

Análisis de Aceite de los Motores Diesel de un Buque Pesquero para Mantenimiento Predictivo

Carlos Chávez Venegas¹, Ing. Jorge Félix Navarrete²

¹Estudiante, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP); Especialización: Termodinámicos
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador

²Profesor, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP)

¹carlos.chavez@petroceano-mobil.com

Resumen

Este estudio trata sobre la optimización del consumo de lubricantes en las máquinas de propulsión y generadores auxiliares de una embarcación pesquera mediante la evaluación de los resultados de los análisis del aceite lubricante, que a su vez sirve como herramienta de mantenimiento predictivo.

El seguimiento de los parámetros de control de los aceites lubricantes nos ayudó a determinar los efectos del deterioro en la lubricación de los equipos y el aumento de los contaminantes en el aceite, lo que permitió determinar las causas de las condiciones de operación de los equipos. Con el control realizado se emitieron las recomendaciones de corrección de operación y mantenimiento, y su posterior seguimiento.

Con la información obtenida se determinó el intervalo de cambio de aceite lubricante que los equipos se pueden operar sin inconvenientes, y mejorar el desempeño disminuyendo el consumo de lubricantes. Las gráficas de control de los elementos de desgaste nos permiten predecir cual es el comportamiento que mantienen los equipos y nos permiten emitir alertas de control cuando se superan las tendencias de operación de los equipos.

Palabras clave: propulsión, generadores, predictiva, aceite, mantenimiento.

Abstract

This study is about lubrication oil consume optimization in main propulsion engines and power generators in a fishing vessel using lube oil analysis tracking as a predictive maintenance tool.

These tracking control parameters in used lub oils helped us to determine wear effects in engine lubrication and how lube contamination agents increases, and also help us to find causes of engine operation conditions. With this control carried out recommendations of maintenance and operative corrections were emitted, and later tracking.

With this information we find out the equipment lubrication oil drain period and improve the performance decreasing the lubricants consume. The control graph of wear elements allow to predict the wear performance in equipments and allow us to emit control alerts when the operation equipments tendencies increase over the average.

Key Words: propulsion, generators, predictive, oil, maintenance.

1. Introducción

El presente trabajo trata sobre la utilización de los resultados de los análisis de aceites lubricantes en motores de combustión interna como herramienta predictiva de mantenimiento y control.

Se toma como objeto de estudio una embarcación pesquera con cuatro motores, en el que se desarrolla un programa de seguimiento que permite establecer condiciones de operación en los motores, además nos permiten realizar correcciones preventivas y así evitar el deterioro anticipado de los equipos.

2. Mantenimiento Predictivo

Consiste en predecir la ocurrencia de fallas en los equipos, y ejecutar acciones preventivas sin perjuicio al servicio, operación o producción. Estos controles se realizan de manera periódica o continua, dependiendo del tipo de maquinaria, condiciones de operación, edad del equipo o periodos de inspección.

Realizando inspecciones sobre los componentes mecánicos, se pueden diagnosticar tendencias de desgaste de los componentes. Información que permite predecir la operación de los mismos ayudando al control de mantenimiento y mejora en la operación.

2.1 Análisis de Aceites Lubricantes

La evaluación de los análisis de aceite lubricante sirve para controlar las propiedades físicas y químicas de operación del lubricante, como son la viscosidad, alcalinidad, contaminantes como agua, hollín, lodos, etc., punto de inflamación, dilución por combustible en el caso de motores. Estos datos nos ayudan a saber si el producto utilizado mantiene las propiedades y es apto para continuar en servicio. Además el análisis espectrográfico con el que se obtienen los datos de los metales de desgaste, permite determinar cual componente o componentes mecánicos de un equipo se están desgastando de una manera anormal.

3. Los Lubricantes

Como aceite lubricante se conoce a cualquier elemento que reduce el rozamiento entre dos cuerpos en movimiento, y que son resultado de la separación de los subproductos de la destilación del petróleo. A partir de su refinación se obtienen las bases lubricantes, utilizadas en la fabricación de los aceites que para protección y lubricación de componentes.

3.1 Características Físicas y Químicas de los Lubricantes

Los aceites lubricantes usados en motores de combustión interna, deben cumplir con las propiedades

que permiten el correcto desempeño de los equipos. A continuación se detallan las principales propiedades de los aceites:

Viscosidad, determina la resistencia de un líquido a fluir. La unidad de medida de la viscosidad cinemática de los aceites lubricantes en el sistema internacional se da en centistokes o mm^2/s o (cst).

