

Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje

Physical-chemical characterization of spent engine oils for its recycling

Waldyr Fong Silva¹, Edgar Quiñonez Bolaños², Candelaria Tejada Tovar³.

¹ Magister en física, docente Universidad de Cartagena, Facultad de ciencias, programa de Metrología, grupo GIMA, Cartagena-Colombia.

² Doctor en Ingeniería ambiental, docente Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, grupo GIMA, Cartagena-Colombia.

³ Magister en Ingeniería ambiental, Magister en Educación, docente Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Química, grupo IDAB, Cartagena-Colombia. (ctejadat@unicartagena.edu.co)

Recibido 24/06/2016
Aceptado 1/06/2017

Cite this article as: W. Fong, E. Quiñonez, C. Tejada, "Physical-chemical characterization of spent engine oils for its recycling", *Prospectiva*, Vol 15, N° 2, 135-144, 2017.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la caracterización físico-química de aceites usados de motor de una muestra de empresas del sector industrial de Mamonal de la ciudad de Cartagena de Indias. Entre las características tenidas en cuenta estuvieron: densidad, porcentaje de humedad, viscosidad, metales en suspensión y poder calorífico superior. Algunos de los métodos utilizados fueron: densimetría, Karl fischer, viscosimetría y absorción atómica. Se resalta que en las muestras analizadas no se reporta presencia significativa de estaño, plomo, cromo, plata y cadmio. La presencia de calcio, magnesio, sodio, zinc, fósforo puede ser producto de los aditivos que se emplean para mejorar sus características. La presencia de Cromo y Hierro en las muestras se interpreta como indicio de desgaste de piezas. El silicio encontrado puede ser aportado por filtración de polvo. Acorde con lo anterior y un adecuado tratamiento estos aceites son susceptibles de reciclar.

Palabras clave: Aceites de motor; Residuos líquidos tóxicos; Absorción atómica.

ABSTRACT

This paper presents the physical-chemical evaluation of used engine oils from samples taken from industries that are located in Mamonal industrial sector in Cartagena de Indias. Among the characteristics taken into consideration it can be found: density, humidity percentage, viscosity, metals in suspension and high calorific value; some of the used methods were: densimetry, Karl fischer, viscosimetry, and atomic absorption. It can be highlighted that the analyzed samples didn't report significant presence of tin, lead, chromium, silver and cadmium. The presence of calcium, magnesium, sodium, zinc and phosphorus can be due to additives added in order to improve their characteristics. The presence of chromium and iron in the samples is interpreted as a sign of wear in the parts. The presence of silicon can be provided by dust filtration. According to the above and proper treatment such oils are susceptible to recycle.

Key words: Engine oils; Toxic liquid residues; Atomic absorption.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceites residuales de motores son un material altamente contaminante, que requiere una gestión responsable; éstos pueden causar daños al medioambiente cuando se vierten en el suelo o en las corrientes de agua incluyendo alcantarillas. Esto puede resultar en la contaminación de las aguas subterráneas y del suelo. El aceite lubricante usado contiene diversos compuestos químicos tales como metales pesados, (por ejemplo, cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros), hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados, PCBs, etc. Estos compuestos químicos producen un efecto directo sobre la salud humana y varios de estos productos son cancerígenos [1].

Disponer el aceite lubricante usado y materiales contaminados en los rellenos sanitarios o en los botaderos a cielo abierto, no es una solución adecuada. Indudablemente, el aceite se convierte en parte del lixiviado y termina en las aguas subterráneas, haciendo que ésta no sea apta para el consumo humano. La contaminación del agua superficial o del suelo no solamente es perjudicial para el hombre, sino para todas las demás formas de vida, puesto que la presencia del aceite altera los procesos de intercambio en los ecosistemas. El aceite lubricante usado que se quema bajo condiciones no controladas puede emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente industrial, según estudios desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental – EPA [2].

En un amplio estudio realizado por la EPA sobre las alternativas de reglamentación del aceite lubricante usado, se afirmó que más de 3.000 tipos de cáncer serían el resultado de la absorción de Cromo y sus compuestos durante la quema que se realiza al usarlo como combustible sin previo tratamiento. La quema de aceite lubricante usado contaminado con PCBs, bajo condiciones no controladas y a temperaturas insuficientes, puede generar emisiones de dioxinas y furanos que se consideran cancerígenas. Lo mismo sucede con los PAHs que se generan en todos los motores de combustión interna. También se debe tener mucho cuidado con el manejo de los aceites residuales, puesto que muchos de los químicos concentrados pueden penetrar los tejidos humanos y dar origen a diversos tipos de cáncer y otras enfermedades [2].

Una preocupación universal es el suministro de agua; los aceites lubricantes usados penetran el suelo y automáticamente contaminan las aguas superficiales y subterráneas. Cuando se eliminan en los sistemas de alcantarillado de las ciudades, terminan en las plantas de tratamiento de aguas residuales pero actualmente, debido a que de estas plantas existen muy pocas en Colombia, la gran mayoría de estos aceites terminan en el ambiente y en las aguas superficiales.

En Colombia, se ha reglamentado mediante leyes y decretos, la disposición final de residuos tóxicos y peligrosos como se especifica en la Ley 253 de 1996, ley 1252 d 2008, decreto 283 de 1990, decreto 4741 de 2005, entre otros. Los aceites usados hacen parte de estos residuos, lo que ha permitido que las empresas definan políticas de disposición enmarcadas en la legislación colombiana. Por todo esto, la preservación del medioambiente es fundamental y debe integrarse articuladamente a cada una de estas políticas [3- 4- 5- 6].

