

APLICACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO. CASO ESTUDIO: ANALISIS DE ACEITE USADO EN UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

Francisco Saldivia

UNEXPO Barquisimeto, Lara, Venezuela, fsaldivi@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento del motor a través del monitoreo de las propiedades físico – químicas y contaminación del lubricante y será llevado a cabo a través pruebas de laboratorio, con las cuales se obtendrán las tendencias dependiendo del tiempo de funcionamiento del motor y se establecerán relaciones entre las propiedades que servirán para la toma de decisiones respecto al mantenimiento del equipo. El estudio se realizó en un motor de combustión interna de encendido por compresión con un procedimiento de arranque y calentamiento que consistió en el funcionamiento del motor sin carga, velocidad de ralentí. Como resultado se obtiene una medida del efecto del contenido de combustible en la estabilidad de la película lubricante a través de la viscosidad, la cual no tiene mayor influencia en los metales de desgaste ya que se mantienen controlados, al igual que los niveles de aditivación, pero obliga a actuar sobre los parámetros operativos del equipo con la finalidad de corregir el problema de la contaminación con combustible.

Palabras claves: Lubricantes, mantenimiento basado en la condición, análisis de aceites, motor de combustión interna.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the behavior of the motor by monitoring the physical - chemical properties and pollution of the lubricant and will be conducted through laboratory tests, which are obtained with trends depending on the engine operating time and establish relationships between the properties that will serve for making decisions regarding maintenance. The study was conducted in an internal combustion engine with compression ignition starting and operating procedure unloaded motor, idle speed. The result is a measure of the effect of oil content of the lubricant film stability via viscosity, which has no more influence on wear metals since they remain controlled, as levels of additives, but forces acting on the operating parameters of the equipment in order to correct the problem of fuel contamination.

Keywords: Lubricants, condition-based maintenance, oil analysis, internal combustion engine.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como propósito el análisis de un aceite lubricante usado en motores de combustión interna a través del estudio de las propiedades físicas y químicas de dicho lubricante.

El análisis y monitoreo del aceite lubricante, brinda mayor confiabilidad acerca del estado real en el que se encuentra el motor, y previene fallas y paradas no planificadas. En los motores de combustión interna, donde el combustible es quemado, la lubricación se ve enormemente dificultada debido a los fenómenos adicionales y más exigentes a los que se debe enfrentar: altas temperaturas, productos de la combustión y residuos que pueden contaminar el lubricante, altos esfuerzos, entre otros. La metodología utilizada permite generar una referencia para estudios posteriores sobre el tema y puede ser aplicada a otros equipos.

2. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El mantenimiento predictivo surge como respuesta a la necesidad de reducir los costos de los métodos tradicionales de mantenimiento, preventivo y correctivo, y parte del conocimiento del estado de los equipos. Se apoya en dos pilares fundamentales (Cesáreo, 1998) que son la existencia de parámetros funcionales indicadores del estado del equipo y la vigilancia continua de los equipos, con la finalidad de detectar la falla antes de que ocurra para asegurar el correcto funcionamiento, observar su evolución y predecir la vida residual de sus componentes.

La dificultad de implantar este tipo de mantenimiento (González, 2005) radica en la localización de la variable identificadora y en correlacionar niveles de aceptación o rechazo de dicha variable con estados reales de la máquina fácilmente medibles. Debe verse complementado por la utilización de técnicas estadísticas a través de la medición rigurosa de variables y tratamiento de dichas medidas.

El mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite es un método que ayuda a determinar los períodos óptimos de sustitución del lubricante y las causas que estén originando su degradación y contaminación.

3. ANÁLISIS DE ACEITE

El monitoreo de los aceites (Albarracín, 1993) es una de las herramientas más valiosas que el ingeniero de mantenimiento tiene a su disposición con la finalidad de alcanzar la vida útil de los equipos mecánicos. Las diferentes técnicas para el monitoreo periódico de los aceites usados como el análisis físico-químico, la espectrofotometría por emisión atómica, el conteo de partículas y la ferrografía permiten evaluar el estado del aceite para su cambio oportuno y el grado de desgaste de los diferentes mecanismos del equipo, el cual si es anormal permitirá implementar correctivos que eviten la parada no programada o en caso contrario trabajar con confiabilidad y cuantificar la vida real de servicio del equipo que debe estar de acuerdo con lo especificado por el fabricante. Los resultados finales se reflejarán en una reducción significativa de los costos de mantenimiento.