Índice de Viscosidad, mide la tasa de cambio de viscosidad en función a la temperatura, y se refleja como el valor correspondiente a este índice, ya que un valor alto representa una mejor resistencia del aceite lubricante a la temperatura.

Densidad, corresponde al valor de masa por unidad de volumen en función de la temperatura, y en el caso de los aceites lubricantes se expresa siempre a 15.6°C .

Punto de Inflamación, se conoce como la temperatura más baja a la cual se producen suficientes vapores, que permiten iniciar la ignición del aceite lubricante cuando se aplica una llama.

Punto de Fluidez, se conoce como la temperatura más baja a la que un fluido se moverá cuando haya sido enfriado.

TAN, representa la acidez total, y corresponde a los ácidos orgánicos que se forman.

TBN, indica la alcalinidad del aceite, y corresponde a la reserva alcalina para combatir los ácidos generados por la combustión dentro de los motores.

Ceniza Sulfatada, es el residuo final de la incineración del aceite expuesto al ácido sulfúrico, y que expresa peso en porcentaje del material metálico proveniente de los aditivos.

Resistencia a la Oxidación, es la resistencia que un aceite lubricante opone a reaccionar con el oxígeno y formar compuestos oxidados.

Demulsibilidad, es la capacidad que tiene un aceite lubricante de separarse del agua que lo contamina y mantener en suspensión el agua residual.

3.2 Los Aditivos

Las bases lubricantes no mantienen las propiedades suficientes para proteger de la fricción a cualquier elemento, por lo que es necesario que se mezclen con aditivos para mejorar las propiedades físicas y químicas del aceite. Estos aditivos se clasifican por la acción que desempeñan:

Aditivos de Protección de Superficies, que trabajan directamente sobre las superficies en contacto y evitan el deterioro de las mismas, tales como los agentes anti-desgaste, extrema presión, inhibidores de corrosión y herrumbre, detergentes, dispersantes y modificadores de fricción.

Aditivos de Desempeño, mantienen el desempeño del aceite a pesar de los cambios de temperatura y condiciones de operación de los mismos, tales como los mejoradores del punto mínimo de fluidez y el mejorador del índice de viscosidad.

Aditivos para Proteger al Lubricante, lo protegen del medio en que se desenvuelve y de los contaminantes de los procesos de trabajo que afectan el aceite, tales como los antioxidantes, antiespumantes y demulsificantes.

4. Tribología

La tribología es definida como la ciencia del estudio de la fricción, que investiga la interacción entre dos superficies en contacto y en movimiento relativo, interacción que se manifiesta como fricción y se relaciona implícitamente con el desgaste mecánico.

A la fricción se la conoce como la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o rodamiento que experimenta un cuerpo al moverse tangencialmente sobre otro con el que esta en contacto.

El desgaste esta definido como el daño de superficie o remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo, ya sea por deslizamiento, rodamiento o impacto.

5. Parámetros de Control de los Aceites Lubricantes Usados

Los aceites lubricantes son fabricados para desempeñar las funciones de reducción de la fricción y desgaste, transferencia de potencia, control y remoción de contaminantes, protección de equipos contra humedad y ácidos, entre las principales acciones que un aceite puede realizar.

En otros casos la excesiva contaminación o degradación química son causa de problemas, por lo que la manera más efectiva de detectar estos problemas es realizando análisis del aceite lubricante, que permite identificar las causas de la degradación del aceite y nos da un camino a seguir en la investigación de la causa raíz.

Los rangos de control son establecidos por cada fabricante de aceites, para que mantenga las condiciones requeridas para seguir operando sin generar fallas hacia el equipo lubricado. Estos valores se encuentran refrendados con la mayoría de diseñadores y fabricantes de equipos.

Las muestras de aceite son remitidas al laboratorio para que se realice el análisis correspondiente y permita determinar el comportamiento del aceite lubricante de la máquina en estudio, el análisis también nos informa del porcentaje de los metales de desgaste. Con esta información se puede determinar la tendencia de desgaste producido en el equipo. Con el uso de la estadística se pueden determinar patrones comportamiento del desgaste y poder estimar el grado de desgaste de las partes en función a las horas de operación en cada equipo.

Las pruebas que se realizan en laboratorio para verificar el desempeño del aceite usado son las siguientes.

5.1 Viscosidad

Es el principal parámetro que se mide al analizar los aceites en laboratorio y se considera el principal indicador del desempeño del mismo. La viscosidad se mide tratando de evaluar su trabajo a temperatura real de operación. En el caso de los motores se realiza la medición a 100°C. que es la temperatura más cercana a la del depósito de aceite en el carter de un motor.

