QUIÑONEZ, Edgar y TEJADA, Candelaria. Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje. En: Prospectiva, Julio, 2017, Vol. 15, p 135 - 144.

GECOLSA CAT. [En línea]. [Citado 11 de enero, 2019] Disponible en Internet: <<https://gecolsa.com/>>

GONZÁLEZ, Diana y NAISA, Lina. Evaluación de la actividad fotocatalítica de películas de ilmenita para la degradación de H₂S. Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería Química, año 2018, 79 p.

GULF. Manual técnico de Aceites lubricantes. [En línea]. [Citado el 26 de Noviembre de 2018]. Disponible en internet <<https://es.scribd.com/document/323148813/ManualTecnico-Gulf>>

HAMMAMI, Maroua; *et al.* Axle gear oils: Tribological characterization under full film lubrication. En: Tribology International, Febrero, 2017. Vol. 106, p 109 - 122.

HARRIS, Daniel.C. Análisis Químico Cuantitativo. 2007. Barcelona: Reverté S.A. ISBN 84-291-7224-6

HIGUERA, Oscar; ARROYAVE, Juan y FLOREZ, Luis. Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación por cromo generado en las industrias del curtido de cueros. En: Dyna. Diciembre, 2009. Vol. 6, No. 160, p. 107-119. ISSN 0012-7353.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Manual de estándares de medición de petróleo, sección muestreo. Práctica normativa para el petróleo y productos del petróleo. Parte 1: muestreo manual. NTC 5836-1. Bogotá D.C.: NTC, 2011. 42 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto. 2018. ISBN 9789588586573 153 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para Automotores. NTC 1721. Bogotá D.C.: NTC, 2015. 13 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para Grasas y aceites animales y vegetales. Método de

la determinación de la densidad (masa por volumen convencional). NTC 336. Bogotá D.C.: NTC, 2016. 11 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para Petróleo y sus derivados. Bases lubricantes refinadas. NTC 5995. Bogotá D.C.: NTC, 2013. 11 p.

ISAH, A. G. *et al.* Regeneration of Used Engine Oil. En: Proceedings of the World Congress on Engineering. Julio, 2013. Vol. 1. p. 565-568. ISBN: 978-988-19251-0-7.

JONES, Juan. Diseño de un sistema de reciclaje de aceite lubricante usado. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Chile: Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias de la ingeniería. Escuela de ingeniería mecánica, 2007. 71 p.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. La Grava. [En línea]. Enero de 2012. [Citado 12 de noviembre, 2018]. Disponible en Internet: < <http://materiales-de-construccion-ujcv.blogspot.com/2012/01/la-grava.html>>

MATÍAS, Diógenes. Ilmenita. Distribuidores de ilmenita [En línea]. [Citado el 12 de noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <<http://distribuidoresdeilmenita.com/>>

MEDINA, Mauricio; OSPINO, Yesid y TEJADA, Lesly. Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. En: Luna Azul, Enero, 2015. No. 40. ISSN 1909-2474

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Decreto 4741 de 2005- [En línea]. 2005. [Citado el 27 de Noviembre, 2018]. Disponible en internet:
<<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/526371/Decreto+4741+2005+PREVENCIÓN+Y+MANEJO+DE+REIDUOS+PELIGROSOS+GENERADOS+EN+GESTIÓN+INTEGRAL.pdf/491df435-061e-4d27-b40f-c8b3afe25705>>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1446 de 2005. [En línea]. 2005. [Citado el 27 de Noviembre, 2018]. Disponible en Internet:
<<<http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/b0-Resoluci%C3%B3n%201446%20de%202005%20-%20Modifica%20Resoluci%C3%B3n%20415%20de%201998.pdf>>

MOBIL. Mobil Delvac MX 15W-40. [En línea]. Junio 2018. [Citado el 26 de Noviembre de 2018]. Disponible en Internet: <<https://www.mobil.com/spanish-cl/commercial-vehicle-lube/pds/asxxmobil-delvac-mx-15w40>>

MUÑOZ, Édinson; MONTOYA, Daniel y MUÑOZ, Alejandra. Informe de investigación Fundación con Vida. Planteamiento y solución de la problemática de los aceites usados en Colombia. [En línea]. Mayo de 2017. [Citado 4 de Febrero, 2018]. 22 p. Disponible en Internet: <https://issuu.com/fundacionconvida/docs/informe_aceites_usados_en_colombia_>

ORTIZ, Leonardo. Evaluación de la gestión integral del manejo de aceite usado vehicular en Bogotá. Trabajo de grado en maestría de gestión ambiental. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de estudios ambientales y rurales, 2007. 134 p.

PADILLA, Noel. Análisis de aceite para detección temprana de fallas en motores Caterpillar. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero mecánico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería, 2013. 65 p.

PONCE, Efraín. Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada. Trabajo de grado para optar por el título en Licenciatura en Ingeniería Civil. Cholula, Puebla, México: Departamento de Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, 2005. 140 p.

Process for re-refining used oil. Inventor: Benjamin S. Santos. Int. CL: C10M 175/02. Fecha de solicitud: 4, Junio, 1993. Estados Unidos, patente de investigación. US 5,514,272A. 7, mayo, 1996.

REYES, Erik; CERINO, Felipe y SUÁREZ, Martha. Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. En: Ingenierías. Abril-Junio, 2006. Vol. IX, No. 31, p. 59-64.

RODRÍGUEZ, Javier. Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. España: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2003. 256 p. ISBN: 84-7978-587-X.

ROMERO, Jairo. Capítulo 6: Filtración. En: Acuípurificación: Diseño de sistemas de purificación de aguas. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995. p. 180-226.

RUDYK, Svetlana y SPIROV, Pavel. Temperature effect on extraction and purification of used motor oil by supercritical carbon dioxide. En: The Journal of Supercritical Fluids, Octubre, 2107, Vol. 128, p 291 – 299.

RUNT. REGISTRO UNICO DE NACIONAL DE TRÁNSITO. Estadísticas del RUNT. [En línea]. Diciembre de 2017. [Citado 4 de Febrero, 2018] Disponible en Internet:

<http://www.runt.com.co/cifras?field_fecha_de_la_norma_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2017&field_grafica_value=5>

SALDIVIA, Francisco. Aplicación de mantenimiento predictivo. Caso estudio: analisis de aceite usado en un motor de combustion interna. Cancún, México. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013), Agosto, 2013.

SGS. [En línea]. [Citado 11 de enero, 2019] Disponible en Internet: <<https://www.sgs.co>>

SOUTHERN FS. FS Lubricants. Oil Analysis Program. [En línea]. Estados unidos: southern FS. [Citado 22 de abril, 2018] Disponible en Internet: <<http://www.southernfs.com/energy/Documents/Lubricants/Item%20Number%20227214%20FS%20Used%20Oil%20Analysis%20Brochure.pdf>>

SPECTRO SCIENTIFIC. Guide to Measuring Oil Chemistry: Nitration, Oxidation and Sulfation. [En línea]. Octubre de 2017. [Citado 22 de abril, 2018]. Disponible en Internet: <<https://www.spectrosci.com/resource-center/lubrication-analysis/literature/e-guides/guide-to-measuring-oxidation-nitration-and-sulfation-in-oil/>>

STAN, Cornelia; ANDREESCU, Cristian y TOMA, Marius. Some aspects of the regeneration of used motor oil. En: Procedia Manufacturing. Abril, 2018. Vol. 22, p. 709-713.

SUARÉZ, Paola. Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación de la ilmenita sobre la actividad microbiana en presencia de luz visible. Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. Programa de Ingeniería Química, año 2017, 81 p.

UDONNE, J y BAKARE, O. Recycling of Used Lubricating Oil Using Three Samples of Acids and Clay as a Method of Treatment. International Archive of Applied Sciences and Technology. Junio, 2013. Vol. 4, No. 2, p. 8-14.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ilmenita: mineral que ayuda a purificar el agua. [En línea]. Diciembre de 2011. [Citado 12 de noviembre, 2018]. Disponible en Intenet: <<http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/ilmenita-mineral-que-ayuda-a-purificar-el-agua.html>>

UNIVERSO FORMULAS. Área del círculo. [En línea]. [Citado 11 de agosto, 2018] Disponible en Internet: <<https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/area-circulo/>>

USTARIZ, José. Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación sobre las propiedades estructurales y fotocatalíticas del mineral ilmenita para la generación

de hidrogeno. Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería con énfasis en Energías Alternativas. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de ingeniería. Maestría en Ingeniería énfasis Energías Alternativas, año 2015. 58 p.

