

Estudio de factibilidad para optimizar frecuencia de reemplazo del lubricante, en Grupos Electrógenos

Study of feasibility to optimize frequency of substitution of the lubricant, in engines of electro energetic production

Ing. Jabel Felipe Quintana Tamayo¹, Dr. Francisco Martínez Pérez^{II}, Ing. Yanira Guadalupe Vázquez Jorge^I, MSc. Jorge Ramírez Arzuaga^{III}

¹ Instituto Cubano del Petróleo, CUPET-CUBALUB, Granma, Cuba.

^{II} Instituto Superior Politécnico José Antonio Echavarría (ISPJAE), CUJAE, Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios de Ingeniería en Mantenimiento, La Habana, Cuba.

^{III} Universidad de Granma, Bayamo, Granma, Cuba.

RESUMEN. La explotación de Grupos Electrógenos en Cuba, ha incrementado significativamente la demanda de lubricantes. Implementar programas y estrategias que contribuyan a reducir su consumo, es una vía eficaz para obtener beneficios económicos y medioambientales. Para lograr el propósito de disminuir el consumo de este tan importante renglón se llevaron a cabo investigaciones. Los motores seleccionados, fueron muestreados. Las muestras de aceite analizadas por métodos estandarizados ASTM, determinándole: viscosidad, BN, insolubles, punto de inflamación y contenido de metales. Esto posibilitó monitorear la condición del lubricante, y su relación con el desgaste en los motores. Se realizó un bioensayo de toxicidad aguda para evaluar los cambios en el lubricante. El lubricante que actualmente es reemplazado con 350 horas de servicio, posee condiciones y características adecuadas para continuar en uso. El bioensayo demostró que es factible incrementar las horas de servicio, sin que se produzcan cambios significativos en su toxicidad y potencial contaminante.

Palabras clave: métodos estandarizados, punto de inflamación, contenido de metales, potencial contaminante.

ABSTRACT. The operation of electro energetic production engines has increased the lubricant demand. To implement programs and strategies that contribute to reduce the consumption of this important article, a research work was developed. The selected motors were tested. The samples of oil were analyzed by the standardized methods ASTM, determining Viscosity, BN, Insolubles, inflammation Point and Content of metals. All this, facilitated the monitoring condition of the lubricant. A bioassay of sharp toxicity was carried out to evaluate the changes in the lubricant. It was demonstrated that the lubricant that at this moment is replaced with 350 hours of service, still possesses conditions and appropriate technical characteristics to be used. The bioassay demonstrated that it is feasible to increase the hour's service, without significant changes in its toxicity and polluting potential.

Keywords: standardized methods, inflammation point, content of metals, polluting potential.

INTRODUCCIÓN

Los aceites lubricantes son líquidos viscosos que se usan fundamentalmente, para disminuir la fricción entre dos superficies. Estos se desempeñan en el interior de motores o equipos industriales donde las condiciones de operación hacen, que después de cierto periodo de uso, se degraden en compuestos cuyo comportamiento y naturaleza química, impiden prolongar su uso; debiendo ser reemplazados total o parcialmente (EPA, 2013).

Los cambios químicos que se producen en un lubricante en

servicio, son influenciados por muchos factores, y determinan su vida útil. La naturaleza del básico, tipo y cuantía de los aditivos, presencia de contaminantes, las condiciones y régimen de explotación del equipo, son algunos de ellos. Procesos de degradación térmica y oxidativa, hidrólisis de aditivos, polimerización, neutralización y formación de ácidos orgánicos, son muy frecuentes en los aceites lubricantes en servicio (ATSDR, 2013; Mang & Dresel, 2007; Trujillo, 2007). La magnitud e intensidad con que se desarrolla cada uno de ellos, depende

de muchas variables. Haciendo prácticamente imposible, la determinación precisa de su composición química, en función de las horas de servicio.

El aceite usado es un peligroso contaminante que produce serias afectaciones al medio ambiente (ATSDR, 2013; Cuba-MINBAS, 2010). Las estrategias de reciclar y reutilizar aceites lubricantes, son prácticamente inaccesibles para países pobres y del tercer mundo e implementarlas requiere de infraestructuras y tecnologías muy costosas, así como de cultura y conciencia ambiental en la población. Reducir el consumo, optimizando su uso, es hoy la vía más eficaz para disminuir sus efectos contaminantes (Terradillos *et al.*, 2009).

La aplicación de técnicas proactivas, contribuye a alargar la vida útil de los aceites lubricantes en servicio (Jones & Scott, 2011; Macian *et al.*, 2008; Trujillo, 2007; Veens, 2008). Sin embargo, para incrementar la frecuencia de cambio de un lubricante, es necesario demostrar la factibilidad de esta decisión, desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental. Siendo necesario monitorear los cambios químicos que se producen en el lubricante, y establecer su relación con el desgaste de la maquinaria.

Un incremento en las horas de servicio del lubricante, pudiera originar cambios significativos en su composición química (Trujillo, 2007) y por consiguiente, en su toxicidad; sobre todo si sus aditivos han perdido el control, sobre los principales procesos químicos que se originan en el aceite. Por eso, resulta necesario monitorear los cambios de toxicidad que se originan en el aceite en servicio, para conocer si es ecológicamente factible, incrementar sus horas de operación.

Los Grupos Electrógenos que operan con combustible diesel consumen más de 700 toneladas de lubricante Extradiesel 15W40; cifra que los ubica como un importante consumidor y generador de aceite usado. Esto, unido a la importancia económica y estratégica de estas instalaciones, motivó el desarrollo de esta investigación.

MÉTODOS

Características técnicas del emplazamiento

El emplazamiento donde se llevó a cabo el estudio cuenta con 16 motores agrupados en dos baterías, de 8 cada una. Los motores instalados son de la marca y modelo **MTU serie 4000**, su denominación es **16V4000G8**, y son de nacionalidad alemana. Utilizan combustible diesel, y cuentan con todos los sistemas y agregados característicos en este tipo de motor (Cuba-MINBAS, 2005); están acoplados a generadores eléctricos con una potencia nominal de generación de 2360 kVA.