El aceite que se utiliza en un motor debe tener condiciones mínimas para continuar operando hasta el final de su tiempo de trabajo, y debe permanecer entre 12.0 y 18.0 centistockes a 100°C. durante toda su vida útil.

5.2 Insolubles

Representan la cantidad de elementos no solubles en pentano y hexano que se encuentran presentes en el aceite lubricante de un motor. Sus resultados nos indican la cantidad de elementos duros producidos en la combustión como el hollín y lodos, los cuales no se disuelven en el solvente.

El indicador de insolubles nos permite tener una idea de la cantidad de sólidos que se pueden convertir en abrasivos si su cantidad aumenta de tal manera que los aditivos dispersantes en el aceite no los pueden mantener separados.

5.3 TBN

Es la habilidad de neutralizar los productos ácidos de la combustión tales como el ácido sulfúrico, que se forman por la mezcla y reacción del azufre contenido en el combustible.

Su medida indica el grado de reserva alcalina presente en el aceite y refleja el comportamiento del aceite en función a la acumulación de los ácidos de la combustión.

5.4 Agua

Los aceites pueden contener agua disuelta, emulsionada o en forma libre al trabajar en un motor, que ingresa ya sea por goteo del sistema de enfriamiento, condensación o contaminación directa al motor.

Bajo condiciones normales no se debería encontrar agua en ningún sistema de lubricación, pero de encontrarse se debe buscar la vía de ingreso de la misma, al mismo tiempo que se deberá usar el separador centrífugo si se dispone o en otro caso el drenaje de la carga de aceite contaminado.

5.5 Dilución por Combustible

Se mide así el porcentaje de elementos volátiles en el aceite, que se presume corresponden a la contaminación por combustible que pasa al carter o

que se introduce por mala combustión. Esta dilución no debe ser superior al 5% en porcentaje de peso.

5.6 Oxidación

Es el efecto de mezcla del aceite lubricante con el oxígeno que hace que el aceite se oxide y cambie su estado de alcalinidad, ya que se generan ácidos débiles por la degradación del aceite y disminuye la vida útil del aceite. La oxidación contribuye a la formación de lodos y barnices en el motor, generando un aumento de la viscosidad.

5.7 Metales de Desgaste

Los motores generan partículas microscópicas de desgaste durante su vida operativa, ya que a pesar de la acción de los aceites en protegerlos, su esfuerzo mecánico genera pérdida de material. El proceso se produce por deformación o remoción de materiales sobre las superficies que interactúan los componentes. El análisis de la forma de las partículas de desgaste, tamaño, concentración, proveen información que se puede asociar a los elementos metálicos en que se produce el desgaste.

Una vez que los equipos han pasado el periodo de asentamiento o ajuste, le sigue un largo periodo de desgaste normal o controlado, en el que las partículas de desgaste generalmente son menores a 10 micrones en tamaño, por lo que al medirlos se puede evaluar la operación del equipo.

El control de los metales de desgaste, se considera el parámetro de seguimiento más importante después de la viscosidad, ya que nos refleja el desempeño y desgaste de las partes de los equipos.

6. Características Principales de los Motores Diesel Marinos

Para el desarrollo del trabajo se toma como elemento de estudio a un barco con capacidad de captura de 1200 toneladas métricas de pescado, construido en España con equipos y sistemas de Pesca para realizar faenas de hasta 3 meses de duración.

Cuenta con dos motores para el sistema de propulsión marca Echevarria 16V23L-VO con 2450 hp. cada uno. La generación de poder eléctrico se realiza a través de generadores acoplados a un motor Echevarria 6T23LH y a un motor Burmeister & Wain 8T23LH. Estos se conocen como Generadores de Babor y Estribor respectivamente.

Los motores principales como los generadores, mantienen depósitos de aceite con sistemas de recirculación para centrifugar el aceite y remover la mayoría de residuos sólidos y agua disueltos en el aceite.

Las horas de trabajo promedio año para cada máquina principal están por el orden de 4500

horas/año. En el caso de los generadores este tiempo esta por el orden de las 7000 horas/año trabajadas.

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de operación del sistema de circulación de aceite.