WANKAT, Phillip. Capítulo 17: Introducción a la adsorción, cromatografía e intercambio iónico. En: Ingeniería de procesos de separación. Traducción de Virgilio González y Pozo; revisión técnica de Sergio Antonio Gómez Torres. 2 ed. México: Pearson Educación, 2008. p. 609-712. ISBN: 978-970-26-1281-0.

WIDMAN INTERNATIONAL SRL. Análisis: contaminación. [En línea]. [Citado 22 de abril, 2018] Disponible en Internet: <<http://www.widman.biz/Analisis/contaminacion.html>>

WIDMAN INTERNATIONAL SRL. SAE J300. [En línea]. Noviembre de 2018. [Citado 25 de noviembre, 2018] Disponible en Internet: <<https://www.widman.biz/Seleccion/j300.html>>

ZOGBI. Filtros de celulosa. [En línea]. [Citado 11 de enero, 2019]. Disponible en Internet: <<http://www.dczogbi.com/filtros.html>>

ANEXOS

ANEXO A

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO SIN TRATAR LABORATORIO SGS



SGS Colombia
Avenida Crisanto Luque # 44B-26
PBX. + 57 5 669 09 10
Cartagena - Bolívar



Usuario de web : SENA
Código de Muestra: CO108085

N° de Registro : 01067278/XXXX
El código adjunto es indispensable colocarlo en las etiquetas

Aceite Lubricante: MOBIL DELVAC MX 15W40
Equipo : NO REPORTADO
Cliente : CENTRO DE TECNOLOGIA DE
Modelo/ Serie: CTT-BIO-02 NO REPORTADO

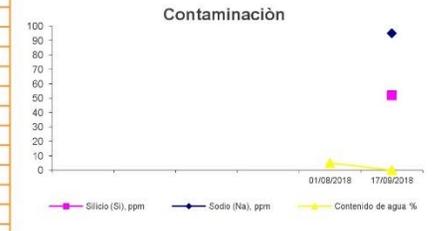
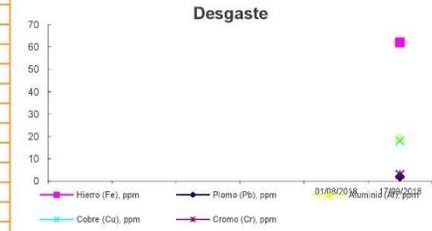
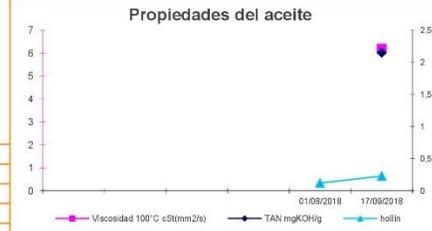
Componente: .
Capacidad:
Relleno (L): 0

CONTACTOS		
Diagnosticador:	Miguel Antonio Hernandez	Página web: http://vermolab-tech.fr.sgs.com/
Contacto :	Miguel Antonio Hernandez	Email : miguel.hernandezR@sgs.com

COMENTARIOS

SE ADJUNTA RESULTADOS DE INFRARROJO ASTM E2412, TAN O NUMERO ACIDO ASTM D664, TBN O RESERVA ALCALINA ASTM D2896, CONTENIDO DE METALES ASTM D6595 Y CARBON CONRADSON ASTM D189.

RESULTADOS		
Muestra N°	CO108085	CO102783
Nombre Aceite Lubricante	MOBIL DELVAC MX 15W40	DELVAC MX 15W40
Fecha de toma de muestra	17/09/2018	01/08/2018
Equipo (km/h)	0	0
Aceite (km/h)	0	0
Relleno (L)	0	0
Cambio de Aceite (S / N)	N	N
Aspecto		
Apariencia	OSCURA	OSCURA
Viscosidad ASTM D7279		
Viscosidad 100°C cSt(mr)	6.2	IMP
FT-IR (Infra-Red) E 2412		
Oxidación A/0.1 mm	0.70	0.31
Nitración A/0.1 mm	0.09	0.15
Hollin A/0.1 mm	0.23	0.12
Sulfatación A/0.1 mm	0.09	0.00
Glicol %	0.00	0.35
Agua %	0.00	4.98
Fuel %	4.63	2.40
Espectrometría ASTM D6595		
Calcio (Ca) ppm	1154	IMP
Magnesio (Mg) ppm	552	IMP
Molibdeno (Mo) ppm	29	IMP
Fósforo (P) ppm	785	IMP
Zinc (Zn) ppm	821	IMP
Boro (B) ppm	4	IMP
Silicio (Si) ppm	52	IMP
Sodio (Na) ppm	95	IMP
Aluminio (Al) ppm	19	IMP
Cromo (Cr) ppm	3	IMP
Cobre (Cu) ppm	18	IMP
Hierro (Fe) ppm	62	IMP
Plomo (Pb) ppm	2	IMP
Manganeso (Mn) ppm	1	IMP
Níquel (Ni) ppm	1	IMP
Plata (Ag) ppm	0	IMP
Estaño (Sn) ppm	0	IMP
Titanio (Ti) ppm	1	IMP
Vanadio (V) ppm	0	IMP
Bario (Ba) ppm	0	IMP
TAN ASTM D664		
TAN mgKOH/g	2.15	IMP
TBN ASTM D 2896		
TBN mgKOH/g	6.0	IMP
Carbon Conradson		
Residuo de Carbon Contra	1.38	1.32
Comentarios		
Muestra N°	CO108085	CO102783



This document is issued by the Company under its General Conditions of Services accessible at <http://www.sgs.com/terms-and-conditions.htm>. The Client's attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any other holder of this document is advised that information contained herein reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

ANEXO B CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO SIN TRATAR LABORATORIO GECOLSA

Angie Cuervos

CLIENTE : ANGIE CUERVO
 NÚMERO DE EQUIPO : HJ0035
 COMPONENTE : MOTOR
 NÚMERO DE SERIE : HJ0035
 MARCA : CHEVROLET
 MODELO : 2015
 LUGAR DE TRABAJO : BOGOTÁ
 NÚMERO DE GARANTÍA EXTENDIDA :

ORDEN DE TRABAJO :
 SERIE COMPONENTE :
 MODELO DEL COMP. :
 FABRICANTE DEL COMP. :
 # CONTROL LAB : 1
 MARCA/GRADO ACEITE : MOBIL15W-40
 TIPO DE FLUIDO :
 FECHA DE TERMINO
 NÚMERO GARANTÍA EXT :



Laboratorio de Fluidos S•O•S
 Calle 30 No. 19-04
 Soledad-Atlántico,
 Tel: (5)374 88 21 – PBX 336 12 00 Ext. 5311
 www.relianzcat.com

# CONTROL LABORATORIO	FECHA MUESTREO	FECHA PROCESO	HORÓMETRO	HORAS ACEITE	¿CAMBIO ACEITE?	RELLENO	UNIDADES DEL RELLENO	¿CAMBIO FILTRO?
R460-48093-1601	24-Mar-2018	24-Mar-2018	13480 HR		SI	7	GAL	
<p>Critico DESCONOCIDO EL PERIODO DE SERVICIO DEL LUBRICANTE EN USO. SODIO ALTO, COBRE, HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO ELEVADOS, LOS DEMAS ELEMENTOS ACEPTABLES. SE OBSERVA CRITICA CONTAMINACION CON AGUA (1.5%). REALICE EVALUACION TECNICA PARA LOCALIZAR EL ORIGEN DE LA ENTRADA DE AGUA/REFRIGERANTE Y TIERRA QUE PUEDE ESTAR GENERANDO DESGASTE ABRASIVO/CORROSIVO, TOME LOS CORRECTIVOS NECESARIOS Y VUELVA A TOMAR OTRA MUESTRA PARA SEGUIMIENTO.</p>								