En diferentes países ya existen entidades dedicadas a sensibilizar a la comunidad con el objeto de proteger el medio ambiente de este tipo de desechos, en los Estados Unidos por ejemplo, San Diego Regional Household Hazardous Waste Partnership (Asociación Regional de Desechos Domésticos Peligrosos de San Diego), es la encargada de esta tarea, para lo cual suministra cartillas pedagógicas guías que contienen aspectos como lo que es un desecho doméstico peligroso, manejo seguro de los mismos entre otros, con el objeto que la comunidad se entere de cómo efectuar la disposición final de este tipo de residuos [7].

El estudio denominado “Desechos Peligrosos y Salud en América Latina y el Caribe”, Serie Ambiental No 14, OPS, el cual se complementó con datos recopilados por expertos exclusivamente contratados en ocho países, Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, México, Perú, Trinidad y Tobago y Venezuela, hace un análisis del manejo de los residuos peligrosos en América Latina y su repercusión en la salud de las personas y sobretodo de aquellas que intervienen en su manipulación [8].

Los aceites usados poseen aún grandes cantidades de energía interna que puede ser aprovechada en algunos casos por las grandes cementeras que los emplean como aceites combustibles, en otros casos, se recicla la base lubricante eliminando sedimentos, partículas y agua con el objeto de re-procesarlos para generar un nuevo lubricante. Algunos autores proponen técnicas de recuperación y de refinado de aceites usados, el reciclado químico de plásticos y aceites lubricantes usados mediante catalizadores zeolíticos [9-10].

En cuanto a alternativas de aprovechamiento de aceites usados de motores, se resalta la reutilización siempre y cuando sus características lo permitan. Esta reutilización se inicia con un pretratamiento que incluye remoción de contaminantes, insolubles, agua, sedimentos y productos de oxidación, mediante el empleo de diferentes procesos físico-químicos como el calentamiento del mismo, la filtración, deshidratación y centrifugación. La regeneración mediante distintos tratamientos es posible, recuperando el material lubricante base presente en el aceite original, de manera que pueda ser reprocesado para su utilización. Casi

todos los aceites usados son regenerables, aunque en la práctica el proceso y el costo del mismo hacen poco viable esta alternativa [11].

Algunos investigadores han estudiado la combustión y emisión de las mezclas de aceite de motor reciclado-diesel en un motor diesel. El aceite reciclado se preparó en dos etapas. Primero se trató el aceite de motor residual y se mezcló con diesel en varias proporciones, se midieron propiedades como punto de inflamación, viscosidad cinemática, valor calorífico, número de cetano, número, punto de nubosidad, punto de vaciado y densidad según las Normas (ASTM). Las mezclas se probaron en un motor diesel y los resultados indican un aumento de la eficiencia térmica del freno, la temperatura del gas en comparación con la del gasóleo. También hay una disminución de los frenos específicos, el consumo de combustible y las emisiones de NOx. [12].

Otra alternativa de aprovechamiento consiste en la conversión de aceite usado de motor en un producto químico fino; para uso como dispersante para la suspensión de carbón-agua, sus propiedades fueron comparadas por análisis FTIR, RMN, y análisis de comportamiento térmico, encontrando que el producto fino resultante presentó buenas propiedades de dispersión y estabilización [13].

Otra forma de aprovechamiento se presenta mediante el uso de la catálisis homogénea asistida con irradiación ultrasónica, la cual permite la conversión del aceite usado a biodiesel; se presenta como una opción muy favorecedora ya que se logra que la conversión, la acidez y la viscosidad del Biodiesel obtenido llegue a valores permitidos dentro de la norma ASTM D445 en la mitad del tiempo que con la catálisis convencional. [14]. De igual forma la valorización energética del aceite usado al mezclarse con fuel-oil para combustión directa

en hornos de cemento o en calderas industriales pequeñas, se presenta como alternativa de aprovechamiento; por su alto poder calorífico se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible en calderas domésticas, industriales y comerciales de baja potencia. Esta práctica, sin embargo, no es recomendable debido a la gran problemática ambiental que generan al contaminar el aire y cuerpos de agua. Para el uso en hornos con menor potencia térmica, se emplean procesos químicos de separación de elementos volátiles y de metales pesados y procesos físicos para separar materiales sólidos, en suspensión así como también agua y sedimentos lo que se hace normalmente por destilación o por tratamiento con aditivos floculantes, sedimentación, centrifugación y filtración.

El reuso como alternativa de aprovechamiento, se inicia con un pre-tratamiento que dependerá de sus características acorde con la clase de desecho y la fuente de donde provenga tal como se muestra en la Tabla 1; el cual consiste en eliminar burdamente una gran parte de los contaminantes presentes en el mismo, como lo son el agua, partículas gruesas, lodos, polvos, hidrocarburos ligeros, entre otros. Lo conforman varios procesos entre los que se destacan: filtración, decantación, centrifugación, deshidratación, calefacción, tratamiento térmico, destilación atmosférica, desasfaltado, desmetalización, tratamiento químico, entre otros procesos. El proceso de reciclaje ha mostrado la posibilidad de obtener aceites de buena calidad a partir de aceites usados de motor. En esta investigación se mostró que el costo es relativamente bajo en comparación con su producción a partir de petróleo crudo. Además, los subproductos del proceso pueden ser convertidos en productos finales valiosos para otros procesos de fabricación. Los rendimientos de estas transformaciones podrían cubrir el costo de la compra de los químicos necesarios para mantener la planta de reciclaje y, por tanto, que el proceso sea potencialmente rentable [11].