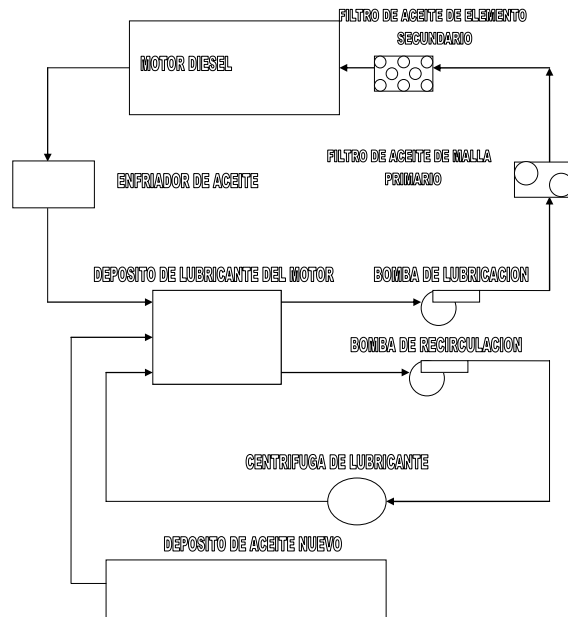


Figura 1. Esquema sistema de circulación de aceite

7. Proceso de Diagnóstico

7.1 Toma de Muestras

Para extraer las muestras de aceite se utiliza una bomba de succión, que nos permite extraer el aceite desde el carter o depósito principal sin la necesidad de detener al equipo.

Para lograr que la muestra de aceite contenga la información requerida se deben seguir los siguientes pasos:

La muestra de aceite se debe tomar cuando el motor se encuentre a la temperatura de operación.

Al tomar la muestra cuando se realiza el drenado, el tiempo máximo para la toma de muestra no debe superar la media hora posterior a la detención del equipo.

Los instrumentos de recolección de aceite se deben encontrar limpios y libres de humedad.

Siempre se debe tomar las muestras de aceite en el mismo lugar del equipo.

Los lugares recomendados para la muestra de aceite son el fondo de carter, la línea de aceite antes del filtro purificador, la línea de aceite antes de la bomba de succión de producto o a través del conducto que contiene la sonda de medición del nivel de aceite en el carter.

En los motores de carter seco, la muestra se tomará de la parte inferior del depósito de aceite una vez que el aceite logre su temperatura de operación.

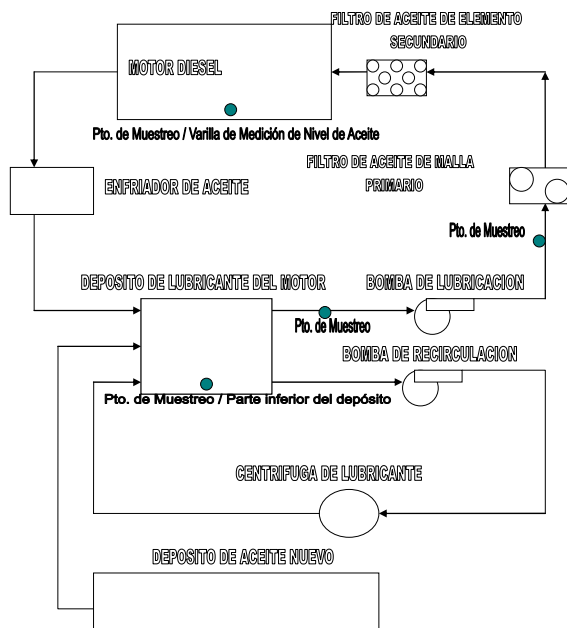


Figura 2. Puntos de muestreo de aceite

7.2 Evaluación Sensible

La evaluación sensible es un proceso de análisis de las muestras recibidas en las que se revisan los siguientes elementos antes de enviar las muestras al laboratorio:

Apariencia Visual, en que se determinan condiciones perceptibles a la vista como la coloración del aceite usado, que no presente sólidos ni acumulación excesiva de hollín, formación de lodos por la presencia de polvo y agua, o emulsión del aceite por el exceso de agua en el mismo.

Viscosidad, se utiliza un comparador de viscosidad entre el aceite nuevo y el usado para determinar de una manera sencilla si el producto mantiene sus condiciones operativas.

Agua por Crepitación, o agua a la plancha, al exponer el aceite sobre una superficie caliente por sobre los 100°C. el agua se evapora rápidamente y produce chasquidos en su evaporación que permite determinar si existe agua en el aceite en una proporción superior al 0.05% en peso.