Elementos de desgaste (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
R460-48093-1601	14	58	1	15	0	0	43	101	6	20	0	0	1100	458	779	628

Condición de aceite / Conteo Partículas	ST	OXI	NT	SUL	W	F
R460-48093-1601	20	21	9	17	E	N

Ag = Plata, Al = Aluminio, B = Boro, Ca = Calcio, Cr = Cromo, Cu = Cobre, Fe = Hierro, P = Fósforo, K = Potasio, Mg = Magnesio, Mo = Molibdeno, Na = Sodio, Ni = Níquel, Pb = Plomo, Si = Silicio, Sn = Estaño, Ti = Titanio, Zn = Zinc, V = Vanadio, Mn = Manganeso, B = Bario, A = Anticongelante, F = Combustible, W = Agua, P = Positivo, N = Negativo, E = Excesivo, NIT = Nitración, OXI = Oxidación, ST = Hollin, SUL = Sulfatación, ISO = Nivel de limpieza
 PCI = Índice de Cuantificador de Partículas, NaW = Agua salada, FL Pt = Punto álgido, TAN = Número Total Ácido, TBN = Número Total Básico, H2O = Karl Fisher, V100 = Viscosidad a 100C, V40 = Viscosidad a 40C, VI = Índice de Viscosidad

Nota: El propósito de este análisis es únicamente para detectar desgastes mecánicos. No debe entenderse como garantía expresa o implícita de que no ocurra una falla del equipo o alguno de sus componentes.

ANEXO E

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACIDIFICACIÓN CON 5% DE ÁCIDO SULFÚRICO. REPLICA 2



SGS Colombia
Avenida Crisanto Luque # 44B-26
PBX : + 57 5 669 09 10
Cartagena - Bolivar



Usuario de web : SENA
Código de Muestra: CO115394

N° de Registro : 01199737/XXXX
El código adjunto es indispensable colocarlo en las etiquetas

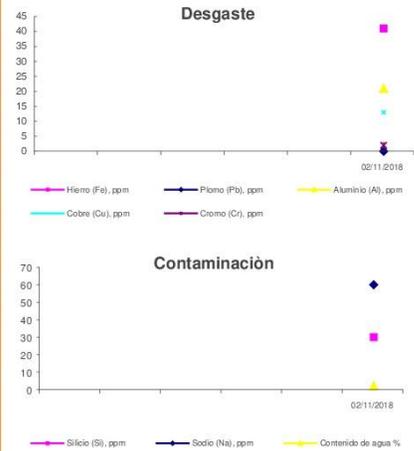
Aceite Lubricante: MOBIL DELVAC MX 15W40
Equipo : NO REPORTADO
Cliente : CENTRO DE TECNOLOGIA DE
Modelo/ Serie: CTT-QUI-06 NO REPORTADO

Componente: .
Capacidad:
Relleno (L): 0

CONTACTOS	
Diagnosticador:	Miguel Antonio Hernandez
Contacto :	Miguel Antonio Hernandez
	Página web: http://vemolab-tech.fr.sgs.com/
	Email : miguel.hernandezR@sgs.com

COMENTARIOS
SE ADJUNTA RESULTADOS PARCIALES: VISCOSIDAD ASTM D7279, CONTENIDO DE AGUA ASTM D95, CONTENIDO DE METALES ASTM D6595 *IMP: NO SE PUEDE DETERMINAR VISCOSIDAD DEL ACEITE A 100°C, TAN O NÚMERO ÁCIDO, TBN, DEBIDO A LA ALTA PRESENCIA DE AGUA. ** A LA ESPERA DE LOS RESULTADOS DE CCR PARA ENVIAR REPORTE COMPLETO.

RESULTADOS	
Muestra N°	CO115394
Nombre Aceite Lubricante	MOBIL DELVAC MX 15W40
Fecha de toma de muestra	02/11/2018
Equipo (km/h)	0
Aceite (km/h)	0
Relleno (L)	0
Cambio de Aceite (S / N)	N
Aspecto	
Apariencia	OSCURA
FT-IR (Infra-Red) E 2412	
Oxidación A/0.1 mm	
Nitración A/0.1 mm	
Hollín A/0.1 mm	
Sulfatación A/0.1 mm	
Glicol %	
Agua %	
Fuel %	
Espectrometría ASTM D6595	
Calcio (Ca) ppm	6992
Magnesio (Mg) ppm	384
Molibdeno (Mo) ppm	11
Fósforo (P) ppm	280
Zinc (Zn) ppm	482
Boro (B) ppm	2
Silicio (Si) ppm	30
Sodio (Na) ppm	60
Aluminio (Al) ppm	21
Cromo (Cr) ppm	2
Cobre (Cu) ppm	13
Hierro (Fe) ppm	41
Plomo (Pb) ppm	0
Manganeso (Mn) ppm	29
Níquel (Ni) ppm	1
Plata (Ag) ppm	0
Estaño (Sn) ppm	0
Titanio (Ti) ppm	2
Vanadio (V) ppm	1
Bario (Ba) ppm	1
TAN ASTM D664	
TAN mgKOH/g	IMP
TBN ASTM D 2896	
TBN mgKOH/g	IMP
Carbon Conradson	
Residuo de Carbon Contra	IMP
Contenido de agua	
Contenido de agua %	2.18
Comentarios	
Muestra N°	CO115394



This document is issued by the Company under its General Conditions of Services accessible at <http://www.sgs.com/terms-and-conditions.htm>. The Client's attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any other holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

ANEXO G

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACIDIFICACIÓN CON 10% DE ÁCIDO SULFÚRICO. REPLICA 1



SGS Colombia
Avenida Crisanto Luque # 44B-26
PEX : + 57 5 869 09 10
Cartagena - Bolivar



Usuario de web : SENA
Código de Muestra: CO115396

N° de Registro : 01199739/XXXX
El código adjunto es indispensable colocarlo en las etiquetas

Aceite Lubricante: MOBIL DELVAC MX 15W40
Equipo : NO REPORTADO
Cliente : CENTRO DE TECNOLOGIA DE
Modelo/ Serie: CTT-QUI-08 NO REPORTADO

Componente: .
Capacidad:
Relleno (L): 0

CONTACTOS

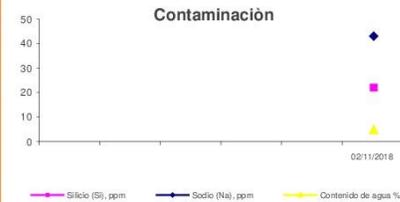
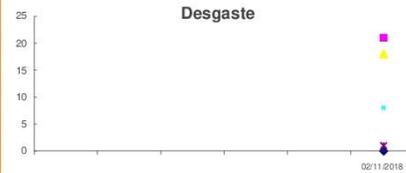
Diagnosticador: Miguel Antonio Hernandez Página web: <http://vemolab-tech.fr.sgs.com/>
Contacto : Miguel Antonio Hernandez Email : miguel.hernandezR@sgs.com

COMENTARIOS

SE ADJUNTA RESULTADOS PARCIALES: VISCOSIDAD ASTM D7279, CONTENIDO DE AGUA ASTM D95, CONTENIDO DE METALES ASTM D6595 * NO SE PUEDE DETERMINAR VISCOSIDAD DEL ACEITE A 100°C, TAN O NÚMERO ÁCIDO, TBN, DEBIDO A LA ALTA PRESENCIA DE AGUA. ** A LA ESPERA DE LOS RESULTADOS DE CCR (CARBON CORADSON) PARA ENVIAR REPORTE COMPLETO.