Un programa moderno de análisis de aceite (Trujillo, 2007) debe ser considerado como una cadena donde la integridad y la fortaleza de cada eslabón (selección de la localización óptima del puerto de muestra, frecuencia adecuada, selección de las pruebas a realizar, adecuado análisis y la interpretación realizada por personal especializado) es idéntica, es la herramienta efectiva para incrementar la confiabilidad de la maquinaria. Ese programa utiliza la tecnología, los conocimientos de la operación del equipo y los resultados del análisis de aceite para establecer acciones específicas de mantenimiento y permitir una lubricación óptima.

4. MUESTREO, LÍMITES Y ALARMAS

La toma de muestra es el aspecto más crítico del análisis de aceite (Troyer y Fitch, 2004). Si no se obtiene una muestra representativa, todos los esfuerzos subsecuentes del análisis de aceite serán anulados. Los objetivos principales para la obtención de una muestra representativa son:

1. Maximizar la densidad de información. Obtener la mayor cantidad posible de información por mililitro de aceite.
2. Minimizar la distorsión de información. La concentración de información debe ser uniforme, consistente y representativa. Es importante que la muestra no se contamine durante el proceso de muestreo.

Los límites en análisis de aceite a veces son denominados alarmas (Mayer, 2005), y son dispositivos creados para ayudar en la interpretación de los informes. Si bien varios parámetros pueden superar una cantidad determinada, en otros se espera que cambien con el tiempo, pero su tasa de cambio sigue siendo importante.

El propósito principal de las alarmas o límites es filtrar la información para que el analista invierta su tiempo en administrar y corregir situaciones excepcionales en vez de tener que examinar atentamente toda la información tratando de encontrar las excepciones.

Algunos parámetros de información solo tienen límites superiores como los niveles de partículas de desgaste o los contadores de partículas, otros parámetros de información disponen de límites inferiores, como: basicidad,

metales de aditivos y punto de inflamación. Y otros parámetros de información tienen ambos límites, como viscosidad.

Las alarmas pueden ser absolutas o estadísticas (Mayer, 2005b), las absolutas son límites condenatorios que se aplican al estado de contaminación del lubricante, y se pueden tomar las recomendaciones del fabricante del equipo, en el caso que las hubiera o en su defecto las recomendaciones del Laboratorio de Análisis de Lubricantes, mientras que las alarmas estadísticas están basadas en los propios valores registrados en el equipo. El análisis de la tendencia estadística permite identificar fallas incipientes.

5. PROCEDIMIENTO

Se seleccionó un motor de combustión interna (MCI) de encendido por compresión que está instalado en el Laboratorio de Lubricantes y Combustibles de la UNEXPO Vicerrectorado Barquisimeto, y sus especificaciones aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor

Marca: Isuzu	Relación de compresión: 17.5:1
Modelo: 4BD1	Método de lubricación: Presión por circulación
No. de cilindros: 4	Tipo de bomba de aceite: Engranajes
Desplazamiento (litros): 3.856	Tipo de filtro de aceite: Cartucho de filtro de papel
Diámetro del cilindro (mm): 102	Capacidad de aceite: 7,5 litros
Carrera (mm): 118	Tipo de bomba de agua: Centrifuga

Fuente: <http://www.diesel-engine.cn/isuzu/4bd1.htm>

El motor emplea un aceite lubricante multigrado 15W40 de la marca Venoco calidad CL-4 de base mineral, el cual cumple con los requerimientos según criterios de desempeño CATERPILLAR 1N, SEQUENCE IIIF, CUMMINS CES 20071, 20072, 20076, 20077, 20078, VOLVO VDS-2, ACEA E5/B4, MAN 3275, MB 228.3, MACK T-8 y MACK EO-M PLUS. Ver propiedades físico-químicas en tabla 2.