El aceite lubricante empleado en los motores de los Grupos Electrógenos, es el aceite Extradiesel 15W40. Este, es un aceite para motores de combustión interna, que se elabora a partir de aceites básicos minerales de gran calidad, a los que se le incorporan paquetes de aditivos capaces de mejorar su rendimiento y eficacia. Por su desempeño, el aceite Extradiesel 15W40 se clasifica como API CH4.

Selección de los motores

Los motores estudiados, fueron seleccionados al azar. Quedando finalmente, los siguientes:

1. Motor N° 5 Batería # 1
2. Motor N° 8 Batería # 1
3. Motor N°10 Batería # 2
4. Motor N° 12 Batería # 2
5. Motor N° 15 Batería # 2

Metodología utilizada para la toma de muestra

Para analizar el comportamiento del Aceite Extradiesel 15W40, en los motores objeto de estudio, se tomaron muestras del aceite en diferentes momentos de su vida útil recomendada (350 horas). La forma de hacerlo, o metodología específica a utilizar, fue la siguiente:

1. Cuando el motor entra en mantenimiento, a las 350 horas de operación, se le hace, por procedimiento, el cambio de aceite y filtro. En ese momento, se tomó una muestra del aceite nuevo, que se le suministró a la máquina. Esta constituye la muestra correspondiente a 0 horas nominales.
2. Cada 50 horas, aproximadamente, se tomaron, con la máquina en operación y por el puerto de muestreo, muestras de aceite con volúmenes aproximados de 1 litro. Para ello se tuvo en cuenta el registro de control de cada motor; y cada operación de muestreo, se recogió en un registro creado para este fin.
3. En todo momento se procuró, mantener niveles constantes de aceite en el depósito, revisando frecuentemente y procediendo a rellenar el aceite consumido.
4. Las mangueras, útiles y equipos empleados en el muestreo, se mantuvieron limpios y guardados dentro de bolsos de nylon, para evitar que la contaminación, altere los resultados.
5. Se cumplieron, en todo momento, las normas y procedimientos para el muestreo (Trujillo, 2007).
6. Las muestras extraídas se almacenaron en recipientes limpios y con cierres herméticos, los cuales estaban previamente identificados, y con todos los datos necesarios, como lo exigen los procedimientos de muestreo y análisis (Trujillo, 2007).
7. Las muestras, debidamente identificadas, con la información y documentación exigida, se llevaron a los laboratorios para ser analizadas. Estos laboratorios forman parte de un Sistema de Gestión de la Calidad, que esta Certificado por BUREAU VERITAS y la Oficina Nacional de Normalización, por cumplir los requisitos establecidos en norma ISO 9001:2008.

Pruebas y ensayos a realizar

Las pruebas y ensayos a realizar en el laboratorio, fueron seleccionadas considerando aspectos técnicos y económicos. Se seleccionaron la menor cantidad de ensayos capaces de brindar una información detallada y completa para el diagnóstico. La totalidad de los ensayos realizados, se recogen en la Tabla 1.

TABLA 1. Pruebas o ensayos realizados

No.	Prueba o ensayo	Método
1	Análisis Espectroquímico, 21 elementos (ppm)	ASTM D 6595-00
2	Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445-06
3	Número Básico (BN)	ASTM D 2896-07
4	Contenido de insolubles	ASTM D 893-05
5	Punto de inflamación	ASTM D-92

Cálculos y procesamiento estadístico

Para la determinación de tasas de desgaste por tipo de metal, tendencias, análisis del comportamiento histórico, análisis para normalidad, regresión entre variables y comparación de muestras, se emplearon algunas herramientas en Excel, y el programa estadístico STAPGRAPHIC PLUS versión 5.1.

Bioensayo de toxicidad aguda

El bioensayo de toxicidad se realizó en un centro especializado camarero. Esto permitió evaluar el grado de afectación que produce el aceite usado, sobre las post larvas de camarón. Este ensayo cuantificó el daño agudo. Las pruebas agudas miden las concentraciones letales de un xenobiótico a una especie en particular, en este caso, al camarón. El valor determinado y calculado se denomina concentración letal media (CL50), y corresponde a la concentración de aceite usado que causa la muerte al 50% de la población experimental al cabo de 48 horas (Ortuño *et al.*, 2009).

Con el desarrollo de este bioensayo, se determinó la concentración letal media (CL50), para aceites lubricantes usados con diferentes horas de servicio. Esta información posibilitó conocer cómo varía el grado de toxicidad del aceite, conforme se incrementan sus horas de explotación.

Organismo experimental

El bioensayo se realizó con post larvas de Camarón N° 3, de 12 días de nacido.

Diseño experimental

El bioensayo se realizó conforme al método: NMX- AA-110-1995-SCFI (Ortuño *et al.*, 2009). Como sustancia tóxica se empleó el aceite usado procedente del motor N° 10, seleccionado al azar. Las horas de servicio del aceite, fue la variable experimental. Por metodología, la concentración de aceite usado en cada recipiente debe variarse en un rango específico. Los valores de concentración seleccionados para el bioensayo fueron: 0; 12, 5; 25; 50; 100; 250 y 500 ppm. A cada ensayo se le realizaron 3 réplicas. El diseño experimental se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2. Diseño experimental del bioensayo

Número del bioensayo	1	2	3	4	5
Horas de servicio del aceite (h)	0	44	149	256	348

Lugar: Laboratorio del Centro de Desove del Camarón.
 Fecha y hora de inicio: 18/02/2013 a las 11.00 a.m.
 Fecha y hora de terminación: 20/02/2013 a las 11.00 a.m.

Animal empleado en el bioensayo: post larva de camarón N°3.
 Edad de los animales: 11 días.
 Número de animales por envase: 10.
 Alimentación: si.
 Suministro de oxígeno: no
 Tipo, cantidad y frecuencia de alimentación: Nauplios de Artemia Salina, 20-25 nauplios por post larva de camarón, cada 2 horas.
 Envase de prueba: envases plásticos transparentes de PET. 1000 ml.
 Volumen de exposición: 1000 ml
 Iluminación: luz artificial de laboratorio, 24 horas.
 Duración del ensayo: 48 horas.
 Tipo de ensayo: estático sin renovación.