RESULTADOS

Muestra N°	CO115396
Nombre Aceite Lubricante	MOBIL DELVAC MX 15W40
Fecha de toma de muestra	02/11/2018
Equipo (km/h)	0
Aceite (km/h)	0
Relleno (L)	0
Cambio de Aceite (S / N)	N
Aspecto	
Apariencia	OSCURA
Espectrometría ASTM D6595	
Calcio (Ca) ppm	7168
Magnesio (Mg) ppm	305
Molibdeno (Mo) ppm	5
Fósforo (P) ppm	264
Zinc (Zn) ppm	317
Boro (B) ppm	1
Silicio (Si) ppm	22
Sodio (Na) ppm	43
Aluminio (Al) ppm	18
Cromo (Cr) ppm	1
Cobre (Cu) ppm	8
Hierro (Fe) ppm	21
Plomo (Pb) ppm	0
Manganeso (Mn) ppm	4
Níquel (Ni) ppm	1
Plata (Ag) ppm	0
Estaño (Sn) ppm	0
Titanio (Ti) ppm	2
Vanadio (V) ppm	2
Bario (Ba) ppm	1
Contenido de agua	
Contenido de agua %	4.78



This document is issued by the Company under its General Conditions of Services accessible at <http://www.sgs.com/terms-and-conditions.htm>. The Client's attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any other holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

Comentarios

ANEXO H

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACIDIFICACIÓN CON 10% DE ÁCIDO SULFÚRICO. REPLICA 2



SGS Colombia
Avenida Crisanto Luque # 44B-26
PEX : + 57 5 859 09 10
Cartagena - Bolivar



Usuario de web :
Código de Muestra:

SENA
CO115397

N° de Registro : 01199742/XXXX

El código adjunto es indispensable colocarlo en las etiquetas

Aceite Lubricante: MOBIL DELVAC MX 15W40
Equipo : NO REPORTADO
Cliente : CENTRO DE TECNOLOGIA DE
Modelo/ Serie: CTT-QUI-09 NO REPORTADO

Componente: .
Capacidad:
Relleno (L): 0

CONTACTOS

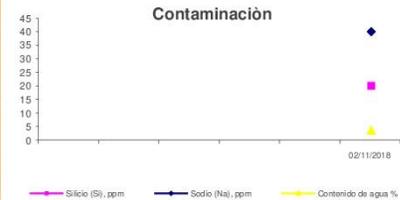
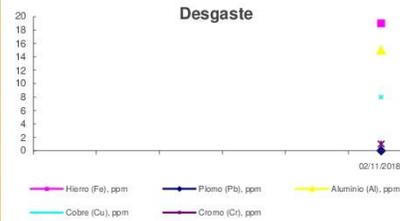
Diagnosticador: Miguel Antonio Hernandez Página web: <http://vemolab-tech.fr.sgs.com/>
Contacto : Miguel Antonio Hernandez Email : miguel.hernandezR@sgs.com

COMENTARIOS

SE ADJUNTA RESULTADOS FÍSICOQUÍMOS, CONTENIDO DE METALES ASTM D6595, PORCENTAJE DE AGUA ASTM D95. **NO SE PUEDE DETERMINAR VISCOSIDAD, TAN Y TBN DEBIDO AL ALTO CONENIDO DE AGUA. NOTA IMPORTANTE: A LAS ESPERA DE RESULTADOS DE CARBON CORADSON PARA COMPLETAR INFORME.

RESULTADOS

Muestra N°	COI15397
Nombre Aceite Lubricante	MOBIL DELVAC MX 15W40
Fecha de toma de muestra	02/11/2018
Equipo (km/h)	0
Aceite (km/h)	0
Relleno (L)	0
Cambio de Aceite (S / N)	N
Aspecto	
Apariencia	OSCURA
Espectrometria ASTM D6595	
Calcio (Ca) ppm	10162
Magnesio (Mg) ppm	263
Molibdeno (Mo) ppm	4
Fósforo (P) ppm	257
Zinc (Zn) ppm	348
Boro (B) ppm	1
Silicio (Si) ppm	20
Sodio (Na) ppm	40
Aluminio (Al) ppm	15
Cromo (Cr) ppm	1
Cobre (Cu) ppm	8
Hierro (Fe) ppm	19
Plomo (Pb) ppm	0
Manganeso (Mn) ppm	28
Níquel (Ni) ppm	1
Plata (Ag) ppm	0
Estaño (Sn) ppm	0
Titanio (Ti) ppm	3
Vanadio (V) ppm	2
Bario (Ba) ppm	1
Contenido de agua	
Contenido de agua %	3.50



This document is issued by the Company under its General Conditions of Services accessible at <http://www.sgs.com/terms-and-conditions.htm>. The Client's attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any other holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

Comentarios

ANEXO J

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ACIDIFICACIÓN CON 15% DE ÁCIDO SULFÚRICO. REPLICA 1



SGS Colombia
Avenida Crisanto Luque # 44B-26
PBX : + 57 5 669 09 10
Cartagena - Bolívar



Usuario de web :
Código de Muestra:

SENA
CO115397

N° de Registro : 01199243/XXXX
El código adjunto es indispensable colocarlo en las etiquetas

Acetate Lubricante: MOBIL DELVAC MX 15W40
Equipo : NO REPORTADO
Cliente : CENTRO DE TECNOLOGIA DE
Modelo/ Serie: CTT-QUI-10 NO REPORTADO

Componente: .
Capacidad:
Relleno (L): 0

CONTACTOS

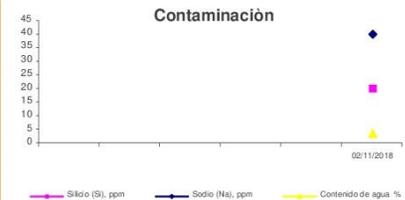
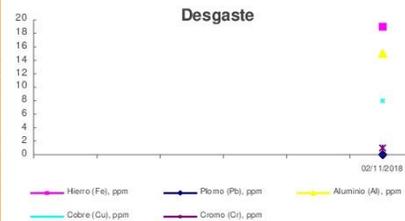
Diagnosticador: Miguel Antonio Hernandez Página web: <http://vernolab-tech.fr.sgs.com/>
Contacto : Miguel Antonio Hernandez Email : miguel.hernandezR@sgs.com

COMENTARIOS

SE ADJUNTA RESULTADOS FÍSICOQUÍMOS, CONTENIDO DE METALES ASTM D6595, PORCENTAJE DE AGUA ASTM D95. **NO SE PUEDE DETERMINAR VISCOSIDAD, TAN Y TBN DEBIDO AL ALTO CONENIDO DE AGUA. NOTA IMPORTANTE: A LAS ESPERA DE RESULTADOS DE CARBON CORADSON PARA COMPLETAR INFORME.

RESULTADOS

Muestra N°	CO115397
Nombre Aceite Lubricante	MOBIL DELVAC MX 15W40
Fecha de toma de muestra	02/11/2018
Equipo (km/h)	0
Aceite (km/h)	0
Relleno (L)	0
Cambio de Aceite (S/N)	N
Aspecto	
Apariencia	OSCURA
Espectrometría ASTM D6595	
Calcio (Ca) ppm	10034
Magnesio (Mg) ppm	214
Molibdeno (Mo) ppm	6
Fósforo (P) ppm	103
Zinc (Zn) ppm	97
Boro (B) ppm	1
Silicio (Si) ppm	13
Sodio (Na) ppm	16
Aluminio (Al) ppm	16
Cromo (Cr) ppm	1
Cobre (Cu) ppm	7
Hierro (Fe) ppm	15
Plomo (Pb) ppm	0
Manganeso (Mn) ppm	28
Níquel (Ni) ppm	0
Plata (Ag) ppm	0
Estaño (Sn) ppm	0
Titanio (Ti) ppm	3
Vanadio (V) ppm	1
Bario (Ba) ppm	1
Contenido de agua	
Contenido de agua %	3.50



This document is issued by the Company under its General Conditions of Services accessible at <http://www.sgs.com/terms-and-conditions.htm>. The Client's attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any other holder of this document is advised that information contained herein reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

Comentarios

ANEXO L

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

Angie Cuervos

CLIENTE : ANGE OLVERO
 NÚMERO DE EQUIPO : HUC035
 COMPONENTE : MOTOR
 NÚMERO DE SERIE : HUC035
 MARCA : CHEVROLET
 MODELO : 2015
 LUGAR DE TRABAJO : BOGOTÁ
 NÚMERO DE GARANTÍA EXTENDIDA :

ORDEN DE TRABAJO :
 SERIE COMPONENTE :
 MODELO DEL COMP. :
 FABRICANTE DEL COMP. :
 # CONTROL LAB : 8
 MARCA/GRADO ACEITE : MOBIL15W-40
 TIPO DE FLUIDO :
 FECHA DE TÉRMINO :
 NÚMERO GARANTÍA EXT :