Tabla N° 2. Propiedades físico – químicas del aceite Venoco CI-4 / SL

Grado SAE	15W40	Índice de viscosidad	142
Gravedad específica a 15°C	0.882	T.B.N., mg KOH/gr	12
Viscosidad a 40°C, cSt	104	Punto de inflamación, °C	220
Viscosidad a 100°C, cSt	14.4		

Fuente: Industrias Venoco

El motor fué sometido a funcionamiento sin carga por un tiempo total interrumpido de 150 horas. La carga, velocidad de trabajo (rpm) y la temperatura del motor se mantuvieron constantes.

Para la toma de la muestra, inicialmente se realizó la limpieza del puerto de toma de la muestra de aceite, luego se tomó la muestra y se trasegó a un recipiente de plástico transparente de 120 ml de capacidad que cuenta con una tapa hermética. La identificación del recipiente se realiza con una etiqueta con la siguiente información: Cliente, unidad, código de la unidad, fecha de la toma, tipo de aceite, horas del aceite, horas de la unidad, observaciones relevantes sobre las características del equipo rotativo y del proceso, con el fin de que las recomendaciones que se den con respecto al estado del aceite sean los más precisas posibles.

La muestra de aceite se extrajo por el conducto donde está ubicada la varilla de medición de nivel de aceite del motor. El volumen a recolectar en cada muestra es de 110 ml y para ello se utilizó una manguera de plástico transparente, una bomba de succión tipo vampiro y un recipiente de plástico. Se estableció realizar la toma de muestra de aceite en intervalos de 15 horas y la muestra identificada con el número 1 corresponde al aceite virgen (sin uso).

Las propiedades físico-químicas seleccionadas para este estudio, son:

- Viscosidad Cinemática. Normas ASTM D 445.
- Número total de basicidad y de acidez. Normas ASTM D 4739 / ASTM D 664.
- Infrarrojo en aceites usados. Norma NVE 751: Oxidación, Agua, Sulfatación, Nitración, Combustible, Hollín.
- Contenido de metales por espectrometría. Metales de desgaste, metales de contaminación y metales de aditivo. Norma ASTM D 6595.
- Mancha de aceite.

6. RESULTADOS

En este trabajo se mostrarán las figuras correspondientes a los comportamientos de cada una de las variables en estudio y no los valores tabulados, esto por cuestiones de espacio. De requerirse mayor información, consultar (Saldivia, 2013).

En la Figura 1 se presenta la distribución de valores de viscosidad, en Centistokes, para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

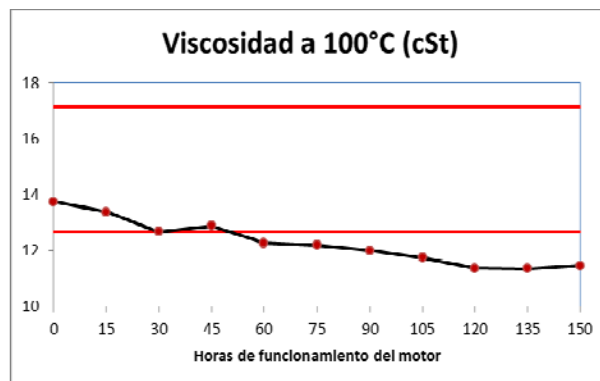


Figura 1: Valores obtenidos de viscosidad

Los resultados muestran una disminución progresiva de la viscosidad en la medida en que va aumentando el número de horas de operación del motor, incluyendo un punto de corte al transcurrir un 33% del período de prueba, aprox. (un poco por encima de las 45 horas) con la línea correspondiente al límite inferior de control. Este resultado puede ser debido a:

- Dilución con aceite menos viscoso
- Contaminación por combustible
- Rotura de polímeros por cizallamiento.
- Cizallamiento o rotura del aceite base.

Esto trae como consecuencia una disminución de la protección de las superficies metálicas y por consiguiente un incremento del desgaste de las superficies. El límite superior de control corresponde a 17,14 cSt y el límite inferior de control 12,66 cSt.