Procesamiento estadístico y análisis de resultados

Para determinar la concentración letal media (CL50) a las 48 horas los resultados, debidamente tabulados, fueron procesados estadísticamente empleando el programa estadístico: STAPGRAPHIC PLUS versión 5.1, específicamente la regresión con unidades probabilísticas” (Probit), tal y como sugiere el método (Ortuño *et al.*, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las propiedades determinadas en el laboratorio, fueron tabulados y graficados para facilitar el estudio de su comportamiento. El análisis específico de cada una de ellas, se detalla a continuación (Figura 1).

Comportamiento del Número Básico BN

Como se puede apreciar en la Figura 1, el Número Básico tiene un comportamiento similar en los cinco motores. Su tendencia, a medida que aumentaron las horas de explotación hasta llegar a las 350 horas, es la esperada teóricamente (Macian *et al.*, 2002). Existe una disminución progresiva causada porque la reserva básica comienza realizar su función, neutralizando los ácidos que se forman. Sin embargo, esta disminución se ve retardada, o se hace más lenta, por la acción que ejerce el constante relleno con aceite nuevo, el que por supuesto, posee un mayor Número Básico. La acción del relleno, unido a las buenas condiciones técnicas de los motores y al establecimiento y aplicación de políticas y procedimientos adecuados, para la explotación y mantenimiento de estos equipos, ha permitido que llegadas las 350 horas de explotación, el Número Básico promedio esté alrededor de 9 mg de KOH/g, lo que significa que solo ha disminuido aproximadamente en un 33% con relación a su línea base promedio (13,22 mg de KOH/g).

Considerando que para el BN se toma el 50% de disminución, con relación a su línea base, como valor de precaución (Trujillo, 2007), se puede afirmar que por concepto de BN, puede extenderse la vida útil del aceite ya que existen aún, a las 350 horas de explotación, reserva suficiente de álcalis para contrarrestar la acción de los ácidos que se forman durante el proceso de combustión, y de la propia degradación química y térmica del aceite.

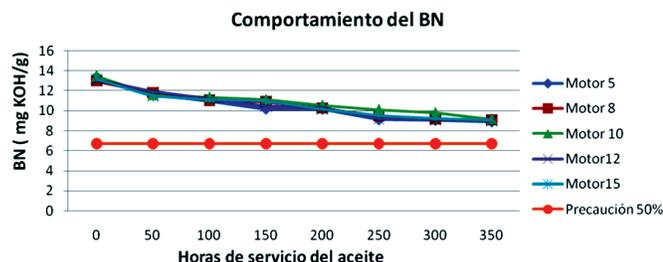


FIGURA 1. Comportamiento del Número Básico.

Comportamiento de Insolubles en Pentano y Tolueno

Los insolubles en Pentanos y Tolueno, muestran la salud y el grado de contaminación del aceite en uso (Trujillo, 2007).

Los cinco motores analizados tienen un comportamiento similar, en cuanto a presencia de insolubles en el aceite, Figura 2. Como se puede apreciar, existe un incremento lógico, que es característico en los aceites para motores, conforme aumentan sus horas de servicio. Este incremento se debe a la progresiva oxidación del aceite; la cual siempre ocurre, independientemente a la acción de los aditivos incorporados para contrarrestarla. Por otra parte, la contaminación con hollín proveniente de la cámara de combustión, así como las partículas metálicas del desgaste, óxidos, u otros contaminantes sólidos provenientes del exterior, también son causas que originan un aumento en el contenido de insolubles del aceite.

Analizando los niveles de insolubles, durante y llegada a las 350 horas de explotación, puede decirse que se manifiesta un crecimiento lógico, y los valores que se alcanzan, no resultan significativos. Demostrando que el aceite tiene buena salud y poca contaminación. Además, la oxidación y degradación del aceite es poco significativa, pues estos compuestos solo representan como promedio cerca del 0,05%. Se considera oportuno recordar que la diferencia entre el contenido de insolubles en Pentano y Tolueno, son los compuestos de oxidación, presentes en el aceite.