Laboratorio de Fluidos S+O+S
 Calle 30 No. 19-04
 Soledad-Atlántico,
 Tel: (5)374 88 21 – PBX 336 12 00 Ext. 5311
 www.relianzcat.com

# CONTROL LABORATORIO	FECHA MUESTREO	FECHA PROCESO	HOROMETRO	HORAS ACEITE	¿CAMBIO ACEITE?	RELLENO	UNIDADES DEL RELLENO	¿CAMBIO FILTRO?
R460-48327-1208	21-Nov-2018	23-Nov-2018	13480 HR		SI	7	GAL	
Critico	SODIO SIGUE ALTO, HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO ELEVADOS. SE DETECTO CRITICA CONTAMINACION CON AGUA (>80%), DISMINUYENDO DRASTICAMENTE LA VISCOSIDAD. MUESTRA RECIBIDA AL TIEMPO CON LA SIGUIENTE:							
R460-48083-1801	24-Mar-2018	24-Mar-2018	13480 HR		SI	7	GAL	
Critico	DESCONOCIENDO EL PERIODO DE SERVICIO DEL LUBRICANTE EN USO. SODIO ALTO, COBRE, HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO ELEVADOS, LOS DEMAS ELEMENTOS ACEPTABLES. SE OBSERVA CRITICA CONTAMINACION CON AGUA (1.5%). REALICE EVALUACION TECNICA PARA LOCALIZAR EL ORIGEN DE LA ENTRADA DE AGUA/REFRIGERANTE Y TIERRA QUE PUEDE ESTAR GENERANDO DESGASTE ABRASIVO/CORROSIVO, TOMAR LOS CORRECTIVOS NECESARIOS Y VUELVA A TOMAR OTRA MUESTRA PARA SEGUIMIENTO.							

Elementos de desgaste (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
R460-48327-1208	12	55	2	14	1	0	43	180	19	13	0	0	302	231	542	414
R460-48083-1801	14	58	1	15	0	0	43	101	6	20	0	0	150	498	779	628

Condición de aceite / Conteo Partículas	ST	OX	NT	SUL	W	A	F	PFC	V100
R460-48327-1208	16	23	7	25	N	N	E	>60	38
R460-48083-1801	20	21	9	17	E		N		

Ag = Plata, Al = Aluminio, B = Boro, Ca = Calcio, Cr = Cromo, Cu = Cobre, Fe = Hierro, P = Fósforo, K = Potasio, Mg = Magnesio, Mo = Molibdeno, Na = Sodio, Ni = Níquel, Pb = Plomo, Si = Silicio, Sn = Estaño, Ti = Titanio, Zn = Zinc, V = Vanadio, Mn = Manganeso, B = Bario, A = Anticongelante, F = Combustible, W = Agua, P = Positivo, N = Negativo, E = Excesivo, NIT = Nitración, OXI = Oxidación, ST = Hollin, SUL = Sulfatación, ISO = Nivel de limpieza
 PQI = Índice de Quantificador de Partículas, NaV = Agua salada, FL P = Punto ácido, TAN = Número Total Ácido, TBN = Número Total Básico, HCO = Ksat Fisher, V100 = Viscosidad a 100C, V40 = Viscosidad a 40C, VI = Índice de Viscosidad

Nota: El propósito de este análisis es únicamente para detectar desgastes mecánicos. No debe entenderse como garantía expresa o implícita de que no ocurra una falla del equipo o alguno de sus componentes.

ANEXO M

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO. REPLICA 1

Angie Cuervos

CLIENTE : ANGE CUERVO

ORDEN DE TRABAJO :

NÚMERO DE EQUIPO : HUC037

SERIE COMPONENTE :

COMPONENTE : MOTOR

MODELO DEL COMP. :

NÚMERO DE SERIE : HUC037

FABRICANTE DEL COMP. :

MARCA : CHEVROLET

CONTROL LAB : 9

FAX:

MODELO : 2015

MARCA/GRADO ACEITE : MOBIL15W-40

FONO:

LUGAR DE TRABAJO : BOGOTÁ

TIPO DE FLUIDO :

TIPO DE MUESTRA : ACBTE

NÚMERO DE GARANTÍA

FECHA DE TÉRMINO

EXTENDIDA :

NÚMERO GARANTÍA EXT :



Laboratorio de Fluidos S•O•S
Calle 30 No. 19-04
Soledad-Atlántico,
Tel: (5)374 88 21 – PBX 336 12 00 Ext. 5311
www.relianzcat.com

# CONTROL LABORATORIO	FECHA MUESTRO	FECHA PROCESO	HORÓMETRO	HORAS ACEITE	¿CAMBIO ACEITE?	RELLENO	UNIDADES DEL RELLENO	¿CAMBIO FILTRO?
R460-48340-1409	27-Nov-2018	06-Dic-2018	13480 HR		SI	7	GAL	

Crítico: SODIO ALTO, HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO TAMBIENE ATENCION EN ESTA PRIMERA MUESTRA. SE DETECTO CRITICA CONTAMINACION POR COMBUSTIBLE (H60%) Y VISCOSIDAD MUY BAJA PARA UN ACEITE 15W-40. REALICE EVALUACION TECNICA PARA LOCALIZAR EL ORIGEN DE LA DILUCION, REVISE POR FUGAS EN GENERAL, TOME LOS CORRECTIVOS NECESARIOS Y VUELVA A TOMAR OTRA MUESTRA PARA SEGUIMIENTO.

Elementos de desgaste (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
R460-48340-1409	10	44	2	9	1	0	39	182	22	13	0	0	887	197	467	377

Condición de aceite / Control Partículas	ST	OXI	NT	SUL	W	A	F	PFC	V100
R460-48340-1409	15	24	7	26	T	N	E	>8.0	3.4

Ag = Plata, Al = Aluminio, B = Boro, Ca = Calcio, Cr = Cromo, Cu = Cobre, Fe = Hierro, P = Fósforo, K = Potasio, Mg = Magnesio, Mo = Molibdeno, Na = Sodio, Ni = Níquel, Pb = Plomo, Si = Silicio, Sn = Estaño, Ti = Titanio, Zn = Zinc, V = Vanadio, Mn = Manganeso, B = Bario, A = Anticongelante, F = Combustible, W = Agua, P = Positivo, N = Negativo, E = Excesivo, NT = Nitrosación, OXI = Oxidación, ST = Hollin, SUL = Sulfatación, ISO = Nivel de limpieza
 PCI = Índice de Cuantificador de Partículas, NaW = Agua salada, FL PI = Punto ácido, TBN = Número Total Básico, TBN = Número Total Básico, H2O = Karl Fisher, V100 = Viscosidad a 100C, V40 = Viscosidad a 40C, VI = Índice de Viscosidad

Nota: El propósito de este análisis es únicamente para detectar desgastes mecánicos. No debe entenderse como garantía expresa o implícita de que no ocurra una falla del equipo o alguno de sus componentes.