La figura 2 muestra la distribución de valores de TBN, en miligramos de Hidróxido de Potasio por gramo de aceite usado (mg HOH/g), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

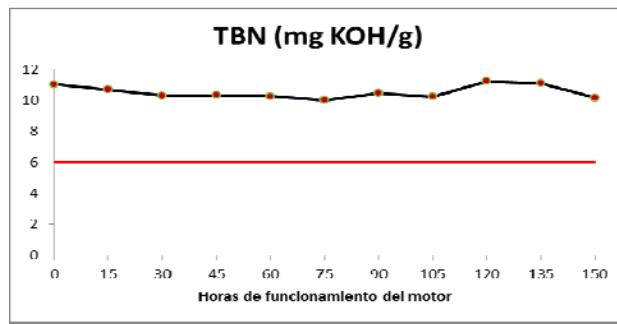


Figura 2: Valores obtenidos de basicidad

La basicidad se mantiene en valores aproximadamente constantes y alejados del valor mínimo permitido, 6, en la medida en que va aumentando el número de horas del motor. Esto es reflejo de que se mantiene la reserva alcalina del aceite lubricante el cual es un indicador de su capacidad detergente – dispersante.

La figura 3 refleja la distribución de valores de Oxidación, en (A/cm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

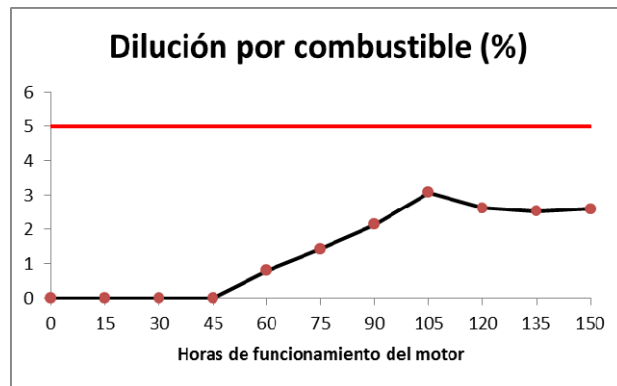


Figura 3: Valores obtenidos de dilución por combustible

A partir de las 45 horas de funcionamiento del motor, en los resultados de los análisis aparece contaminación por combustible la cual progresivamente se va incrementando sin alcanzar el máximo permitido 5%. Esta contaminación puede ser debida a problemas de inyectores (calibración o fugas), problemas de combustión (mezcla rica en combustible que no se quema totalmente), viajes cortos, marcha en vacío, etc.

En la figura 4 se presenta la distribución de valores del contenido de hollín, en (A/cm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

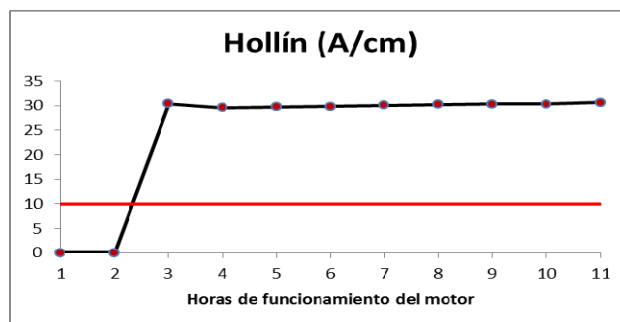


Figura 4: Valores obtenidos de contenido de hollín

Se presenta un aumento considerable de la cantidad de hollín en el aceite, lo que es un indicativo de que hay una combustión incompleta. Las consecuencias de tener un alto contenido de hollín son espesamiento del aceite y aumento de la tasa de desgaste en el motor.