Tabla 1. Clasificación de aceites usados y sus fuentes.
Table 1. Classification of spent engine oil and their source.

Clases de desecho	Características	Probable fuente
Residuo acuoso	Agua residual que contiene aceite y residuos mayormente contaminados	Instalaciones de refinерías y petroquímica, instalaciones de almacenamiento de aceites, vehículos o lavaderos de autos
Aceite usado de motor	Contiene contaminantes volátiles (agua y combustible), solubles (aditivos de aceite), insolubles (partículas de carbono), óxidos de metales incluyendo óxido de plomo junto con una gran cantidad de otras trazas metálicas, y detergentes.	Garajes, empresas de transporte comercial, estaciones de servicio, sitios industriales
Emulsión de aceite usado	Aceite de corte soluble en agua, desechos que contienen aceites minerales dispersos en agua, emulsionantes de tipo jabonoso, aditivos de aceites lubricantes y otros aceites contaminantes	Industrias que trabajan con metales, tiendas de máquinas, actividades de ingeniería de producción industrial
Mezclas de aceite no emulsionado	Residuos de aceite mineral que contiene aceite entre 10%-10%, agua, materiales lubricantes oxidados, partículas de sedimentos metálicos	Industrias que trabajan con metales, sectores energéticos, industrias manufactureras.

Fuente: [11]

En Cartagena de Indias, no existen hasta el momento datos precisos de la cantidad de fuentes generadoras de aceites lubricantes usados; según datos suministrados por las servitecas, pueden ser aproximadamente 80 en la ciudad. En la actualidad existen en la ciudad dos (2) empresas de carácter privado, encargadas de la recolección y disposición final de los residuos peligrosos generados en la ciudad, las cuales se encargan de la recolección, transporte e incineración de los mismos en hornos especiales. Actualmente, en la ciudad de Cartagena no se cuenta con datos precisos referente a la cantidad de aceite lubricante usado que se genera. Según lo anterior, se maneja en la ciudad una gran cantidad de residuos peligrosos y en especial de aceite lubricante usado, lo que se convierte en una oportunidad de negocio con posibilidades de explotación y de recuperación de este tipo de desechos. Un proyecto productivo que apunte al reciclaje de este tipo de aceites generaría en la ciudad, empleo y aportaría una solución a la problemática ambiental.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

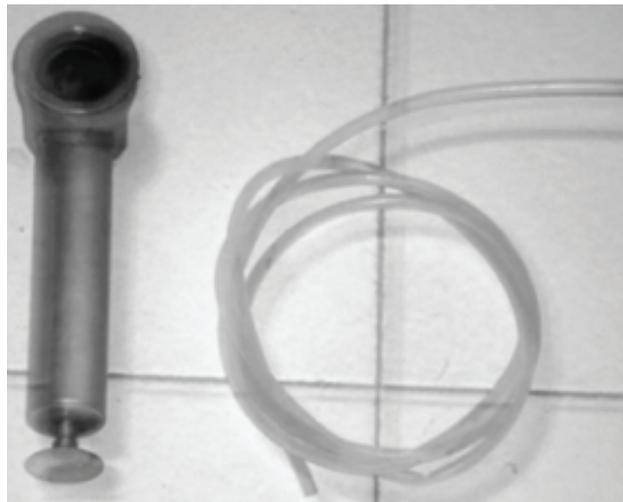
2.1. Método de Muestreo

Se empleó el método de pistola de vacío con la cual se extrajeron muestras de aceite de motor representativas. El proceso consistió en introducir un tubo plástico nuevo, limpio y flexible con una longitud suficiente para conectar la pistola al reservorio o cárter del equipo por vacío (creado por la pistola) para extraer la muestra, la cual fue etiquetada según el motor, equipo, horas de funcionamiento y fecha de obtención.

Las muestras de aceite que se tomaron fueron de 60 cm³ cada una, correspondiente a la capacidad de los recipientes plásticos receptores de muestras. Se empleó el Método de pistola de vacío con la cual se extrajeron muestras de aceite de motor representativas de forma rápida y con poco esfuerzo. El proceso consistió en introducir un tubo plástico nuevo, limpio y flexible con una longitud suficiente para conectar la pistola al reservorio o cárter del equipo y por vacío (creado por la pistola) extraer la muestra, la cual fue etiquetada según el motor, equipo, horas de funcionamiento y fecha de obtención. Para su recolección se empleó el Kit de servicio para toma de muestras de aceite proveídos por la empresa Gecolsa S.A, distribuidores autorizados de la empresa Caterpillar en Colombia. Para cada muestra fue empleado un kit completamente nuevo. Ver figura 1.

Figura 1. Kit empleado en la recolección de muestras de aceite.

Figure 1. Kit used when collecting the oil samples.