ANEXO N CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE ADSORCIÓN CON ILMENITA

Angie Cuervos

CLIENTE : ANGIE OJERVO
 NÚMERO DE EQUIPO : HUC035
 COMPONENTE : MOTOR
 NÚMERO DE SERIE : HUC035
 MARCA : CHEVROLET
 MODELO : 2015
 LUGAR DE TRABAJO : BOGOTÁ
 NÚMERO DE GARANTÍA EXTENDIDA :
 ORDEN DE TRABAJO :
 SERIE COMPONENTE :
 MODELO DEL COMP. :
 FABRICANTE DEL COMP. :
 # CONTROL LAB : 9
 MARCA/GRADO ACEITE : MOBIL15W-40
 TIPO DE FLUIDO :
 FECHA DE TERMINO :
 NÚMERO GARANTÍA EXT :



Laboratorio de Fluidos S•O•S
 Calle 30 No. 19-04
 Soledad-Atlántico,
 Tel: (5)374 88 21 – PBX 336 12 00 Ext. 5311
 www.relianzzcat.com

# CONTROL LABORATORIO	FECHA MUESTRO	FECHA PROCESO	HORÓMETRO	HORAS ACEITE	¿CAMBIO ACEITE?	RELLENO	UNIDADES DEL RELLENO	¿CAMBIO FILTRO?
R460-48327-1208 Crítico	21-Nov-2018	23-Nov-2018	13480 HR		SI	7	GAL	
HIERRO, ALUMINIO, SILICIO Y SODIO SIMILARES A LOS ANALISIS ANTERIORES. CONTAMINACIÓN CRÍTICA LA CONTAMINACIÓN POR COMBUSTIBLE (>80%) Y VISCOSIDAD MUY BAJA. REALICE EVALUACIÓN TÉCNICA INMEDIATA PARA LOCALIZAR EL ORIGEN DE LA DILUCIÓN, REVISE POR FUGAS EN GENERAL, TOME LOS CORRECTIVOS NECESARIOS Y VUELVA A TOMAR OTRA MUESTRA PRONTO PARA SEGUIMIENTO.								
R460-48327-1208 Crítico	21-Nov-2018	23-Nov-2018	13480 HR		SI	7	GAL	
SODIO SIGUE ALTO, HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO ELEVADOS. SE DETECTO CRÍTICA CONTAMINACIÓN CON AGUA (>80%), DISMINUYENDO DRÁSTICAMENTE LA VISCOSIDAD. MUESTRA RECIBIDA AL TIEMPO CON LA SIGUIENTE.								
R460-48083-1601 Crítico	24-Mar-2018	24-Mar-2018	13480 HR		SI	7	GAL	
DESCONOCIENDO EL PERIODO DE SERVICIO DEL LUBRICANTE EN USO. SODIO ALTO, COBRE, HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO ELEVADOS, LOS DEMÁS ELEMENTOS ACEPTABLES. SE OBSERVA CRÍTICA CONTAMINACIÓN CON AGUA (15%). REALICE EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LOCALIZAR EL ORIGEN DE LA ENTRADA DE AGUA REFRIGERANTE Y TIERRA QUE PUEDE ESTAR GENERANDO DESGASTE ABRASIVO/CORROSIVO, TOME LOS CORRECTIVOS NECESARIOS Y VUELVA A TOMAR OTRA MUESTRA PARA SEGUIMIENTO.								

Elementos de desgaste (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
R460-48327-1208	12	51	2	13	0	0	37	120	10	13	0	0	758	180	419	386
R460-48327-1208	12	55	2	14	1	0	40	180	19	13	0	0	802	231	542	414
R460-48083-1601	14	58	1	15	0	0	40	101	6	20	0	0	1100	499	779	608

Condición de aceite / Control Partículas	ST	OK	NT	SUL	W	A	F	PFC	V100
R460-48327-1208	15	24	7	25	N	N	E	>8.0	4.5
R460-48327-1208	16	23	7	25	N	N	E	>8.0	3.8
R460-48083-1601	20	21	9	17	E		N		

Ag = Plata, Al = Aluminio, B = Boro, Ca = Calcio, Cr = Cromo, Cu = Cobre, Fe = Hierro, P = Fósforo, K = Potasio, Mg = Magnesio, Mo = Molibdeno, Na = Sodio, Ni = Níquel, Pb = Plomo, Si = Silicio, Sn = Estaño, Ti = Titanio, Zn = Zinc, V = Vanadio, Mn = Manganeso, S = Sulfuro, A = Anticongelante, F = Combustible, W = Agua, P = Positivo, N = Negativo, E = Excesivo, NT = Nitración, OK = Oxidación, ST = Hollin, SUL = Sulfatación, ISO = Nivel de limpieza, PFI = Índice de Quantificador de Partículas, NaV = Agua salada, FL PFI = Punto algado, TAN = Número Total Acido, TBN = Número Total Básico, HDZ = Karl Fisher, V100 = Viscosidad a 100C, V40 = Viscosidad a 40C, V1 = Índice de Viscosidad.

Nota: El propósito de este análisis es únicamente para detectar desgastes mecánicos. No debe entenderse como garantía expresa o implícita de que no ocurra una falla del equipo o alguno de sus componentes.

ANEXO O

CARACTERIZACIÓN DE ACEITE USADO CON TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE ADSORCIÓN CON ILMENITA. REPLICA 1

Angie Cuervos

CLIENTE : ANGE CUERVO
 NÚMERO DE EQUIPO : HUC036
 COMPONENTE : MOTOR
 NÚMERO DE SERIE : HUC036
 MARCA : CHEVROLET
 MODELO : 2015
 LUGAR DE TRABAJO : BOGOTÁ
 NÚMERO DE GARANTÍA EXTENDIDA :

ORDEN DE TRABAJO :
 SERIE COMPONENTE :
 MODELO DEL COMP. :
 FABRICANTE DEL COMP. :
 # CONTROL LAB : B
 MARCA/GRADO ACEITE : MOBIL15W-40
 TIPO DE FLUIDO :
 FECHA DE TERMINO :
 NÚMERO GARANTÍA EXT :



Laboratorio de Fluidos S•O•S
 Calle 30 No. 19-04
 Soledad-Atlántico,
 Tel: (5)374 88 21 – PBX 336 12 00 Ext. 5311
 www.relianzcat.com

# CONTROL LABORATORIO	FECHA MUESTRO	FECHA PROCESO	HORÓMETRO	HORAS ACEITE	¿CAMBIO ACEITE?	RELLENO	UNIDADES DEL RELLENO	¿CAMBIO FILTRO?
R460-48340-1408	27-Nov-2018	06-Dic-2018	13480 HR	13480 HR	SI	7	GAL	

Crítico: SODIO ALTO, HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO TAMBIENE ATENCION EN ESTA PRIMERA MUESTRA. SE DETECTO CRITICA CONTAMINACION POR COMBUSTIBLE (H60%) Y VISCOSIDAD MUY BAJA PARA UN ACEITE 15W-40. REALICE EVALUACION TECNICA PARA LOCALIZAR EL ORIGEN DE LA DILUCION, REVISE POR FUGAS EN GENERAL, TOME LOS CORRECTIVOS NECESARIOS Y VUELVA A TOMAR OTRA MUESTRA PARA SEGUIMIENTO.

Elementos de desgaste (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mg	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
R460-48340-1408	11	48	2	11	1	0	32	125	9	13	0	0	80.4	188	365	386

Condición de aceite / Control Partículas	ST	OXI	NT	SUL	W	A	F	PFC	V100
R460-48340-1408	16	27	7	27	N	N	E	>8.0	4.8

Ag = Plata, Al = Aluminio, B = Boro, Ca = Calcio, Cr = Cromo, Cu = Cobre, Fe = Hierro, P = Fósforo, K = Potasio, Mg = Magnesio, Mo = Molibdeno, Na = Sodio, Ni = Níquel, Pb = Plomo, Si = Silicio, Sn = Estaño, Ti = Titanio,
 Zn = Zinc, V = Vanadio, Mn = Manganeso, B = Bario, A = Anticongelante, F = Combustible, W = Agua, P = Positivo, N = Negativo, E = Excesivo, NT = Nitrosación, OXI = Oxidación, ST = Hollin, SUL = Sulfatación, ISO = Nivel de limpieza
 PCI = Índice de Cuantificador de Partículas, NaW = Agua salada, FL PI = Punto ácido, TBN = Número Total Ácido, TBN = Número Total Básico, H2O = Karl Fisher, V100 = Viscosidad a 100C, V40 = Viscosidad a 40C, VI = Índice de Viscosidad

Nota: El propósito de este análisis es únicamente para detectar desgastes mecánicos. No debe entenderse como garantía expresa o implícita de que no ocurra una falla del equipo o alguno de sus componentes.