La figura 5 ilustra la distribución de valores de metales por desgaste, en partes por millón (ppm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

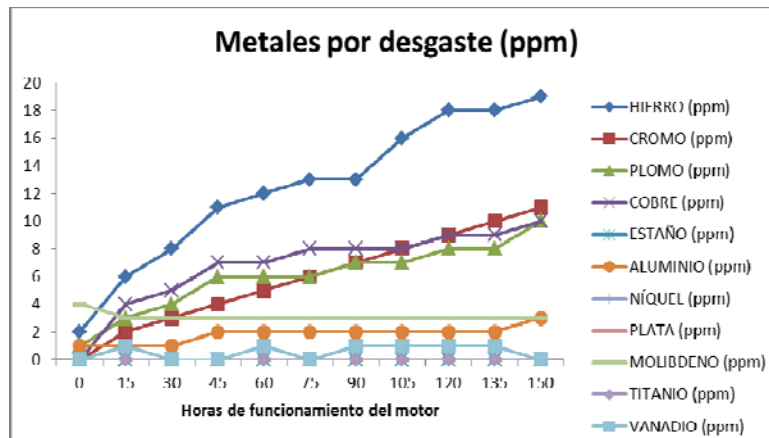


Figura 5: Valores obtenidos de metales de desgaste

Los valores máximos permisibles de metales de desgaste, en ppm, para cada uno son: Hierro 100, Cromo 15, Plomo 40, Cobre 45, Estaño 20, Aluminio 20. Se consiguen trazas de Níquel, Plata, Molibdeno y Vanadio. En el comportamiento se observa un incremento progresivo para la mayoría de los metales, lo cual es de esperarse debido a su acumulación en el tiempo, no alcanzando los valores máximos permisibles, significando que el aditivo antidesgaste está cumpliendo con su función. En otros casos hay oscilaciones muy pequeñas alrededor de un número, lo que puede ser debido a error en la precisión del equipo.

Los metales por contaminación son aquellos que ingresan al motor y provienen del medio ambiente. La figura 6 muestra la distribución de valores de metales por contaminación, en partes por millón (ppm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

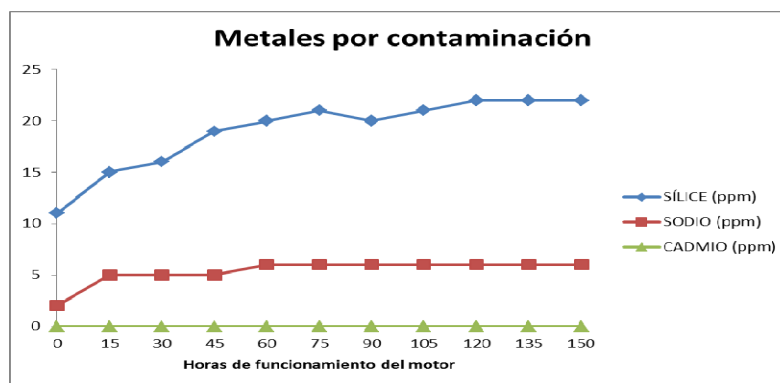


Figura 6: Valores obtenidos de metales de contaminación

Los valores máximos permisibles, en ppm, para cada uno de los metales son: Sílice 15, Sodio 30. En el comportamiento se observa un incremento progresivo, lo cual es de esperarse debido a su acumulación en el tiempo, alcanzando el sílice su valor máximo permisible. El Silicio en una muestra de aceite puede representar desgaste de sellos y estoperas, aditivos del aceite como antiespumante (por eso se requiere una muestra del aceite virgen para comparar los resultados), o ingreso de tierra por el filtro de aire o alguna parte del sistema de alimentación del aire. La tierra que ingresa actúa como lija y desgasta las camisas, los anillos y todo donde existe fricción y entra en contacto con el aceite. Este aire debe ser totalmente puro y libre de contaminantes.

Los metales por aditivos reflejan el nivel de actividad que mantienen para que el aceite siga cumpliendo con sus funciones. En la figura 7 se observan los valores de metales por aditivo, en partes por millón (ppm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor