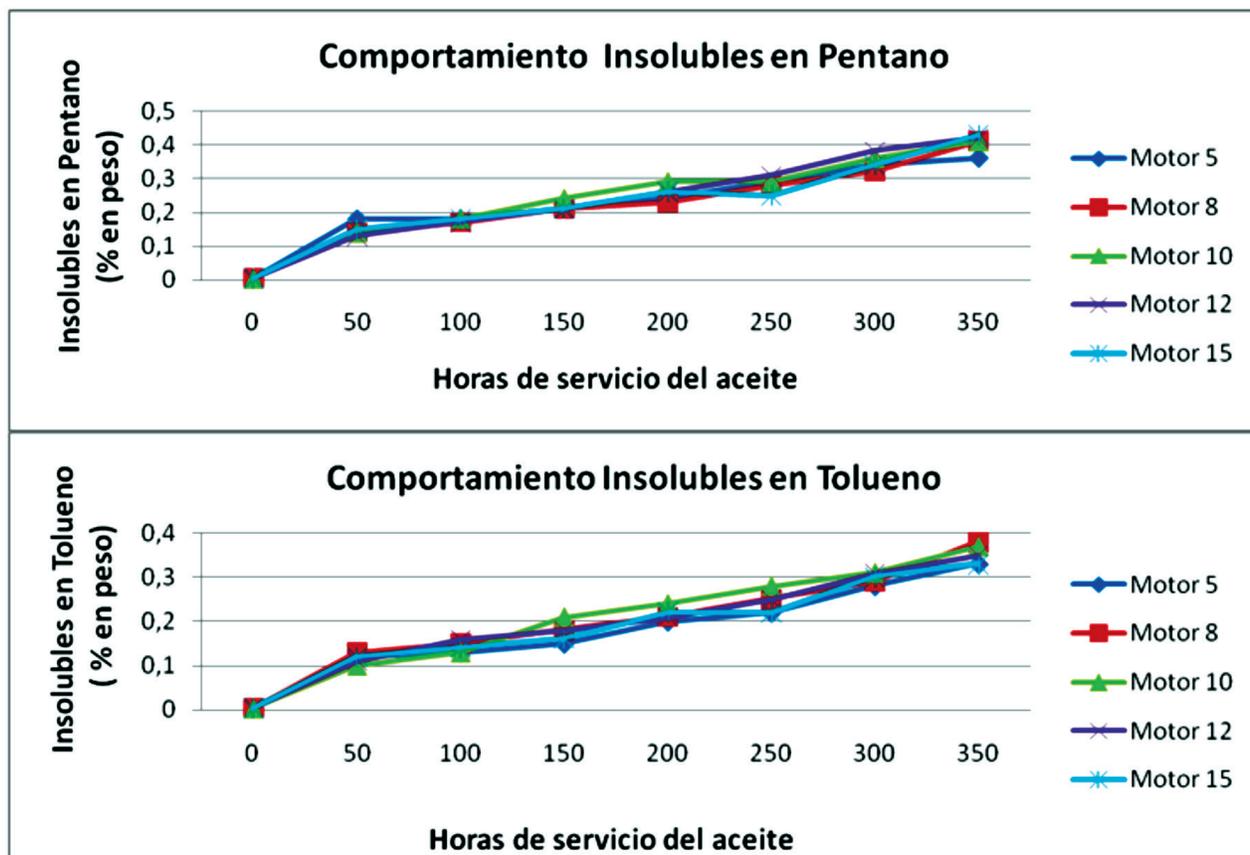


FIGURA 2. Comportamiento de Insolubles en Pentano y Tolueno.

Los valores de insolubles en Tolueno, tampoco son significativos. Estos valores, que en su mayoría representan el contenido de hollín con unión de algún u otro contaminante sólido o partícula de desgaste, solo alcanza, llegadas las 350 horas, valor promedio de 0,35%. Cifra que está muy por debajo del 2% admitido como límite condenatorio (Trujillo, 2007); y que pudiera ser hasta 4,8%, para este tipo de aceite que clasifica como API CH4.

Por los resultados obtenidos y analizados, se considera que a las 350 horas de explotación los niveles de oxidación y contaminación por hollín y otros contaminantes sólidos presentes en el aceite, no son muy significativos. Esto, evidentemente se ha favorecido por el alto índice de relleno, las buenas condiciones de operación, el estado técnico de los motores, y por supuesto, el accionar de los aditivos concebidos en el paquete para contrarrestar la degradación del aceite. Es decir, el aceite posee buena salud y bajos niveles de contaminantes. Lo que le favorece para continuar en operación, sin peligro aparente para el motor.

Comportamiento del Punto de Inflamación

La temperatura de inflamación, que constituye la señal de alarma para detectar contaminación con combustibles, o relleno con aceites más o menos pesados y volátiles, posee un compartimiento similar para los cinco motores estudiados, Figura 3. La tendencia es mantenerse constante y lejos del límite condenatorio predeterminado, que es 180 °C (Noria, 2013; Trujillo, 2007). Sin embargo, pasadas las 300 horas se aprecia una ligera tendencia al incremento. Esto es lógico que suceda, porque el aceite, producto a su propia oxidación y degradación, se va transformando en fracciones más pesadas y los más volátiles, que son las responsables de la inflamación del mismo, disminuyen su presencia, independientemente a los continuos rellenos. Estos resultados también confirman que el sistema de inyección, de los cinco motores, está trabajando de forma adecuada y no existen pasas de combustible significativos, al cárter.

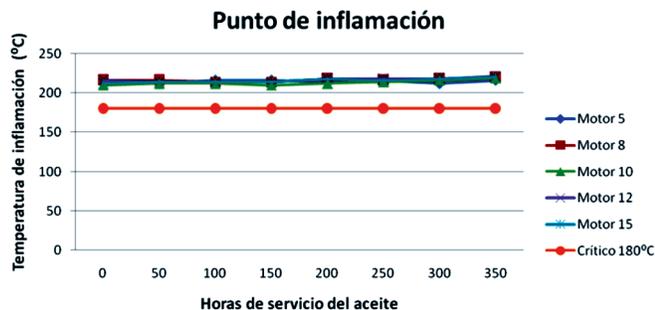


FIGURA 3. Comportamiento del Punto de Inflamación.

Comportamiento de la viscosidad a 100 °C

La viscosidad es la característica más importante del lubricante. De ella depende el establecimiento de los diferentes regímenes de lubricación en cada par de fricción; y por consiguiente, actúa de forma determinante y decisiva en el control del desgaste en la maquinaria (Noria, 2013, Mang & Dresel, 2007; Trujillo, 2007).

La viscosidad del aceite en uso, se ve influenciada por casi la totalidad de los procesos y transformaciones que ocurren en la maquinaria, y en el propio aceite. La oxidación, contaminación y condiciones de operación de la máquina, van a ocasionar aumentos o disminuciones de la misma. Analizando el comportamiento de la Viscosidad, en los motores estudiados, Figura 4, es evidente que, en todos, tiene un comportamiento

similar. Se produce un descenso, desde que comienza la operación, hasta alrededor de las 100 horas. Esto se debe al batimiento del aceite, que ocasiona la ruptura de las moléculas de mayor tamaño; fundamentalmente el aditivo mejorador del Índice de Viscosidad. Este cizallamiento es responsable de disminuir la cantidad de moléculas de gran tamaño, las que a su vez tienen la propiedad de aumentar la viscosidad en los líquidos. Sin embargo, el decrecimiento en la viscosidad no supera el valor condenatorio de disminución que es del 10%, con relación a la línea base. Se aproxima, antes de comenzar a incrementarse; por la inevitable degradación, oxidación y contaminación con hollín y partículas externas. El incremento en la Viscosidad por las causales antes expuestas, solo alcanza a las 350 horas de operación, valor promedio de 14,94 cSt. Lo que representa un incremento del 5,58%, muy distante del 15% establecido como límite crítico superior, con relación a la línea base. Esto demuestra que a las 350 horas, el aceite posee una viscosidad que le permite continuar en operación, lejos de la zona de peligro.