ANEXO P PROTOCOLO PARA DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

 Tecnoparque Bogotá	Línea de biotecnología y nanotecnología	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 1 3
	Formato de planeación laboratorio	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

Nombre del Proyecto: QUIMITRATAMIENTOS	Código: BN18-018
--	------------------

Nombre de la práctica: Determinación de Densidad (masa por volumen convencional)
--

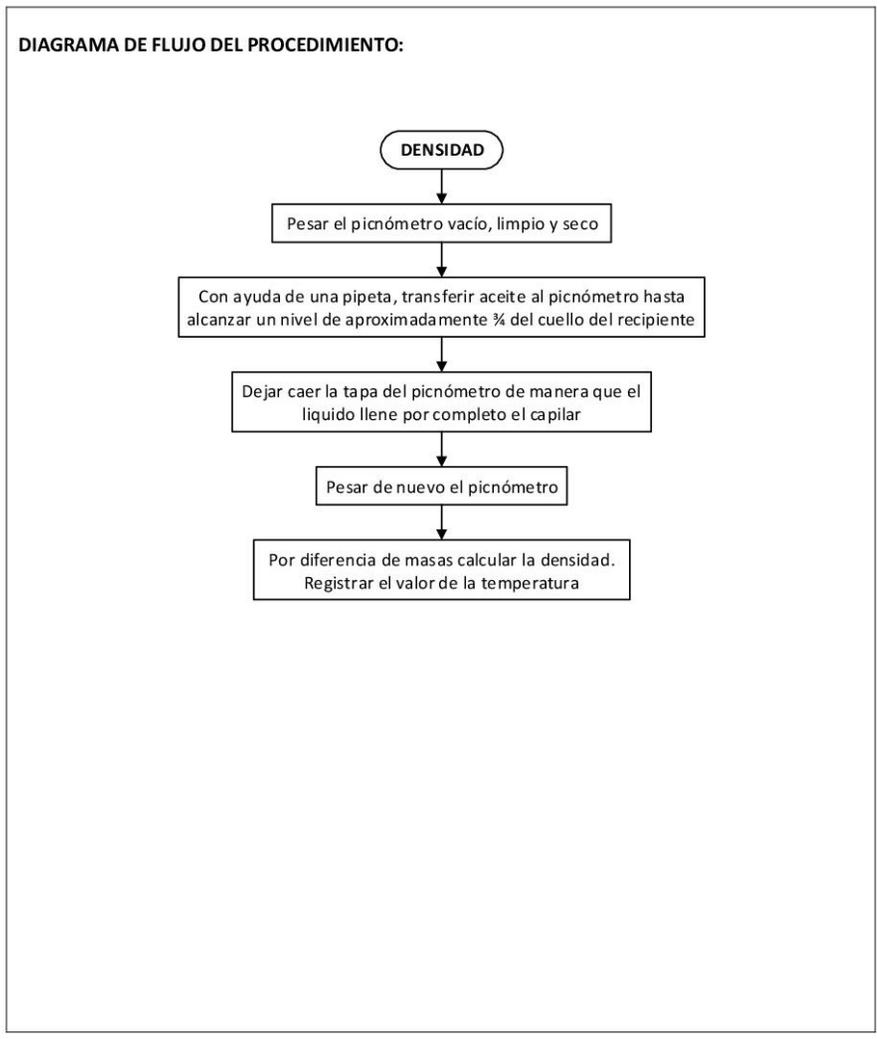
Objetivo: <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la densidad de la muestra de aceite lubricante de motor diésel.

Principio del Método: Para calcular la densidad se hace uso de la siguiente ecuación: $\rho = \frac{m_2 - m_1}{v}$ Donde: <ul style="list-style-type: none"> m_1: Masa del picnómetro vacío (g) m_2: Masa del picnómetro lleno (g) v: Volumen del picnómetro (ml) ρ: Densidad (g/ml)

Elaborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

	Línea de biotecnología y nanotecnología	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 2 3
	Formato de planeación laboratorio	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO



Elaborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

	Línea de biotecnología y nanotecnología	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 1 3
	Formato de planeación laboratorio	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

Reactivos

- FICHAS DE SEGURIDAD**
- Gorro
 - Guantes
 - Tapabocas
 - Zapatos Cerrados
 - Bata

Equipos

- Picnómetro Jaulmes

Documentos de Referencias

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Low-Temperature Viscosity of Automatic Transmission Fluids, Hydraulic Fluids, and Lubricants using a Rotational Viscometer. ASTM D2983. Estados Unidos: ASTM, 2017. 18 p.

Firma del Asesor y Fecha:
Vo.Bo. protocolo, metodología o procedimientos:

Elaborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

ANEXO Q

PROTOCOLO PARA DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD

 Tecnoparque Bogotá	Línea de biotecnología y nanotecnología	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 1 3
	Formato de planeación laboratorio	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

Nombre del Proyecto: QUIMITRATAMIENTOS	Código: BN18-018
---	-------------------------

Nombre de la práctica: Determinación de Viscosidad por medio de viscosímetro rotacional
--

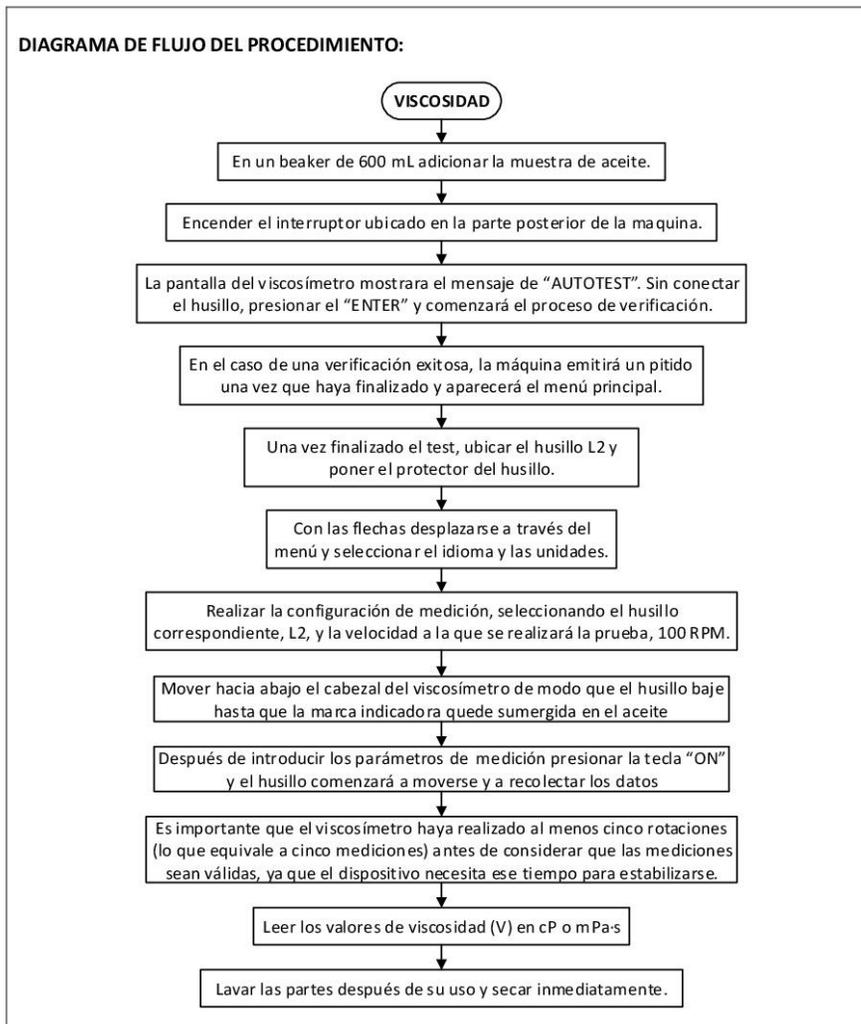
Objetivo: <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la viscosidad de la muestra de aceite lubricante de motor diésel.