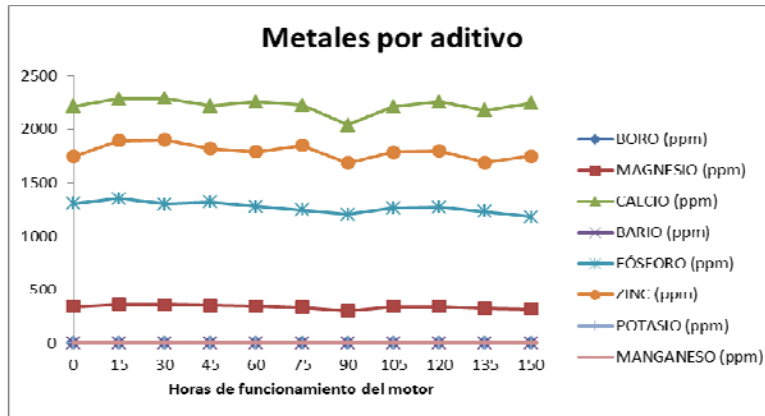


Figura 7: Valores obtenidos de metales por aditivo

Se observa que los valores obtenidos son aceptables tomando en cuenta que los valores mínimos permisibles, en ppm, para cada uno de los metales son: Calcio 1750, Zinc 1400, Fósforo 1000. Para el caso de Boro, Magnesio, Bario, Potasio, Manganese, los valores obtenidos son bajos. El Calcio y el Magnesio son aditivos detergentes/dispersantes y son utilizados para combatir el hollín, neutralizar los ácidos formados por la humedad en la combustión, mantener los contaminantes y lodos en suspensión hasta llegar al filtro, sin dejar que se aglomeren y formen grumos, ni que se adhieran a las superficies metálicas. El Zinc y el Fósforo proveen la protección antidesgaste a través de la lubricación límite formando capas para evitar el contacto metal-metal. La mayoría de la variación que se observa en el aceite usado es lo quemado o evaporado. Mientras menos hollín, menos deterioro del Zinc y el Fósforo.

Para la ejecución del ensayo de la gota de aceite se utilizó el papel de filtro Whatman #5 y con un gotero se depositaron en él dos gotas de aceite. Se sometió a un proceso de secado en una plancha eléctrica a una temperatura de 200 °C. Las manchas obtenidas se muestran en la figura 8.

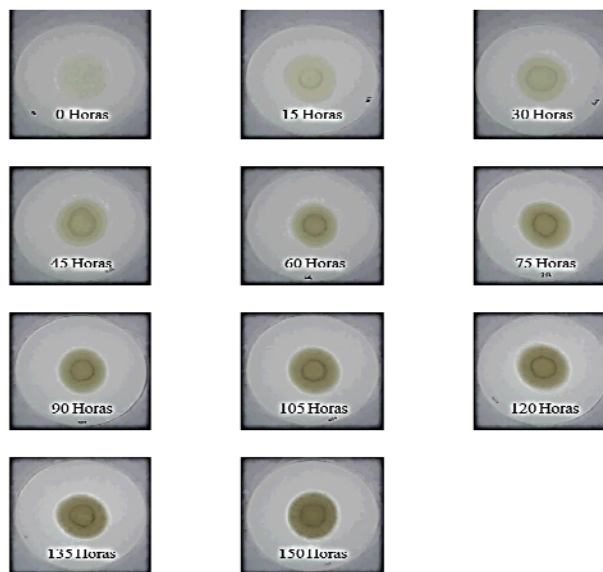


Figura 8. Resultados obtenidos con la gota de aceite.

De los resultados obtenidos de la prueba de la gota de aceite (mancha de aceite), se observa la forma progresiva en que ésta se va oscureciendo en la medida en que va aumentando el número de horas de trabajo del motor. Este comportamiento es normal debido al incremento del contenido de hollín e indica suciedad del aceite. En la parte externa de las manchas se observa un cambio en la coloración con respecto al resto de la imagen. Esto es indicativo de niveles de oxidación del aceite.

En todas las muestras de aceite usado, a partir de las 15 horas, se observa una aureola muy bien definida aproximadamente en el centro de la mancha la cual se va oscureciendo con el incremento de las horas de operación del motor. Esto representa la contaminación con combustible que tiene el aceite, coincidiendo con lo obtenido en el resultado de la dilución con combustible.