7.3 Análisis de Laboratorio

Las siguientes son las pruebas básicas de laboratorio que permiten realizar una evaluación de la calidad del aceite usado:

Análisis de la Viscosidad, se utiliza la norma de evaluación a 100°C. para los motores utilizando viscosímetros para medirla, y se utilizan los límites de viscosidad fijados por el grado SAE del producto para saber si puede trabajar correctamente. La dilución por combustible prácticamente en todos los casos que se presenta causa una reducción de la viscosidad, siendo

condenatorio para el producto si ha perdido hasta una 20% de su viscosidad original.

Análisis de los Insolubles, evidencian la presencia de elementos no solubles en hexano tales como hollín lodos, o componentes metálicos, que son obtenidos al filtrar la muestra por una membrana a 0.3µm. La mayor parte de los depósitos son el resultado de la polimerización del combustible no quemado y de la oxidación del aceite al estar expuesto a temperaturas elevadas.

Análisis del TBN, se determina a partir de la neutralización de la base alcalina encontrando el equivalente en mg. de KOH para igualar la alcalinidad de la muestra, y representa la reserva de aditivo remanente o en disponibilidad para ser utilizado. Determina el desempeño del aceite y si es posible que pueda seguir trabajando en el motor.

Análisis del Agua, se determina la cantidad de agua al exponer una muestra de aceite a la luz infrarroja, que un instrumento sensible a la emisión puede determinar la cantidad de energía reflejada en función de la longitud de onda, y determinar con ello la presencia de agua y la cantidad.

Análisis de la Dilución por Combustible, de la misma manera que en el caso del agua, se evalúa la muestra de la misma manera y nos permite determinar la presencia de combustible y la cantidad.

Análisis de la Oxidación, se realiza el mismo proceso que para el agua y combustible, pero se concentra en la absorción de energía por los elementos opacos a la luz, como lo son los productos de la combustión oxidados y que absorben la energía radiada.

Análisis por Espectrometría, se basa en la propiedad de excitación que tienen los átomos, que liberan radiación al ser excitados en longitudes de onda características a cada elemento, y dependiendo de su concentración se determina la cantidad presente de cada elemento en la muestra.

Al revisar en conjunto los análisis nombrados anteriormente se puede determinar las condiciones de trabajo del aceite y el desempeño del mismo en el equipo.

7.4 Tabla de Datos

En la tabla de datos primero se encuentra la condición básica de la muestra evaluada en su apariencia física, y siguen los identificadores de la muestra tales como fecha y horas de trabajo, contaminantes del aceite y finalmente los metales de desgaste. Estos análisis forman parte del grupo de pruebas que permiten evaluar las condiciones de operación tanto de equipos como de aceite en operación.

Al levantar la información de todas las muestras evaluadas en los equipos, se toman en cuenta de manera especial los datos que superan los límites establecidos, estos cambios de comportamiento en los

parámetros se los grafica en tendencias, que nos permiten visualizar el grado de la variación.

La Tabla 1 muestra los datos que se usaron para la evaluación de la información.

Tabla 1. Tabla de datos tipo

Ensayo	Método ASTM	Límites de Servicio
Apariencia	Visual	Normal
Fecha de muestreo		
Tiempo de servicio del aceite (horas)		
Viscosidad (cst @ 100 C)	D-445	12.0 A 18.0 cst
Insolubles en 0.3 um (% peso)	M-490	Máximo 3.0 %
TBN mg de KOH		Mínimo 7.0
Agua (% en peso)	M-1067	Máximo 0.3%
Dilución por combustible (% Peso)		Máximo 5 %
Oxidación, 5.8 A/CM	M-1067	Máximo 20
Metales de desgaste (ppm)	M-1011	
Hierro		Máximo 125 ppm
Cobre		Máximo 50 ppm
Silicio		Máximo 25 ppm
Aluminio		Máximo 20 ppm

7.5 Definición de los Problemas Operacionales

Al evaluar los datos tomados, en cada equipo se definen los siguientes problemas:

Máquina Principal de Babor, se detectaron los siguientes problemas: baja viscosidad por dilución debido a un goteo de la línea de suministro de combustible, incremento de la viscosidad por mala operación de la centrífuga de aceite, disminución de la viscosidad por una atomización incorrecta de los inyectores.

Máquina Principal de Estribor, se detectaron los siguientes problemas: viscosidad elevada por mala combustión y aumento de la presencia de hollín, incremento de la viscosidad por mala operación de la centrífuga de aceite, disminución de la viscosidad por atomización incorrecta de los inyectores, falta de limpieza en la centrífuga de aceite.

Máquina Auxiliar de Babor, viscosidad elevada por mala combustión y aumento del hollín, aumento de viscosidad por falta de limpieza de la centrífuga, falla en la atomización de los inyectores.