Fuente: los autores

2.2. Origen y descripción de la muestra

Las muestras #1 y #2 corresponden a aceites usados obtenidos de una volqueta doble troque y un motor-reductor; la muestras #3 y #4 corresponden a aceites usados de motor reciclados (recuperados) F-2 y Motor F-1, respectivamente. La muestra #5, corresponde a aceite combustible tipo Aceite pesado Fuel-Oil, autorizada para el manejo de este tipo de sustancias catalogadas como tóxicas y peligrosas por la ley nacional. Las muestras #6 y #7 corresponden a muestras de aceites usados provenientes de los equipos de montacargas de referencias Yale S34 y S36. La muestra #8 corresponde a una muestra de aceite nuevo, sin usar, con referencia SAE 20W50 y la #9 corresponde a una muestra de aceite usado suministrado por la empresa C.I. Petrofuels, conformada por una mezcla de aceites usados de diferentes referencias procedente de un cambiadero de aceite, ubicado en la ciudad de Cartagena (Colombia).

La metodología utilizada consistió en la caracterización fisicoquímica de las nueve muestras de aceite descritas anteriormente. Las muestras de la 1 a la 7 corresponden a aceites usados de marcas comerciales reconocidas en Colombia; la muestra 8 corresponde a aceite nuevo y la 9 corresponde a mezclas de aceites usados. Una vez tomadas, se enviaron al Laboratorio de prestación de servicios de la Universidad de Cartagena, en donde se les hizo el análisis físico-químico respectivo, haciendo uso de las técnicas siguientes: viscosimetría para determinar la viscosidad de cada muestra, el método de Kart Fisher para determinar porcentaje de humedad, densimetría para determinar la densidad de cada muestra y absorción atómica para

determinar metales, sedimentos y cenizas [15-16-17-18-19-20].

2.3. Proceso de reciclaje

La muestra de aceites usados se mezcla con ácido sulfúrico de concentración 70% en proporción de 10mL a 1mL, y luego es calentado por una hora a 60°C; luego se deja precipitar por seis horas con el fin de permitir a la materia insoluble llegara al fondo del beaker. El aceite tratado es decantado y lodo formado se retira

del beaker. Luego, el aceite tratado es contrastado con carbón activado y tratado a temperatura de 200-250°C por 2 o 3 horas. El aceite tratado es filtrado y se deja enfriar. Finalmente se procede a analizar el aceite [11].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de los aceites usados

Los resultados respecto a la caracterización de los aceites usados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de aceites usados.

Table 2. Characterization of used oils.

Propiedad	Aceites Usados								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Viscosidad (CentiStokes)	24.8	55.3	60	50.85	72.28	56.8	67.2	114.5	81.1
Humedad (%)	2.44	0.27	0.01	0.0094	0.447	1.48	1.08	0.05	0.46
Azufre (ppm)	0.85	1.14	0.16	0.12	0.65	1.21	1.12	0.47	1.29
Aluminio (ppm)	140.74	16.41	12.28	11.41	13.54	11.2	22.03	2.21	16.95
Hierro (ppm)	55.11	1521.42	3.03	4.89	227.86	148.8	110.37	2.44	121.19
Sodio (ppm)	22.31	145.85	15.52	13.48	492.07	410.07	303.87	140.67	216.81
Zinc (ppm)	937.28	104.32	7.04	6.37	17.93	901.51	1015.87	667.24	825.56
Cobre (ppm)	7.96	5.37	0.041	0.041	10.38	17.4	7.05	1.89	14.29
Silicio (ppm)	28.43	16.28	2.43	5.2	49.69	6.21	5.48	0.28	2.27
Fosforo (ppm)	10.58	24.89	5.46	4.97	24.17	19.79	1.82	1.06	18.37
Cloro (ppm)	24.43	224.11	18.95	15.8	709.45	635	469	210	330
Calcio (ppm)	251.33	1064	48.33	41.28	171.8	401.48	308.48	20.08	285.34
Sedimentos (%)	1.57	0.44	0.01	0.01	0.05	0.18	0.16	0.01	0.04
Cenizas (%)	0.98	0.22	0.008	0.007	0.186	0.932	0.916	0.216	0.709
Densidad (Kg/L)	0.8994	0.8659	0.9004	0.901	0.8663	0.9978	0.9884	0.8976	0.885

Fuente: los autores

Tabla 3. Características de los aceites nuevos.

Table 3. Characteristics of new oils.

Propiedad	Aceites nuevos					
	M10a	M10b	M11a	M11b	M12a	M12b
Viscosidad (CentiStokes)	107	368.4	139.9	197	143.04	214.1
Zinc (ppm)	-	-	0.135	0.135	-	-
Fosforo (ppm)	-	-	0.114	0.114	-	-

Calcio (ppm)	-	-	0.269	0.269	-	-
Sedimentos (%)	-	-	0.01	0.01	-	-
Cenizas (%)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.98	0.98
Densidad (Kg/L)	0.88	0.88	-	-	0.891	0.895

Fuente: suministrada por las fabricantes

3.1.1. Viscosidad

Respecto al análisis de la viscosidad de los aceites nuevos, se tiene una Media: =194,907, una Varianza: = 8783,23 y el Coeficiente de Variación: C.V= 48,084%; de la tabla 1 se puede observar que la dispersión de los datos respecto a la media es alta según lo indica la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Esto se le puede atribuir a las diferentes marcas de aceites que según la literatura, se seleccionaron para hacer las comparaciones, ya que por ejemplo el aceite M10a, es un aceite multigrado de alto rendimiento y al que se le adicionan durante su elaboración aditivos que le imparten características sobresalientes de detergencia, anti desgaste, resistencia a la corrosión entre otros, de la misma manera se le adicionan a los otros aceites (M10b, M11a, M11b, M12a y M12b) diversos tipos de aditivos que buscan mejorar características diversas según clima y condiciones de operación de los motores o equipos.