De los resultados obtenidos, evaluando en forma individual cada propiedad en función del número de horas de trabajo del motor, se tiene que las que están fuera de sus límites son la viscosidad y el contenido de hollín, y un incremento progresivo en la dilución por combustible. Estos resultados y para complementar el estudio, deben ir acompañados de un seguimiento a los parámetros operativos del funcionamiento del motor, a saber: temperatura de trabajo, carga de trabajo, revoluciones por minuto, los cuales incidirán directamente en la vida útil del lubricante, los cuales se mantuvieron constantes en el tiempo.

Las variables que están dentro de límite no representan, hasta ahora, riesgo para el funcionamiento de los componentes del motor.

Hay propiedades físico-químicas del aceite lubricante que de alguna manera modifican el comportamiento de otras, y entre ellas están:

1. Contenido de combustible y viscosidad. Ver figura 9.

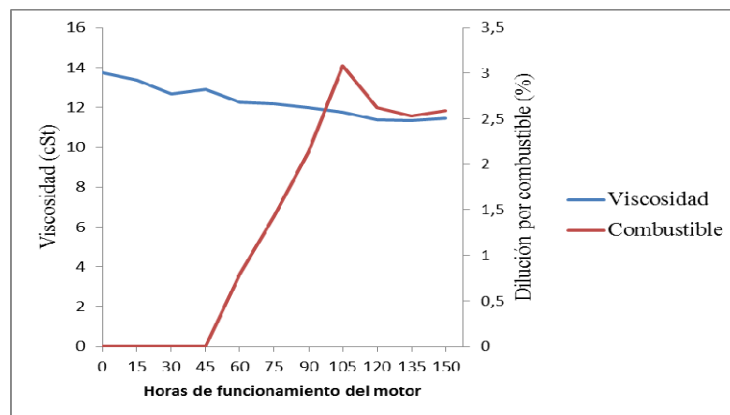


Figura 9: Viscosidad y Dilución por combustible vs. Horas de operación

En la medida que aumenta el contenido de combustible, sin exceder el máximo permisible 5%, en las muestras de aceite en función de las horas de trabajo, se presenta una disminución en la viscosidad que está por debajo del valor mínimo permisible 12.66 cSt. Esto debido a que como el combustible es compatible con el aceite lubricante mineral, actúa como un diluyente lo que debilita la estabilidad de la película lubricante.

2. La figura 10 muestra el contenido de combustible y su incidencia en el contenido de hollín en el aceite lubricante en función del número de horas de operación del motor.

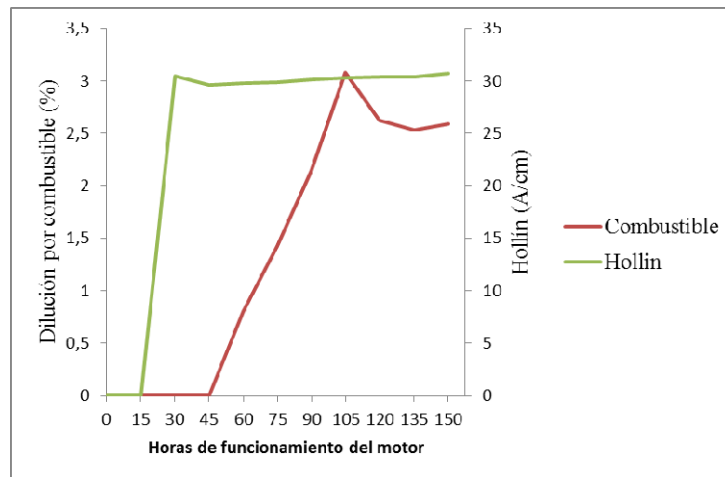


Figura 10: Dilución por combustible y Hollín vs. Horas de operación

La combustión que se está presentando en el motor es incompleta ya que aparecen en el aceite trazas o restos del combustible utilizado, en este caso Diesel. Un elevado contenido de hollín es el resultado de este comportamiento. Aunque el contenido de hollín es uno de los factores que incrementa la viscosidad del aceite lubricante, se tiene que ésta disminuye debido a que el efecto del contenido de combustible es mayor.

3. Viscosidad y contenido de metales de desgaste

La figura 11 muestra la viscosidad (estabilidad de la película lubricante) y su incidencia en el contenido de los metales de desgaste más representativos en el aceite lubricante en función del número de horas de operación del motor.