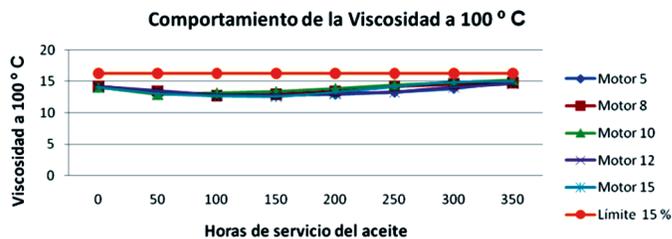


FIGURA 4. Comportamiento de la viscosidad a 100 °C.

Valoración general de las condiciones del aceite

El análisis detallado de todas y cada una de las propiedades del aceite en uso Extradiesel 15W40, nos demuestra que al llegar a las 350 horas, lo que constituye el ciclo actual de mantenimiento, este goza de buena salud y los niveles de contaminación son bajos, en comparación con los valores que tenemos predeterminados como condenatorios. Todo esto influye de forma favorable en la viscosidad del mismo. Los resultados obtenidos en esta investigación preliminar, nos demuestran claramente que el aceite reúne las condiciones y características físico químicas necesarias, para continuar en explotación más allá de las 350 horas. Para tomar esta decisión es preciso profundizar, aún más, en la investigación; pues necesitamos conocer como se está desarrollando el proceso de desgaste en los pares de fricción, la magnitud y el tipo; en fin, todo lo que tiene que ver con el deterioro del motor y que es función o está determinado, en mayor o menor grado, por las condiciones de salud y contaminación del aceite. Además, necesitamos precisar la cuantía y calidad de los aditivos presentes en el aceite; para de esta forma, poder valorar o estimar cuando va ocurrir su agotamiento.

Comportamiento del Contenido de metales

Los valores reportados por el laboratorio, no solo corresponden con metales provenientes del desgaste de los motores, también pertenecen a aditivos y contaminantes (Montoro, 2005;

Stachowiack, 2007). Para facilitar el análisis, los resultados fueron organizados, teniendo en cuenta su posible procedencia.

El reporte del ensayo para contenido de metales presentes en el aceite, ASTM 6595-00, informa sobre la presencia de 21 elementos químicos. Con la finalidad de facilitar el análisis, estos se clasificaron según su posible fuente de procedencia en: metales de desgaste, aditivos y contaminantes.

Como metales de desgaste fueron clasificados 13, de los 21 elementos reportados. Consideramos oportuno señalar que esta clasificación no es absoluta y solo considera la más probable fuente de procedencia. Algunos de estos elementos pueden ingresar en el aceite provenientes de dos, y hasta de las tres fuentes de generación a la vez; lo que resulta necesario tener en cuenta, a la hora de realizar el análisis de resultados, pues pudieran originarse falsos positivos o falsos negativos.

La totalidad de los valores reportados, fueron analizados estadísticamente utilizando una herramienta Excel, desarrollada para ello, y el programa estadístico STAPGRAPHIC PLUS versión 5.1. Los resultados del monitoreo de metales de desgaste fueron normalizados a tasa de desgaste por hora (ppm/h) de cada metal. Este método permite establecer límites estadísticos basados en desviaciones de los promedios históricos; pudiendo establecerse límites de tendencia basados en tasas de cambios derivadas estadísticamente, los que resultan más precisos y sensibles al cambio.

Comportamiento de Metales de desgaste

Todos los metales de desgaste presentaron un comportamiento similar, conforme se incrementan las horas de servicio del aceite. Las concentraciones reportadas varían de uno a otro elemento debido a la diferencia en la metalurgia presente y a la cuantía en cada uno de los pares de fricción. Es por ello, que metales como: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Manganeseo (Mn), Cadmio (Cd), Vanadio (V), Plata (Pt) y Titanio (Ti), aparecen en menor concentración, pues se emplean en aleaciones de partes con funciones específicas en el motor como: anillos o aros y metales de superficie. Metales como: Hierro (Fe), Cobre (Cu), Plomo (Pb), y Aluminio (Al), aparecen con mayor frecuencia en todos los elementos del motor. El Hierro es el metal base de casi la totalidad de las aleaciones presentes en las partes y piezas del motor. El Cobre, Plomo y Aluminio, es muy común encontrarlos en Babbitt, revestimientos de cojinetes, en el Bronce, y el Latón. Es por eso que las concentraciones reportadas, para estos elementos, es superior al resto.

Para analizar en detalles el comportamiento del desgaste en los motores, y su relación con los cambios químicos el aceite, se determinaron y graficaron las Tasas de desgaste normalizadas por hora de servicio, para los elementos: Hierro (Fe), Cobre (Cu) y Plomo (Pb). Las Figuras 5, 6 y 7 muestran el comportamiento.

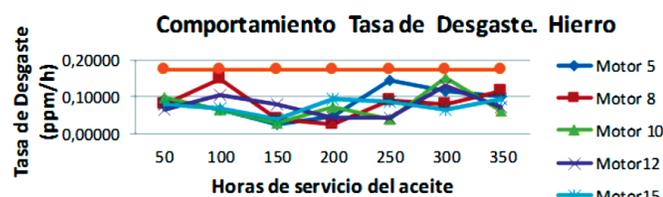


FIGURA 5. Comportamiento de la Tasa de desgaste del Hierro (Fe).

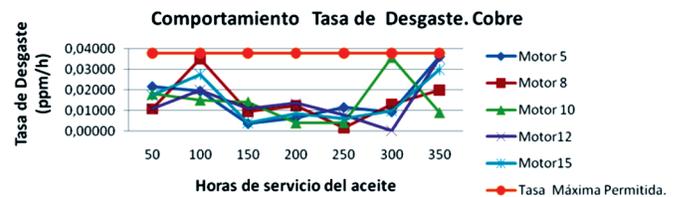


FIGURA 6. Comportamiento de la Tasa de desgaste del Cobre (Cu).