La menor viscosidad que presenta la muestra M10a (107Cst), se debe a los aditivos y condiciones operativas para las cuales se diseña el aceite. La muestra M10b, posee una mayor viscosidad (368,4Cst), debido a que se diseña para equipos de trabajo pesado con mayor tiempo de operación entre cambios y excelente funcionamiento a altas y bajas temperaturas. Las demás muestras (M11a, M11, M12a y M12b) de aceites poseen una relativa viscosidad cercana a la media calculada y puede atribuírsele su cercanía al tipo de aceite ya que son del tipo SAE 40 o 50, es decir, de viscosidades moderadamente altas.

La comparación se hace con la viscosidad de la muestra #8, la cual corresponde a un aceite nuevo SAE 20W50 y con viscosidad de 114,5 Cst. La muestra #9 está formada por una mezcla aceite de diversas marcas, calidades y condiciones operativas diferentes y proviene de un tanque recolector común en donde se depositan los aceites usados que se extraen de motores de vehículos diesel y a gasolina. La muestra de aceite #1, es la que menos viscosidad tiene con respecto a la referencia, lo que se le puede atribuir a la dilución del mismo por la combinación con combustible o con aceite más delgado nuevo o reciclado así como también debido a la humedad y algunos aditivos los cuales son los mayores diluyentes de aceite en este tipo de ve-

hículos de trabajo pesado como lo son las volquetas doble troque. La pérdida de viscosidad causará mayor desgaste de cojinetes (plomo, estaño, bronce) por falta de lubricación hidrodinámica.

La muestra #4 (SAE50), posee baja viscosidad, lo que puede atribuírsele a que proviene de un proceso de recuperación local, sin embargo su viscosidad es inferior a la referencia en un 125,2%, esto es un indicador de que los aceites usados recuperados que se venden en la ciudad de Cartagena presentan baja viscosidad, lo que puede afectar notablemente el desempeño del motor en donde se usen y sobre todo si se venden según el tipo SAE50 sin tener al menos una viscosidad mínima cercana a la de la muestra #8.

Las muestras # 2, 3, 5, 6 y 7 presentan una viscosidad inferior en el 107%, 90,8%, 58,4%, 101,6% y 70,4%, respectivamente con respecto a la muestra de referencia #8, ocasionada seguramente por algunas de las causas mencionadas anteriormente. Un coeficiente de variación del 37,7% indica una desviación estándar razonable con respecto a la media, lo cual puede atribuírse al hecho de que se cumple fielmente con la cultura de cambio de aceite según el mínimo de horas recomendado por el fabricante del motor o vehículo. El intervalo de confianza al 95% de la media nos permite asegurar que para cualquier aceite usado proveniente del sector industrial de Cartagena de Indias, su viscosidad a 40 °C, estará comprendida en el rango que se indica para la media y con una desviación estándar.

Las propiedades de los aceites usados dependen prioritariamente de las propiedades de las bases lubricantes de las cuales se derivan, de los aditivos adicionales para mejorar la viscosidad, el poder detergente y la resistencia a altas temperaturas. Además, como resultado del servicio prestado, contiene sólidos, metales y productos orgánicos. Análisis realizados por Lahcorp, así como por Lupien Rosenberg et Associes, demuestran que los aceites usados presentan como características típicas; por su parte los bifenoles policlorados, también conocidos como PCB's son los compuestos que dotan los aceites de alta resistencia a la descomposición química, biológica y térmica, con propiedades conductoras de calor y aislantes térmicos lo cual los cataloga como sustancias atractivas para uso

industrial, características que son superiores a medida que aumenta la viscosidad [21].

3.1.2. Humedad

Según los datos de la tabla 1, la muestra #1 es la que presenta mayor contenido de humedad respecto a la muestra #8 de referencia, lo que se le puede atribuir a problemas en el sistema de refrigeración del vehículo y que están afectando notablemente al sistema de lubricación, en ocasiones esto se presenta cuando el vehículo posee problemas en los conductos de refrigeración del bloque del motor y que drenan o escurren al cárter del mismo. Otra causa puede ser debido a que el tipo de aceite que emplea el vehículo provenga de aceite usado y/o nuevo acumulado en tanques o recipientes expuestos al medio ambiente. También puede provenir de la condensación del vapor de agua presente en el sistema de lubricación cuando el motor deja de funcionar. Las muestras #3 y 4, poseen un bajo contenido de humedad encontrándose inferior al 0,05%, esto seguramente se debe al proceso de reciclaje a que se somete el aceite antes de su re-embasado para ser puesto nuevamente en el mercado [21].

Los autores consideramos que la humedad presente en el aceite puede provenir de fugas de sellos del proceso de combustión o del sistema de enfriamiento lo que afecta las propiedades de lubricación formando lodos que terminan taponando los filtros de aceite. Además, ocasiona incremento en la viscosidad del aceite generando emulsiones que forman depósitos junto con la suciedad, así como herrumbre y corrosión en los circuitos o sistemas de lubricación del motor. De igual manera, puede degradar los aditivos detergentes presentes en el aceite aumentando el potencial corrosivo de los ácidos o productos que forma al combinarse con mismos. También actúa como catalizador para promover oxidación en la presencia de metales como hierro, cobre y plomo. La humedad reduce la película lubricante e interfiere con la lubricación dejando las piezas susceptibles al desgaste abrasivo, adhesivo y fatiga. En áreas de presión, las gotas de agua impresionan ocasionando picado o grietas pequeñas en la superficie en donde se encuentren.