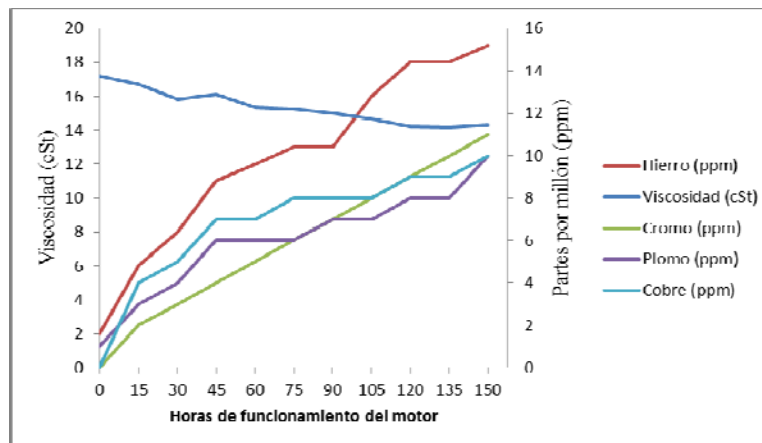


Figura 11: Viscosidad y metales de desgaste vs. Horas de operación

En la medida que transcurre el funcionamiento del motor se observa un comportamiento lógico en cuanto al incremento del contenido de los metales de desgaste hasta valores que se consideran aceptables. También se observa una disminución de la viscosidad del aceite lubricante la cual es considerada la principal propiedad.

CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos se puede establecer que el control parámetros de seguimiento, características físico-químicas y de la concentración de metales del aceite lubricante en los aceites usados a través del control estadístico de tendencias, permite la detección temprana de niveles de contaminación; determinando el periodo de relleno o reemplazo del aceite lubricante en el motor Diesel.

- La disminución de la viscosidad por debajo del valor mínimo permisible es un indicio del debilitamiento en la estabilidad de la película lubricante y por ende, deficiencia en la protección de las superficies metálicas, sin embargo, el reporte del contenido de metales por espectrometría refleja que todos los metales se encuentran por debajo de sus valores máximos permisibles, lo que indudablemente establece que no se ha visto afectada la acción del aditivo antidesgaste.
- A través de los resultados obtenidos se han detectado problemas en la combustión del motor debidos al exceso de combustible que no se quema y pasa a contaminar el aceite lubricante con la consecuencia reflejada en la disminución de la viscosidad y por ende, la disminución de la protección sobre las superficies de los metales de los elementos de máquinas que están en movimiento. Por ello, es conveniente efectuar una calibración de los inyectores y la bomba de inyección para corregir posibles anomalías.
- La técnica de mantenimiento predictivo utilizada, análisis de aceite, constituye un meticuloso chequeo de los sistemas vitales de la máquina, en el que se analiza el aceite del motor y ofrecen avisos con antelación, lo que le da tiempo para cambiar componentes antes de que causen problemas y otros daños.

7. REFERENCIAS

- Albarracín, P. (1993). “Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz”, Tomo I, 2da. Edición. Colombia.
- Cesáreo, F. (1998) “Tecnología del Mantenimiento Industrial”. Servicio de Publicaciones, Universidad de Murcia. España.
- Fitch, J. Trad: Trujillo, G. (2002). “Guía de procedencia de elementos para aceite usado”. Ed. Noria. México.
- González, F. (2005). “Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado”. 2 ed. Fundación Confemetal. España.
- Mayer, A. (2005). “Set Oil Analysis Limits Correctly”. *Revista Practicing Oil Analysis*. Noria Corporation
- Saldivia, F. (2013). “Comportamiento de las propiedades físico-químicas de un aceite lubricante usado en un motor de combustión interna”. *Trabajo de ascenso*. UNEXPO Barquisimeto.
- Troyer, D., Fitch, J. (2004). “Oil Analysis Basics”. Noria
- Trujillo, G. (Abril - Mayo 2007). “Análisis de aceite, una estrategia proactiva y predictiva”. *Revista Machinery Lubrication en Español*. Noria Corporation.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.