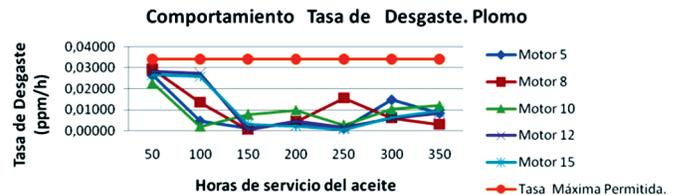


FIGURA 7. Comportamiento de la Tasa de desgaste del Plomo (Pb).

Como se puede apreciar, el comportamiento el de la Tasa de desgaste, para ninguno de los tres elementos analizados, supera el límite permitido. Para establecer el límite se consideró como valor crítico, incrementos por encima de la media, iguales o superiores, a dos veces la Desviación Estándar, de los valores históricos (Trujillo, 2007; Trujillo, 2006).

Los valores de Tasa de desgaste calculados en cada período, y para cada uno de los motores estudiados, fueron procesados estadísticamente. Los análisis para normalidad demostraron que, en todos los casos, el desgaste que se produce en los motores, tiene un comportamiento normal, a lo largo de las 350 horas de servicio del aceite.

Al analizar la tendencia de la Tasa de desgaste, resulta evidente que, independientemente al comportamiento normal del desgaste, esta sigue un patrón muy similar en los tres elementos metálicos graficados y para los cinco motores. Los mayores valores de desgaste se producen durante las primeras horas de operación, y después de las 300. Este comportamiento pudiera deberse al hecho que durante las primeras 100 horas de operación, ocurre la ruptura o cizallamiento del polímero introducido como aditivo mejorador del Índice de viscosidad. Lo que origina una disminución en la Viscosidad del aceite y en consecuencia se incrementan los contactos metálicos en los pares de fricción, y con ello el desgaste. Sin llegar a ser esta, una situación de consideración. El ligero incremento que se observa, pasada las 300 horas, debe estar originado por los cambios y transformaciones químicas normales para un aceite de motor que ha permanecido en explotación durante 300 horas o más. En ambos casos los valores reportados son normales y están distantes de los límites de precaución.

Comportamiento de elementos de aditivos

El análisis de elementos por Espectroscopia de Emisión, no es una técnica muy apropiada para determinar agotamiento de aditivos; pues con frecuencia, el agotamiento de moléculas del aditivos, no resulta en un cambio significativo en las lecturas atómicas, ya que los subproductos del agotamiento permanecen en suspensión o disueltos en el aceite.

Cuatro de los elementos reportados como aditivos: Fósforo (P), Bario (Ba), Magnesio (Mg) y Zinc (Zn), prácticamente no varían sus concentraciones a lo largo de las 350 horas de servicio del aceite; y lo anteriormente analizado, es la explicación para este comportamiento. Sin embargo, la concentración de Calcio (Ca) aumenta; lo que pudiera estar relacionado con el ingreso de polvo del ambiente, al sistema de lubricación.

Para monitorear con precisión el agotamiento de aditivos, es necesario integrar esta técnica con la Espectroscopia Infrarroja (FTIR) y complementar con ensayos que tributen a la categoría salud del lubricante, como: AN, BN y RPOT (Rao, 2008; Trujillo, 2007; Veens, 2008). No obstante, la cuantificación de estos elementos de aditivos, y la verificación de las condiciones químicas del aceite, sugieren que llegada las 350 horas de servicio, el lubricante aun dispone de aditivos, que son su reserva química para mantener un desempeño adecuado.

Comportamiento de elementos contaminantes

El comportamiento del Silicio (Si), muestra una tendencia parabólica. Para entender este comportamiento, es necesario conocer que este elemento forma parte de los compuestos de Silicona que se emplean en los aceites para motores como antiespumante (Trujillo, 2007); y su cuantía, en la formulación original, varía entre 5 y 20 ppm. Por otra parte, el Silicio (Si), está presente en el polvo; por lo que es común encontrarlo como contaminante en los aceites lubricantes (Verlinder, 2005), independientemente al uso de filtros.

Al parecer, durante las primeras horas de operación, el aditivo antiespumante comienza a realizar su función y de alguna manera es separado del aceite, lo que provoca la disminución en la concentración de Silicio (Si). La continua entrada y acumulación de polvo del ambiente en el lubricante, origina incrementos a partir de las 100 horas de operación. Sin embargo, en la inspección visual no se evidencia la formación de espuma en los depósitos de lubricante; y el análisis de insolubles evidencia que la contaminación, no es significativa.

Las líneas de tendencia del elemento Sodio (Na), evidencian que existe una ligera contaminación del aceite, con refrigerante del sistema de enfriamiento. Compuestos de Sodio (Na), se utilizan como elementos inhibidores de la corrosión en líquidos refrigerantes. Los pases de refrigerante, a través de juntas y orificios hacia el sistema de lubricación, son la causa del incremento de la concentración de Sodio (Na), en el lubricante. El Boro (B) y el Potasio (K), son otros elementos que se emplean en la formulación de líquidos refrigerante, para inhibir los procesos corrosivos (Mang & Dresel, 2007;

Trujillo, 2007; Trujillo, 2005). La relación de concentración Sodio-Boro, en estos aditivos, es 5 a 1. Las concentraciones de Boro (B) reportadas en los aceites nuevos, son superiores a 400 ppm; por lo que, evidentemente, estas concentraciones no deben ser originadas por el ingreso de líquido refrigerante al sistema de lubricación; y si, al hecho de que algunos paquetes de aditivos de aceites para motores contienen Boro (B). Estos compuestos de Boro tienden a evaporarse, lo que puede relacionarse con la disminución progresiva de su concentración, en el aceite lubricante.

El análisis del comportamiento de tendencia, para los elementos de desgaste, aditivos y contaminantes, demuestran que durante y llegada las 350 horas de servicio del aceite, este posee condiciones químicas favorables y niveles de contaminación bajos, que le posibilitan mantener un régimen de desgaste normal, en los diferentes pares de fricción del motor.