3.1.3. Azufre

Respecto al contenido de azufre presentado en la tabla 1, se puede observar que las muestras #1,2,6,7 y 9 son las que presentan mayores valores, respecto a la muestra de referencia. Esto se le puede atribuir a que el azufre presente en el combustible cuando se quema, se combina con el agua proveniente de la humedad del sistema oxidándose y formando ácidos orgánicos, inorgánicos y compuestos de azufre. Las muestras #3 y 4 poseen un contenido de azufre inferior a la de la

referencia en un 193,8% y un 291,7%, esto puede atribuirse a que a pesar de ser aceites recuperados son sometidos a un proceso de recuperación antes de ser introducidos nuevamente en el mercado, sin embargo, el contenido de azufre presente en el aceite de referencia puede hacer parte de algún tipo de aditivo antidesgaste que por lo general reducen la fricción, el desgaste e impiden la escoriación y el estancamiento impidiendo el contacto metal-metal [22, 23].

3.1.4. Aluminio

La muestra #1, posee un gran contenido de aluminio, superior al contenido de la muestra de referencia, esto indica que este motor presenta una alta contaminación por este elemento y teniendo en cuenta lo anotado en el párrafo anterior y sabiendo que el contenido de silicio para esta muestra es de 28,43 ppm, podemos afirmar que esta muestra de aceite posee 8,5 ppm (29,9%) de aluminio proveniente de la tierra y polvo del ambiente que se filtra por el sistema de admisión de aire. El aluminio presente en las muestras de aceites pueden provenir de una falla en la estanqueidad del sistema lubricante así como también del desgaste de algunas piezas del motor, como pistones, camisas, cojinetes de empuje del cigüeñal, cojinetes intermedios de levas, bujes, carcasa, buje de bomba de aceite, bomba de aceite, pistones, volantas de empuje, buje de biela, empaquetaduras, válvulas, tornillos, o turbo-cargador si el motor es de maquinaria pesada. Adicionalmente, proviene del aire contaminado con tierra que se introduce en el motor [24].

3.1.5. Hierro

La muestra #2, es la que mayor cantidad de hierro presenta, esto puede atribuirse a su tipo de aplicación, ya que proviene de un motor reductor en donde el contacto metal-metal es bastante crítico. Su valor excede sustancialmente al de la muestra de referencia. Un aumento brusco en el contenido de hierro (Fe) en este aceite también pudo haber sido ocasionado por excesivo desgaste de las Camisas (Cilindros) en el bloque del motor. También puede estar relacionado con la corrosión (oxidación de piezas del motor) debido a periodos prolongados de parada del motor y no poseer un aceite protector adecuado que la minimice [25].

3.1.6. Sodio

Las muestras #1,3 y 4 poseen un bajo contenido de sodio con respecto a la referencia. Las muestras #2, 5, 6, 7 y 9 poseen un contenido de sodio superior al de la referencia; la presencia en mayor o menor proporción de sodio en el aceite proviene de fallas en la estanqueidad del sistema lubricante lo que ocasiona fugas del líquido refrigerante del motor, el cual proviene de los inhibidores de corrosión tales como el metaborato y el

bicromato de sodio. La entrada directa del refrigerante a la cámara de combustión genera residuos sólidos ricos en cromo y sodio los que actúan como abrasivos. La no intervención a tiempo genera pérdidas en el bruñido del cilindro, problemas de empastamiento y consecuente pegado de aros, deficiencia en la compresión, en la combustión ocasionando pérdida en la potencia del motor [26].

3.1.7. Zinc

Las muestras #1, 6, 7, 8 y 9 poseen un contenido de zinc superior a la de la muestra de referencia en un 52,3%; 40,5%; 35,1% y 23,72%; la presencia de zinc en todo aceite usado es normal debido a que son incluidos como metales de aditivación del aceite nuevo con el objeto de mejorar las características lubricantes de los aceites. Además, varía de acuerdo con la composición química del aceite nuevo y según la aplicación, es decir, si va a ser empleado en un motor diesel o a gasolina. La mayoría de los motores no tienen piezas de plata, pero en aquellos que tienen, el uso de lubricantes con zinc ocasiona corrosión de las mismas. La principal función del zinc y el fósforo (ya que trabajan en conjunto) consiste en proveer lubricación límite cuando la lubricación hidrodinámica no alcanza las necesidades de presiones y fricción. Este tipo de protección se conoce como protección anti desgaste [25].

3.1.8. Cobre

Las muestras #1, 2, 5, 6, 7 y 9 presentan un contenido de cobre superior a la de la muestra de referencia. Estos niveles pueden atribuirse al desgaste de los cojinetes de aleación cobre-plomo, casquillos de pie de biela, cojinetes de empuje del cigüeñal, volantas de empuje, guía de válvulas, núcleo del enfriador de aceite o en el caso de la muestra #2 puede proceder del embrague ya que la muestra proviene de un motoreductor [25].