Máquina Auxiliar de Estribor, en este equipo no se reportaron problemas en la operación.

8. Recomendaciones y Mejoras Implementadas en las Máquinas

Para realizar las recomendaciones puntuales en base a los resultados de los análisis de aceites librantos usados, se evaluaron las condiciones que dieron lugar a fallas de operación. Con este proceso de revisión de resultados de laboratorio e investigación posterior de las condiciones operativas, se establecieron recomendaciones de trabajo de mantenimiento, que ayudaron a mejorar el desempeño de las máquinas, y el control del consumo de combustible.

8.1 Acciones Operativas de Mejoramiento

En la máquina principal de babor, en base a la información de los análisis se realizó una inspección exhaustiva, buscando en el sistema de inyección para encontrar los puntos por los cuales se producía el goteo de combustible, sea esto por los inyectores, toberas, o líneas de combustible, que producían dilución o mala combustión. Después de repetidas fallas a pesar de la calibración de los inyectores se realizó el recambio del kit de mantenimiento de los mismos. Se trabajó con la limpieza de la purificadora y el control de la operación para lograr que elimine la mayor cantidad de carbón residual, lodos y depósitos disueltos en el aceite para evitar su acumulación.

En la máquina principal de estribor, se comenzó atendiendo la acumulación del hollín revisando el sistema de inyección, calibrando inyectores, y realizando una limpieza adecuada de la centrífuga de aceite para lograr que disminuya la cantidad de hollín disuelto. Posteriormente continuó la falla en la atomización correcta de los inyectores por lo que se realizó nuevas calibraciones hasta lograr que atomicen adecuadamente. Conjuntamente con ello fue necesario realizar mantenimiento a la centrífuga de aceite y revisión continua de los discos de gravedad para lograr mejorar su operación.

En el motor auxiliar de babor, el problema repetitivo era la acumulación de hollín y aumento de viscosidad en el aceite, por lo que fue necesaria la calibración de los inyectores y continuar con la limpieza de la centrífuga.

En el motor auxiliar de estribor, no se encontraron problemas de funcionamiento que afectaran el desempeño del aceite.

8.2 Reevaluación de Datos

Al revisar nuevamente los datos obtenidos y graficando los resultados con referencia a las horas de trabajo del aceite, se logra establecer y la tendencia que mantienen las variables controladas.

Con el establecimiento de las curvas de tendencia, y a través de la evaluación matemática de las mismas contra los límites de control, se pudo establecer el periodo de cambio de aceite de acuerdo a las condiciones de trabajo.

El mismo proceso se siguió para analizar los metales de desgaste, con lo que se pudo estimar la tasa de desgaste contra la cuál se pueden evaluar los resultados obtenido en el laboratorio del desempeño del equipo.

Al sumar los resultados iniciales de las condiciones del aceite y las condiciones de desgaste a partir de las partículas encontradas en el aceite usado, se pudo emitir criterios de trabajo y no solamente compararlos contra los límites de control, sino contra las curvas de operación estimadas para cada motor.

Para el ajuste de las curvas se utilizó el método de Mínimos Cuadrados para cada uno de los parámetros estudiados, pero en el caso específico del TBN fue necesaria realizar una linealización a partir del método de Regresión Curvilínea, debido a que el comportamiento del TBN presenta un esquema de tipo logarítmico.

A continuación se encuentran las ecuaciones matemáticas.

Curvas del motor principal de babor.

$$\text{Viscosidad} = 13.07 + (0.000873 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{TBN} = 14.46174259 * (0.99988275)^{\text{Horas Trabajo}}$$

$$\text{Hierro} = 6.57 + (0.0039009 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Cobre} = 2.19 + (0.0004109 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Silicio} = 5.44 + (0.0002208 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Aluminio} = 2.31 + (0.0006604 * \text{Horas Trabajo})$$

Curvas del motor principal de estribor.

$$\text{Viscosidad} = 13.50 + (0.002411 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{TBN} = 13.1821876 * (0.999954154)^{\text{Horas Trabajo}}$$

$$\text{Hierro} = 9.31 + (0.0069861 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Cobre} = 3.01 + (0.0003688 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Silicio} = 7.75 + (0.0004422 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Aluminio} = 1.01 + (0.0031655 * \text{Horas Trabajo})$$

Curvas del motor auxiliar de babor.