El análisis realizado para las tres categorías, Salud del lubricante, Contaminación y Desgaste, demuestra que el aceite que hoy es reemplazado, cuando llega a las 350 horas de servicio, posee condiciones y características que le permiten continuar en servicio, y cumpliendo todas sus funciones de forma adecuada. Por lo que es posible incrementar sus horas de servicio en al menos 50 horas más, sin riesgo alguno. O sea, el ciclo de mantenimiento puede incrementarse hasta 400 horas.

Análisis de resultados obtenidos en el bioensayo de toxicidad

El bioensayo de toxicidad aguda, se realizó con el objetivo de conocer que influencia tenía el incremento en las horas de operación del lubricante, sobre su toxicidad. Para establecer valores y criterios cuantitativos, sobre el potencial contaminante del aceite usado. Los resultados del experimento se procesaron estadísticamente, tal y como lo exige el método estandarizado empleado; y finalmente, se pudo determinar la Concentración Letal Media a las 48 horas (CL5048), para cinco muestras de aceite usado, con diferentes periodos de servicio, y provenientes de un mismo motor, el motor número 10.

El monitoreo de la cantidad de animales muertos a las: 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 24; 36 y 48 horas, resulta de gran interés para estudiar las tendencias y el comportamiento de la población de camarón, frente al contaminante. Sin embargo, para la determinación de la Concentración Letal Media, a las 48 horas, solo tiene interés estadístico el promedio de animales muertos reportados en ese período, y para las diferentes concentraciones del tóxico estudiado, según diseño experimental. La Tabla 3, resume el promedio de animales muertos a las 48 horas.

TABLA 3. Promedio de animales muertos a las 48 horas

Horas de servicio del aceite	U/M: Animales muertos a las 48 horas (unidad)						
	Concentración de aceite usado (ppm)						
	0	12,5	25	50	100	250	500
0	3,67	4,00	4,33	6,67	9,67	10,00	10,00
44	4,33	4,00	4,67	6,33	8,67	9,00	10,00
149	3,67	4,33	4,67	6,00	9,67	9,67	10,00
256	3,33	3,67	4,33	6,33	8,67	10,00	10,00
348	4,00	4,00	4,67	7,33	8,67	10,00	10,00

Con la finalidad de determinar la concentración Letal Media, a las 48 horas (CL5048), estos datos fueron introducidos en el Programa estadístico STAPGRAPHIC PLUS versión 5.1, específicamente el método de Unidades Probabilísticas (Probit), que es el método de regresión avanzado recomendado. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4. Resultados de la determinación de Concentración Letal Media (CL5048)

Horas de servicio del aceite	U/M: ppm de aceite usado
	CL5048
0	24,8393
44	19,4578
149	23,1594
256	31,2085
348	22,4875

Al realizar un análisis de regresión simple, para estos valores de CL5048, y las horas de servicio del aceite, el resultado es que no existe relación estadísticamente significativa entre ellos; para un nivel de confianza del 90% o superior. Puede afirmarse que, entre las 0 y 350 horas de servicio del aceite, su toxicidad y potencial contaminante no cambian significativamente. Resultado que aunque pudiera parecer contradictorio, está en correspondencia con lo reportado en la bibliografía (ATSDR, 2013;).

Pudiera parecer ilógico pensar que la toxicidad del aceite en servicio no cambia a medida que se incrementan sus horas de operación. Se considera que los cambios y transformaciones químicas que se producen en el aceite, unido al ingreso de contaminantes, modifican su composición y naturaleza química, lo que sin dudas debe influir sobre su toxicidad. Sin embargo, el bioensayo demostró que hasta las 350 horas de servicio, los cambios químicos producidos, no modifican significativamente su potencial contaminante.

La explicación para este comportamiento pudiera estar fundamentada en el hecho de que al llegar a las 350 horas, todavía el aceite mantiene de forma adecuada sus principales propiedades y características; y los aditivos presentes, mantienen el control sobre los procesos que originan la degradación del aceite, y la consecuente formación de ácidos y compuestos orgánicos de alta toxicidad.

Valoración económica

El estudio realizado constituye un análisis sobre la calidad total que muestra el aceite Extradiesel 15W40, durante y llegada las 350 horas de servicio, en los motores MTU SERIE 4000 de los Grupos Electrónicos. En el mismo se ha demostrado que bajo las condiciones actuales de operación, y de mantenimiento de los motores, el aceite que hoy es remplazado con un ciclo de 350 horas, tiene condiciones y características para continuar en uso con un desempeño adecuado, al menos, durante 50 horas más; y sin riesgo alguno de comprometer el éxito de sus funciones.

Extender el ciclo de mantenimiento y cambio del aceite por 50 horas más; o sea, llevarlo hasta 400 horas, equivale a extender el ciclo de cambio en:

- Extensión Ciclo de Cambio= $50/350=0.1428 \approx 15\%$

Como se puede apreciar, extender el ciclo de cambio se traduce en consumir un 15% menos de aceite, con relación al consumo actual.

El consumo de aceite Extradiesel 15W40, por los Grupos Electrónicos en el año 2012 fue de: 743.63 toneladas. Si se analiza que el incremento de 50 horas en el ciclo de cambio, puede ser aplicable a todos los motores que operan en los Grupos Electrónicos existentes, la cantidad de aceite ahorrado, o dejado de consumir en un año ascendería a:

- Aceite ahorrado = $0,15 * \text{Consumo del año 2012}$
- Aceite ahorrado = $0,15 * 743,63 \text{ t}$
- Aceite ahorrado = 111,54 t/año.

Estas 111,54 t de aceite, equivalen a 603 bidones de 208 L. El costo actual de producción de un bidón de aceite Extradiesel 15W40, asciende a 486.86 pesos de los cuales, casi la totalidad de este valor pertenece a moneda libremente convertible.