3.1.9. Silicio

Todas las muestras, es decir, las muestras # 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9 presentan un contenido de silicio superior al de la muestra de referencia. Esto se le atribuye a fallas en la estanqueidad del sistema lubricante, cristalización de empaquetaduras, tierra, aditivos de aceite y de refrigerante. Este nivel alto de silicio también puede provenir de tierra o polvo que entra por el filtro o alguna parte del sistema de admisión de aire, lo que sugiere regularmente cambio del filtro de aire, arreglo o mantenimiento del sistema de admisión de aire.

3.1.10. Fósforo

Las muestras #1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9 presentan un contenido de fósforo superior a la de la muestra de refe-

rencia. El fósforo junto con el zinc se agregan al aceite para cumplir funciones antidesgaste y su concentración depende del tipo de fabricante, tipo, uso y aplicación. El bajo contenido en fósforo en la muestra de referencia puede atribuirse al tipo, uso, calidad y aditivos del aceite nuevo (varían entre 1 y 20%), sin embargo, compuestos de zinc y fósforo se colocan en lugares críticos del motor para ser gastado en lubricación límite cuando la lubricación hidrodinámica no alcanza las necesidades de presión y fricción.

Las muestras #2, 5, 6, 7 y 9 poseen un contenido de cloro superior a la referencia. El contenido de cloro presente en aceites nuevos con frecuencia posee solventes clorados, los cuales provienen del proceso de refinación del petróleo y también debido a la contaminación durante su uso (reacción del aceite con compuestos halogenados de los aditivos) o por la adición de estos solventes por parte del generador. Dentro de los solventes que principalmente figuran son tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno [26].

3.1.11. Calcio

Las muestras #1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9 presentan un contenido de calcio superior a la referencia. Las muestras # M11a y M11b poseen un contenido de calcio inferior a la referencia para ambas. La presencia de calcio puede atribuirse a los detergentes, los cuales neutralizan los ácidos presentes en el aceite ayudando a mantener el aceite limpio (libre de depósitos) y neutralizando los precursores de depósitos que se forman bajo altas temperaturas. Los principales detergentes usados en la actualidad son sales de metales alcalinotérreos como bario, calcio y magnesio, conocidos como compuestos órgano-metálicos. Adicionalmente, la presencia de calcio en los aceites se le atribuye a los aditivos que se agregan al mismo con el objeto de que reaccionen con el lodo para mantenerlo soluble. Otra función que cumple el calcio consiste en mejorar las características lubricantes del aceite. Regularmente una caída en el contenido de calcio se le atribuye al deterioro de las propiedades del mismo. Esto no se puede afirmar para las muestras 11a y 11b ya que son aceites nuevos y que seguramente su bajo contenido de calcio se le puede atribuir a la función, tipo y uso de aceite.

3.1.12. Sedimentos

Las muestras # 1, 2, 5, 6, 7 y 9 poseen un contenido de sedimentos superior a la referencia. Este contenido puede atribuirse a partículas menores de 50 micras las que no alcanzan a depositarse por gravedad y que pueden provenir del medio exterior en forma de polvo, restos de empaquetaduras, lodos, entre otros. Las muestras #3,4, 11a y 11b presentan un contenido igual a la referencia. Esto puede atribuirse a que las

muestras 3 y 4 son aceites recuperados los cuales son sometidos a separación centrífuga para eliminar la sedimentación, lo que regularmente deja al aceite usado con un nivel de sedimentación inferior al 1%.

3.1.13. Cenizas

Las muestras # 1, 2, 6, 7, 9, 10a, 10b, 11a, 11b, 12a y 12b poseen cenizas superiores a la referencia. Para estas muestras las cenizas provienen de la combustión incompleta del combustible las que se depositan principalmente en el cárter del motor, contaminando al aceite lubricante. Entre más ácido se forma debido a la baja calidad de combustible más rápido se degradan los detergentes/dispersantes del mismo. Las cenizas sulfatadas provienen de los aditivos como el magnesio el cual deja cenizas sulfatadas al quemarse. El porcentaje de cenizas es una medida de los componentes no combustibles; generalmente materiales metálicos que contiene el aceite, los cuales provienen de los aditivos los cuales poseen compuestos metalo-orgánicos. Adicionalmente provienen de contaminantes como polvo, suciedad y partículas de desgaste entre otras. Es importante resaltar que aceites minerales puros no contienen materiales que formen cenizas, lo cual es muy raro en nuestro medio.

3.1.14. Densidad

Las muestras 1, 3, 4, 6 y 7 poseen una densidad superior a la muestra de referencia. El aumento en la densidad del aceite es debido a contaminantes presentes en el aceite provenientes de polvo, tierra, agua y partículas de desgaste.

4. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica de las muestras de aceites usados provenientes del sector industrial de Mamonal son susceptibles de reciclar y se puede concluir que el deterioro de los aceites usados de motor empleados en el sector industrial de Mamonal se debe principalmente a:

La presencia de calcio, magnesio, sodio, zinc, fósforo son producto de los aditivos que se emplean para mejorar las propiedades físico-químicas de los aceites. El hierro en las muestras estudiadas representa desgaste en los cilindros, camisas, anillos de pistón, tren de válvulas y de la herrumbre.

La cantidad de cromo identificada se debe al desgaste de los anillos del pistón y de los refrigerantes empleados. La presencia de aluminio se debe al desgaste de los pistones del motor; y la del cobre se debe al desgaste de cojinetes, bujes y aditivos de refrigerantes. La del silicio se debe a la filtración de polvo y partículas

abrasivas a través de los filtros de aire poco eficientes. La reducción de la viscosidad del aceite se debe a la dilución por filtración de combustible; así mismo la presencia de cenizas y sedimentos (insolubles) se debe a la mala combustión y el excesivo intervalo entre cambios de aceite y el hollín presente se debe a una mala relación aire/combustible, a bajas relaciones de compresión y a problemas con los inyectores o bujías.