$$\text{Viscosidad} = 16.44 + (0.000194 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{TBN} = 15.31660445 * (0.999860119)^{\text{Horas Trabajo}}$$

$$\text{Hierro} = 6.76 + (0.0029249 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Cobre} = 2.36 + (0.0002449 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Silicio} = 9.46 - (0.0016039 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Aluminio} = 2.36 + (0.0011492 * \text{Horas Trabajo})$$

Curvas del motor auxiliar de estribor.

$$\text{Viscosidad} = 13.97 + (0.000509 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{TBN} = 13.86484804 * (0.999971073)^{\text{Horas Trabajo}}$$

$$\text{Hierro} = 9.66 - (0.0005461 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Cobre} = 0.69 + (0.0002419 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Silicio} = 1.90 + (0.0055585 * \text{Horas Trabajo})$$

$$\text{Aluminio} = 2.06 + (0.0010984 * \text{Horas Trabajo})$$

8.3 Programa de Control

Una vez que se revisó el esquema de cada uno de los parámetros de control de cada uno de los motores, conjuntamente con el comportamiento de la tasa de desgaste de los equipos se pudieron determinar los siguientes lineamientos de control:

En los motores principales se deben tomar muestras cada 1000 horas de trabajo del aceite, y en los auxiliares las muestras deben tomarse cada 500 horas después de las 1000 horas de operación.

El control del consumo del aceite debe registrarse para verificar si existe aumento del mismo.

Las muestras de aceite deben ser extraídas siempre en el mismo lugar.

El drenaje del aceite en los motores principales debe realizarse a las 3000 horas de operación, en los auxiliares a las 2500 horas de operación.

Hacer seguimiento al funcionamiento de los sistemas de inyección para evitar la generación y acumulación de hollín.

9. Análisis de Resultados

Al revisar los datos obtenidos se puede estimar el funcionamiento de los motores y confirmar al operador del equipo cuales son las recomendaciones sobre la operación y mantenimiento a fin de mejorar el desempeño de las máquinas.

Máquina Principal de Babor

- La viscosidad para un periodo de cambio a 4500 horas se estima en 17 cst. @ 100°C.
- El TBN a 4500 horas se estima a 8.53 mg. de KOH.
- La acumulación de hierro como desgaste metálico se estima en 24 ppm. a las 4500 horas.
- La acumulación de cobre como desgaste metálico se estima en 4 ppm. a las 4500 horas.
- La acumulación de silicio por ingreso de polvo se estima en 6 ppm. a las 4500 horas.
- La acumulación de aluminio como desgaste metálico se estima en 5 ppm. a las 4500 horas.

De acuerdo a la presencia de hierro en las diferentes partes de la máquina se estima la cantidad de hierro a desgastar, los que nos permite determinar el valor máximo de desgaste.

Utilizando los datos de diámetros de cilindro nuevo y el estimado a 50000 horas, la carrera del pistón, número de cilindros, densidad del hierro y volumen del carter, se estima lo siguiente:

$$\text{Volumen Total Hierro 16 cilindros: } 0.0017002 \text{ m}^3$$

$$\text{Hierro: } 0.2652 \text{ kg./ 1000 horas}$$

Tomando la relación de la concentración de hierro para la totalidad del aceite en circulación.

$$\text{Hierro: } 141.57 \text{ ppm./ 1000 horas}$$

Tomando en cuenta que el desgaste no se produce en la totalidad de la circunferencia sino solamente en la cuarta parte, el valor a obtener sería de:

$$\text{Hierro: } 35.39 \text{ ppm./ 1000 horas}$$

Contra este resultado, comparando el obtenido en la curva de desempeño del equipo se puede tener la certeza de que la protección del aceite es adecuada para los requerimientos del equipo.

Máquina Principal de Estribor

- La viscosidad para un periodo de cambio a 4500 horas se estima en 24.3 cst. @ 100°C.
- El TBN a 4500 horas se estima a 10.72 mg. de KOH.
- La acumulación de hierro como desgaste metálico se estima en 41 ppm. a las 4500 horas.
- La acumulación de cobre como desgaste metálico se estima en 5 ppm. a las 4500 horas.
- La acumulación de silicio por ingreso de polvo se estima en 10 ppm. a las 4500 horas.
- La acumulación de aluminio como desgaste metálico se estima en 15 ppm. a las 4500 horas.

Con los mismos datos mecánicos de la máquina principal de babor, se tiene el mismo valor de presencia de hierro.

$$\text{Hierro: } 35.39 \text{ ppm./ 1000 horas}$$

Contra este resultado, comparando el obtenido en la curva de desempeño del equipo se puede tener la certeza de que la protección del aceite es adecuada para los requerimientos del equipo.