Considerando todo lo antes expuesto, el ahorro monetario que se obtendría sería de:

- Ahorro monetario= Cantidad ahorrada* Costo de Producción
- Ahorro monetario = $603 \text{ bidones} * 486.86 \text{ peso/bidones}$
- Ahorro monetario = 293 576.58 peso

Como se puede apreciar, el ahorro, solo por concepto de consumo de aceite, asciende a casi 300 000 dólares anuales. La cifra ahorrada en realidad, será superior a esta; pues el alargamiento en la frecuencia de cambio trae consigo menor utilización de mano de obra en labores de mantenimiento, menor gasto de transportación en el suministro de aceite nuevo y evacuación del usado, y menor consumo de filtros.

Lo más significativo de llevar el ciclo de mantenimiento hasta las 400 horas, no es solo el ahorro económico, sino que más de 100 toneladas de aceite lubricante dejarán de ingresar al medio ambiente.

CONCLUSIONES

- Se demostró la factibilidad técnica de incrementar las horas de servicio del lubricante, en los motores de los Grupos Electrónicos MTU. Sus condiciones químico físicas a las 350 horas, son adecuadas, y los aditivos presentes, mantienen el control sobre los principales procesos de degradación del aceite. Esto posibilita el establecimiento de un régimen de desgaste normal estable. No se produjeron cambios significativos en la toxicidad del lubricante en servicio. La actividad de los aditivos y los bajos niveles de contaminantes, justifican este comportamiento. Demostrándose la factibilidad de incrementar, razonablemente, las horas de servicio del lubricante, sin que se produzcan cambios considerables en su toxicidad y potencial contaminante. Extender la frecuencia de reemplazo del aceite lubricante Extradiesel 15W40 por 50 horas más, y llevarlo hasta las 400 horas, ahorraría al país cerca de 300 000 dólares anuales; y más de 100 toneladas de lubricantes, dejarían de ingresar al medio ambiente. El procedimiento, y la metodología empleada, pueden ser generalizados para optimizar frecuencias de reemplazo en lubricantes industriales. Esto, incrementaría significativamente los beneficios económicos y medioambientales del método propuesto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATSDR: *Aceite usado de cárter Ed. Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades [en línea]*, Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov> [Consulta: abril 04 2013].
- CUBA, MINISTERIO DE LA INDUSTRIA BÁSICA: *Reglamento del Sistema de Gestión de Aceites Usado*, pp. 1- 46, Ed. MINBAS, CUPET, La Habana, Cuba, 2010.
- CUBA, MINISTERIO DE LA INDUSTRIA BÁSICA: *Manual para el curso de operadores y jefes de emplazamientos de Grupos Electrónicos*, Colectivo de autores, Ed. UNE, MIMBAS, La Habana, Cuba, 2005.
- EPA: *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos, Fichas temáticas. [en línea]*, Disponible en: <http://www.epa.gov> [Consulta: febrero 12 2013].
- JONES, M. & SCOTT, D.: *Industrial Tribology. The practical aspect of friction, Lubrication and Wear*, Elsevier Science LTD, USA, 2011.
- MACIAN, V., TORMOS, B., OLMEDA, P.: *Fundamentos de ingeniería del Mantenimiento*, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2008.
- MACIAN, V.; TORMOS, B.; OLMEDA, P.: "Valoración del nivel de reserva alcalina (TBN) en lubricantes para motores Diesel", En: *Memorias de XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Cádiz, España, 2002.
- MANG, T. & DRESEL, W.: *Lubricants and Lubrication*, 2da Ed, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Germany, 2007.
- MONTORO, M, L.: *Contribución al desarrollo y mejoras de técnicas para la detección y análisis de partículas metálicas y contaminantes en aceites usados*, 22pp., Tesis en opción al grado científico de Doctor Ingeniero Químico, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2005.
- NORIA: *Cómo implementar un proceso de lubricación de clase mundial*. Noria Latín América, México [en línea], Disponible en: <http://www.noria.mx> [Consulta: enero 08 2013].
- ORTUÑO, L.; SOSA, R.; GILES, A.: *Ejecución de bioensayos y Asistencia en estudios de impacto ambiental*, 1ra Edición, México D.F., 2009.
- RAO, B.K.: *Handbook of Condition Monitoring*, Elsevier Science LTD, USA, 2008.
- STACHOWIACK, G.: "The effects of particle characteristic on three- body abrasive wear", *Wear*, (249): 201-207, 2007.
- TERRADILLOS, J., BILBAO, M., CIRIA, J. I. & MALAGA, A.: *Análisis de aceite como herramienta de mejora del comportamiento de las multiplicadoras de aerogeneradores*, (Mantenimiento), Puntex Publicaciones, Barcelona, España, 2009.
- TRUJILLO, G.: *Análisis de Aceite Parte I. Re-Diseño del Programa de Análisis de Aceite*, Noria Latín América, León, México, 2007.
- TRUJILLO, G.: *Desarrollando un Enfoque de Clase Mundial para Lubricación. VI Congreso Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento*. León, México [en línea] 2005, Disponible en: www.noria.com, [Consulta: abril 04 2013].
- TRUJILLO, G.: *LIS-Un Nuevo Sistema de Identificación de Lubricantes*, *Reliability World* Monterrey, México, [en línea] 2006, Disponible en: www.noria.com/sp/conferencia.asp, [Consulta: abril 14 2008].
- VEENS, J.: *El eslabón perdido en el mantenimiento y la lubricación de confiabilidad*. Machinery Lubrication en Español, Noria Publishing, Mexico, 2008.
- VERLINDER, A.: "Laboratories at work: Used oil Analysis at wear check", *Tribotest Journal*, (4): 331-346, 2005.

Recibido: 25 de mayo de 2013.

Aprobado: 20 de marzo de 2014

Jabiel Felipe Quintana Tamayo, Ingeniero Químico, Especialista en análisis y aplicación de lubricantes, certificado internacionalmente por AMGA como analista de lubricantes nivel II y aplicador nivel I, MLAI, MLTI, Instituto Cubano del Petróleo, CUPET-CUBALUB, Granma, Cuba, Correo electrónico: javier@grm.cubalub.cupet.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.