5. RECOMENDACIONES

Lo ideal, en cuanto a la recuperación de los aceites usados, consiste en reciclar el lubricante base manteniendo sus características lo más cercano posible a las características del lubricante nuevo. El empleo del aceite usado como combustible alternativo es válido si se efectúan los tratamientos físico-químicos necesarios para desclasificarlo como residuo tóxico y peligroso. La opción más adecuada para el país y la región, la constituye el aprovechamiento energético (poder calorífico) del aceite usado haciendo uso de la técnica de mezclado con combustibles pesados tipo Fuel-Oil y ACPM y que deben cumplir con la norma técnica ASTM 396.

REFERENCIAS

- [1] I. Hamawand, T. Yusaf, & S. Rafat. "Recycling of waste engine oils using a new washing agent". *Energies*, 6(2), 1023-1049. 2013.
- [2] E.P.A. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste and Emergency Response. (Desechos Sólidos y Respuesta a Emergencias). <http://www2.epa.gov/aboutepa/about-office-solid-waste-and-emergency-response-oswer>. [Acceso 12 de agosto de 2015].
- [3] LEY 253 DE 1996 del Congreso de Colombia Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989.
- [4] LEY 1252 DE 2008 del Congreso de Colombia por la se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.
- [5] DECRETO 0283 DE 1990 del Congreso de Colombia Por el cual se reglamenta el almacenamiento, manejo, transporte, distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo y el transporte por carretanques de petróleo crudo.
- [6] DECRETO 4741 DE 2005 del Congreso de Colombia por el cual se reglamenta parcialmente la preven-

ción y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

[7] J.L. Sotelo, J. Aguado, D.P. Serrano y R. Van Grieken. Reciclado Químico de Plásticos y Aceites Lubricantes Usados Mediante Catalizadores Zeolíticos. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas. 1998.

[8] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, CEPIS. "E" <http://www.bvs-de.paho.org/eswww/fulltext/resipeli/desechos/desechos.html> [9] E.I. Mendoza, R.E. Robles. "Reciclaje de aceites usados para transmisión de potencia en las industrias y talleres de servicio de la ciudad de Milagro, Ecuador". Universidad, Ciencia y Tecnología, 19(77), 160-165. 2015.

[10] M. Montesta, P. Bello. Re-Refinado de Aceites Usados. Universidad de Vigo. España. 2003. <http://www.miliarium.com/PremiosMiliarium/2003/RefinadoAceites/RefinadoAceites.pdf> [Acceso 12 de agosto de 2015]

[11] Ministerio ambiente vivienda y desarrollo territorial. Manual Técnico para el manejo de Aceites Lubricantes Usados. Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible. 2006.

[12]. B. Prabakaran, Z. Zachariah, "Production of Fuel from Waste Engine oil and Study of performance and emission characteristics in a Diesel engine", *International Journal of Chem Tech Research*, 9 (5), 474-480, 2016

[13]. K. Zhang, L. Jin, Q. Cao, "Evaluation of modified used engine oil acting as a dispersant for concentrated coal-water slurry". *Fuel*, 175, 202-209, 2016.

[14]. J.B. Durán-Vargas, N.L. Gutiérrez-Ortega, "Obtención de biodiesel a partir de aceite usado empleando irradiación ultrasónica", *Jóvenes en la ciencia*, 2 (1), 1264-1267, 2016.

[15] S. O. Ogbeide, "An investigation to the recycling of spent engine oil." *J Engineering Science and Technology Review*, 3(1), 23-35, 2010.

[16] ASTM International. Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method; ASTM Standard D1298; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

[17] ASTM International. Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C; ASTM Standard D2270; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

[18] ASTM International. Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure); ASTM Standard D4007; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

[19] ASTM International. Standard Test Method for Ramsbottom Carbon Residue of Petroleum Products; ASTM Standard D524; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

[20] ASTM International. Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration; ASTM Standard D664; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

[21] Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión. http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/ure/estudios/EstudiosEficiencia_AceitesUsados.pdf. [Accesado el 15 de Diciembre de 2016]

[22] ASTM International. Standard Test Method for Base Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration; ASTM Standard D4739; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

[23] Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre. 2011; http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf

[24] C. Gómez, G. García, A. Hernández, P. Ramírez. "La industria de la re-refinación de aceite mineral usado en Argentina". Universidad del CEMA, Argentina. 2007; https://www.ucema.edu.ar/posgrado-download/tesinas2007/MADE_Hernandez.pdf. [Acceso el 14 de Diciembre de 2016].

[25] G. Pignalosa, C. Mantero, L. Della Mea, R. "Mosquera. Mantenimiento proactivo en base a análisis de aceite lubricante". URUMAN. Montevideo - Uruguay. 2004; http://www.uruman.org/sites/default/files/articulos/mantenimiento_proactivo_en_base_analisis_aceite_lubricante.pdf.

[26] Y. De Vita. Aditivos para lubricantes para motor a gasolina: Cuaderno FIRP n° 381b versión # 2 editado y publicado por: laboratorio FIRP Escuela de Ingeniería Química, universidad de los Andes Mérida 5101 Venezuela. 1995. <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S831B.pdf>