Máquina Auxiliar de Babor

- La viscosidad para un periodo de cambio a 3000 horas se estima en 15.85 cst. @ 100°C.
- El TBN a 3000 horas se estima a 10.07 mg. de KOH.
- La acumulación de hierro como desgaste metálico se estima en 16 ppm. a las 3000 horas.
- La acumulación de cobre como desgaste metálico se estima en 3 ppm. a las 3000 horas.
- La acumulación de silicio por ingreso de polvo se estima en 5 ppm. a las 3000 horas.
- La acumulación de aluminio como desgaste metálico se estima en 6 ppm. a las 3000 horas.

Máquina Auxiliar de Estribor

- La viscosidad para un periodo de cambio a 3000 horas se estima en 15.50 cst. @ 100°C.
- El TBN a 3000 horas se estima a 12.71 mg. de KOH.
- La acumulación de hierro como desgaste metálico se estima en 8 ppm. a las 3000 horas.
- La acumulación de cobre como desgaste metálico se estima en 1 ppm. a las 3000 horas.
- La acumulación de silicio por ingreso de polvo se estima en 19 ppm. a las 3000 horas.
- La acumulación de aluminio como desgaste metálico se estima en 5 ppm. a las 3000 horas.

10. Conclusiones y Recomendaciones

De los resultados obtenidos se puede establecer que el control de los parámetros de seguimiento en los aceites usados, permite realizar modificaciones o reparaciones en los motores, que mejoran las condiciones de operación y por consiguiente ayudan a los equipos a trabajar en condiciones óptimas.

Al revisar las condiciones de desgaste en las máquinas principales, se estimó de manera teórica la proporción de desgaste a encontrar, y contra este valor se puede comparar los resultados de la tendencia de crecimiento del desgaste por las horas de trabajo del equipo.

Al revisar las tendencias, se pudo determinar los parámetros normales de operación, que al compararlos con los límites de control, encontramos que los límites de desgaste de metales y contaminación de polvo corresponden a valores inferiores a los que se reportan como condiciones críticas de operación.

Revisando el conjunto de tendencias se estiman los valores de los parámetros evaluados, comprobando la propuesta de racionalización de lubricantes presentada, y adicionalmente se obtienen los valores estimados para el final de la evaluación.

Al concluir la evaluación sobre la operación de las máquinas diesel en un barco pesquero se establecen las siguientes recomendaciones:

- Efectuar la toma de muestras de aceite periódicamente (mismo periodo de muestra, por ejemplo cada 1000 horas), en el mismo lugar de extracción, con la máquina caliente o máximo 15 minutos después de detener su funcionamiento, esto nos permite obtener una muestra representativa de la operación de la máquina.
- Llevar a cabo el control de consumo de aceite en cada máquina, lo que permite establecer la tasa de consumo por horas de trabajo, de producirse cambios en este parámetro nos permite establecer cuando el equipo tiene dificultades de operación y requiere mantenimiento.
- Contra los resultados de las tendencias, es posible comparar los resultados de las muestras que se analizan y por consiguiente determinar cuando existen indicios anormales de operación.
- Dedicar especial atención en los sistemas de inyección de combustible, la revisión periódica de inyectores, bombas de transferencia, bombas de inyección y cañerías de combustible, lo que permitirá proteger al motor de la contaminación por combustible y de una mala combustión.
- El sistema de filtración de aire debe mantenerse libre de polvo, y sobre todo revisar periódicamente si los sellos y empaquetaduras mantienen la protección adecuada contra el ingreso de aire sin filtrar.
- De la misma manera en que se toman en cuenta los metales de desgaste, hay que revisar la presencia de agua en el aceite, ya sea por goteo del sistema de enfriamiento o porque el equipo no logra mantener la temperatura adecuada de operación por el tiempo que permita evaporar el agua condensada en las paredes de las máquinas.

11. Bibliografía

- James C. Fitch, Guía de Procedencia de Elementos para Aceite Usado, Noria Latin America. 2002.
- José Benlloch María, Los Lubricantes, Características, Propiedades y Aplicaciones, Ediciones CEAC, Abril 1990.
- ECHEVARRIA, Libro motor tipo 16V23L.
- Irwin R. Millar/ John E. Freund/ Richard Johnson, Probabilidad y Estadística para Ingenieros, Printice – Hill Hispanoamericana S.A., 1992.
- Shell UK., General Guidelines for the Assesment Oil Analyses, Shell Services.