<p>Principio del Método:</p> <p>Muchos productos derivados del petróleo, y algunos materiales no derivados del petróleo, se utilizan como lubricantes, y el funcionamiento correcto del equipo depende de la viscosidad apropiada del líquido que se utiliza. Además, la viscosidad de muchos combustibles derivados del petróleo es importante para la estimación del almacenamiento óptimo, manejo y condiciones operacionales. Por lo tanto, la determinación precisa de la viscosidad es esencial para muchas especificaciones del producto.</p> <p>Este método de prueba cubre el uso de viscosímetros rotacionales con un rango de torsión apropiado y un husillo específico para la determinación de la viscosidad a baja velocidad de corte de los fluidos de transmisión automática, aceites para engranajes, fluidos hidráulicos y algunos lubricantes.</p> <p>Mediante el uso del viscosímetro rotacional se puede determinar la viscosidad cinemática de un fluido.</p> <p>Para calcular la viscosidad dinámica, η, a partir de la viscosidad cinemática obtenida, ν, y la densidad, ρ, se hace uso de la siguiente ecuación:</p> $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ <p>Donde:</p> <p>ν: Viscosidad cinemática (cSt)</p> <p>μ: Viscosidad dinámica (cP)</p> <p>ρ: Densidad ($\frac{g}{ml}$)</p>
--

Elaborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

	Línea de biotecnología y nanotecnología	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 2 3
	Formato de planeación laboratorio	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO



Elaborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

	Línea de biotecnología y nanotecnología	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 1 3
	Formato de planeación laboratorio	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

Reactivos

- FICHAS DE SEGURIDAD**
- Gorro
 - Guantes
 - Tapabocas
 - Zapatos Cerrados
 - Bata

Equipos

- Viscosímetro rotacional

Documentos de Referencias

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Low-Temperature Viscosity of Automatic Transmission Fluids, Hydraulic Fluids, and Lubricants using a Rotational Viscometer. ASTM D2983. Estados Unidos: ASTM, 2017. 18 p.

Firma del Asesor y Fecha:
Vo.Bo. protocolo, metodología o procedimientos:

Elaborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

ANEXO R PROTOCOLO PARA DETERMINACIÓN DE pH

 Tecnoparque Bogotá	LINEA DE BIOTECNOLOGÍA Y NANOTECNOLOGÍA	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 1 4
	FORMATO PLANEACIÓN LABORATORIO	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

Nombre del Proyecto: QUIMITRATAMIENTOS	Código: BN18-018
---	-------------------------

Nombre de la práctica: Método de prueba estándar para pH inicial (i-pH) de productos derivados del petróleo.

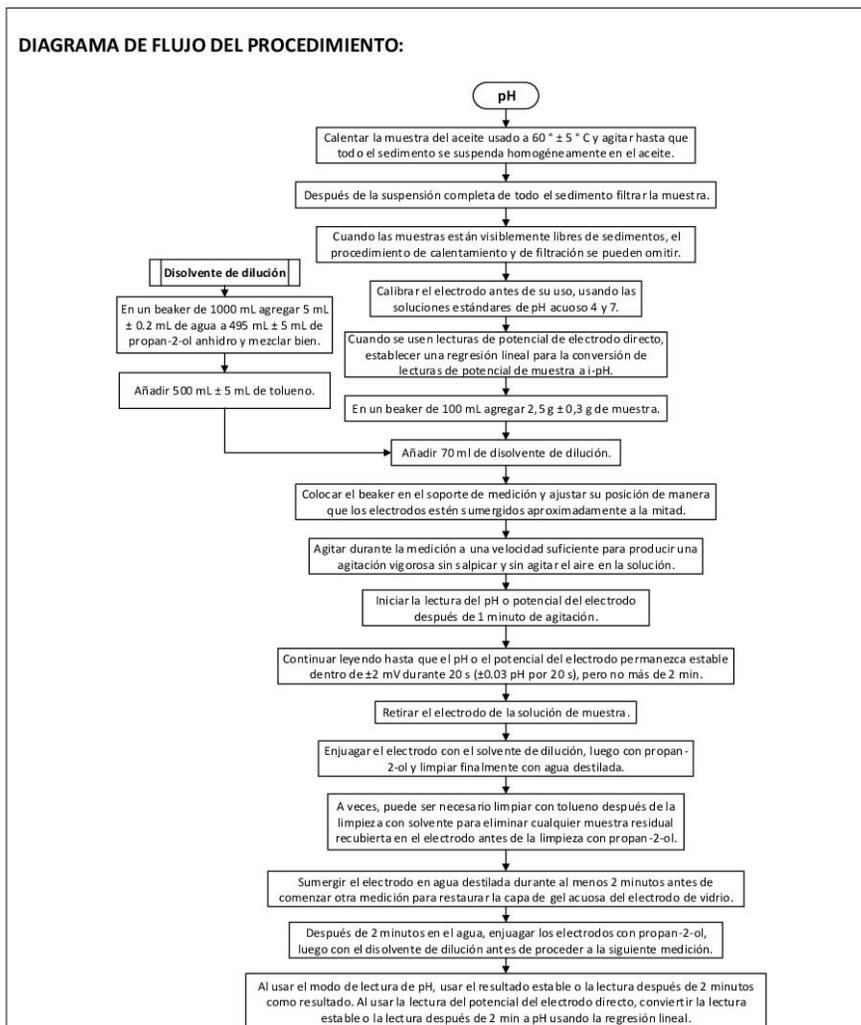
Objetivo: <ul style="list-style-type: none"> • Determinar el pH de la muestra de aceite lubricante de motor diésel.

<p>Principio del Método:</p> <p>Los productos de petróleo nuevos y usados pueden contener constituyentes ácidos que están presentes como aditivos, productos de degradación formados durante el servicio, tales como productos de oxidación o componentes formados por gases de combustión. El valor de i-pH es una medida de la cantidad de sustancias ácidas y su acidez definida en las condiciones de prueba. El valor de i-pH se usa como una medida de la degradación del lubricante en servicio.</p> <p>La corrosividad de los componentes ácidos depende de su concentración y acidez. El valor de i-pH es una medida de la cantidad de componentes ácidos disociados con el potencial de corrosión hacia los metales. Dado que una variedad de productos de oxidación y soplado contribuyen al valor de i-pH, este método de prueba no puede usarse para predecir la corrosividad del aceite o mezclas en condiciones de servicio contra componentes metálicos. No se conoce ninguna correlación general entre el valor de i-pH y la tendencia corrosiva de las mezclas o aceites hacia los metales.</p> <p>pH inicial (i-pH), es la medida de la concentración de ion hidrógeno (H+) cuando una cantidad fija de muestra de aceite de lubricación se disuelve en un volumen fijo de disolvente. El i-pH medido se denomina inicial, ya que la definición original de la escala de pH depende de soluciones acuosas. Su aplicación a soluciones orgánicas no proporcionará un potencial de electrodo estable para todos los tipos de muestras. En su lugar, se usa una lectura potencial después de un tiempo definido.</p> <p>Este método expresa la cantidad de componentes ácidos disociados como i-pH de una muestra en una mezcla de tolueno y propan-2-ol a la que se ha agregado una pequeña cantidad de agua. La muestra de aceite se disuelve en una mezcla de disolventes y el valor de i-pH se mide usando un electrodo indicador de vidrio y un electrodo de referencia o un electrodo de combinación. Las lecturas del medidor se miden de forma manual o automática.</p>
--

laborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

	LÍNEA DE BIOTECNOLOGÍA Y NANOTECNOLOGÍA	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01	Página 2 4
	FORMATO PLANEACIÓN LABORATORIO	Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Versión 1

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO



laborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015

	LÍNEA DE BIOTECNOLOGÍA Y NANOTECNOLOGÍA	Código: F-O-BIO-10 Rev: 01 Fecha: Marzo de 2015 Vigencia: Febrero 2017	Página 3 4
	FORMATO PLANEACIÓN LABORATORIO		Versión 1

Reactivos

- Agua destilada
- Etanol
- Propan-2-ol, anhidro
- Tolueno
- Soluciones acuosas comerciales de pH 4 y pH 7

FICHAS DE SEGURIDAD

- Gorro
- Guantes
- Tapabocas
- Zapatos Cerrados
- Bata

Materiales

- Beaker de 1000 mL
- Beaker de 100 mL
- Probeta de 100 mL
- Probeta de 500 mL
- Pipeta de 2 mL

Equipos

- pH-metro
- Agitador magnético o mecánico

Documentos de Referencias

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Initial pH (i-pH)-Value of Petroleum Products. ASTM D7946-14. Estados Unidos: ASTM, 2014. 5 p.

Firma del Asesor y Fecha:
Vo.Bo. protocolo, metodología o procedimientos:

laborado por: Diego Fajardo	Revisado por: Ahudrey Leal	Aprobado por: María Cantillo
Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015	Fecha: 12 de Marzo de 2015