

Analysis of lubricating oil in internal combustion engines of electrical power generation plant

**Juan A. Pozo-Morejón^{1*}, Boris L. Martínez-Jimenez¹,
Iván L. Rodríguez-Rico¹, Reinaldo Martínez- Martínez¹,
Arnaldo M. Herrera-Artiles¹, Jandecy Cabral Leite²**

¹Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5½,
Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CP. 54830. *jpozo@uclv.edu.cu

²ITEGAM - Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia
Avenida Via Láctea, no. 17, Morada do Sol. Barrio Aleixo. CEP 69060-085

Abstract

In the present work, an integrated quality analysis process of the lubricating oil used in stationary diesel engines of electric power plants is implemented. This process includes a continuous monitoring of relevant variables through the well-known methodology SACODE with the following modifications: changes in variable limits and evaluation of kinematic viscosity and TBN by using Fuzzy logic. The method of analysis was automated by the implementation of the software SOFTLUB on the MATLAB platform. The uses of SOFTLUB allowed graphing historical results of oil quality parameters, calculating and updating its limits, quality assessment and also predicting future behavior of oil viscosity and TBN, in order to support maintenance decision making in power plants.

Keywords: SACODE, oil analysis, oil quality.

Análisis de aceite en motores de combustión interna estacionarios de planta de generación de energía eléctrica

Resumen

En el presente trabajo se implementa un procedimiento de análisis integral del aceite lubricante, de motores diesel estacionarios en una planta de generación de energía eléctrica, para evaluar su condición. Dicho procedimiento incorpora el seguimiento continuo de las variables, a través de la conocida metodología SACODE, con la introducción de modificaciones en los límites de dichas variables y la evaluación de la viscosidad cinemática y TBN, mediante el empleo de lógica *Fuzzy*. El método de análisis se automatiza mediante el desarrollo del software SOFTLUB, sobre plataforma MATLAB. El empleo de SOFTLUB permitió graficar los resultados históricos de las variables del análisis de aceite, calcular y actualizar sus límites, evaluar su estado, así como predecir el comportamiento futuro de la viscosidad y el TBN, para auxiliar la toma de decisiones en el mantenimiento.

Palabras clave: SACODE, Análisis de aceite, condición del aceite.

Introducción

El análisis de aceite en motores de combustión interna es una poderosa herramienta para el monitoreo de condición y contribuye a incrementar la confiabilidad de los equipos. Este análisis constituye un soporte para el mantenimiento predictivo y proactivo del equipo, que busca alargar su vida, lo que acarrea importantes ventajas económicas.

La presente investigación se desarrolla, como parte de un proyecto, en una planta de generación de energía eléctrica, ubicada en Manaus, Amazonas, Brasil. Dicha planta posee una capacidad instalada de 85,4 kW, y consta de 5 generadores con motores diesel estacionarios de media rotación, cada uno de 17,1 kW de potencia continua a 514 rpm. La planta fue diseñada originalmente para operar con *fuel oil* pesado (HFO según sus siglas en inglés), pero recientemente los motores se convirtieron a la operación gas-diesel. En esta planta el monitoreo de los parámetros del aceite se hace hasta la fecha controlándolos respecto a los límites condenatorios del fabricante el motor, que no es lo ideal para alargar su vida. Dichos límites condenatorios son por lo general amplios y no consideran las particularidades de cada motor, así como su régimen de explotación y mantenimiento. Todo lo anterior puede significar una pérdida de tiempo, energía y recursos.

La metodología SACODE, de análisis de aceite en motores de combustión interna, ha sido previamente aplicada con éxito por autores como Arellano [1] y Maldonado [2] y es reconocida por otros como Noria Corporation [3] y Álvarez [4]. El presente trabajo persigue el objetivo de organizar e implementar una primera etapa del análisis de aceite en estos motores, basado en dicha metodología SACODE, que permita evaluar adecuadamente su estado, a partir de datos experimentales de propiedades de esta sustancia, determinados en un laboratorio de análisis certificado.

1. Parte experimental

1.1. Metodología de la técnica SACODE

La técnica conocida como **SACODE** brinda las bases necesarias para realizar una correcta interpretación de los resultados del análisis de

aceite, a través del seguimiento sistemático. Dicha sigla indica el orden con el cual se revisarán las 3 categorías del análisis: **SA** para “salud”, **CO** para “contaminación” y **DE** para “desgaste” [1, 2, 3, 4]. A continuación se explica su significado.

- Salud: Son aquellos cambios relacionados con el aceite en sí, por ejemplo: viscosidad, número base total (TBN), oxidación, sulfatación, nitración, contenido de aditivos (P, Zn, Ca, Mg), punto de inflamación e índice de viscosidad.
- Contaminación: Son todos aquellos contaminantes presentes en el lubricante, tales como: agua, hollín, partículas de tierra y polvo (Si), solventes, combustibles, otros aceites lubricantes, refrigerante, etc.
- Desgaste: En los análisis de aceite se considera “desgaste” a las partículas procedentes del motor, que se encuentran en suspensión en el aceite, como Fe, Cu, Pb, Cr, Al, Sn, Ni, etc.

Los **límites estadísticos** se basan en desviaciones de los promedios históricos, en condiciones de datos originales o normalizados por adición de aceite entre fechas de muestreo. La literatura reporta el empleo de los límites “**alerta**” y “**crítico**” [1-4], pero a estos se le agregó en este trabajo el límite de “**inaceptable**”, que luego se explica y constituye un aporte.

Análisis estadístico

Varios autores [1-3] recomiendan establecer los límites estadísticos como sigue: límite crítico, $\bar{x} \pm 2\sigma$ límite alerta, $\bar{x} \pm \sigma$ valor normal, dentro de los límites de alerta. Donde $\bar{x}$ representa el valor medio estadístico de los datos históricos de las variables de interés de un análisis de aceite y “ σ ” la desviación estándar. En este trabajo se prefirió una variante de interpretación de límites que se explica en epígrafe 1.4.

Se decidió emplear la “normalización” de los datos por compensación de aceite, que se efectúa según expresión 1 [1]. Esta compensación se debe realizar para aquellos parámetros que representen concentración de la sustancia en dicho aceite, cuya unidad es partes por millón (ppm), que se ajustan a este tipo de normalización lineal.

$$X_{norm} = X_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{V}\right) \quad (1)$$

donde X_{norm} representa el valor del parámetro normalizado por compensación, X_0 el valor original del parámetro del aceite determinado experimentalmente, v el volumen total de aceite repuesto entre la fecha de muestreo actual y anterior (litros), y V el volumen operacional de aceite en el cárter del motor (litros).

Para calcular la tasa de cambio de un parámetro del análisis de aceite, entre muestras, se establece el cociente de la variación del valor del parámetro respecto a la variación del tiempo en el horómetro.

1.2. Descripción de equipo monitoreado

Los motores de la planta de generación, motivo de estudio, presentan las siguientes características: configuración en "V", 18 cilindros, 460 mm de diámetro de cilindro, 580 mm de recorrido, 514 rpm de velocidad, índice de compresión de 14:1, dos válvulas de admisión y dos de escape por cilindro, dimensiones de $13,58 \times 5,35 \times 5,49$ m y masa de 237 000 kg [5].

1.3. Características originales del aceite lubricante

El aceite lubricante empleado en los motores es un aceite de producción brasileña, grado SAE 40, cuyas características según fabricante son: viscosidad a 100°C de 14,0 cSt, índice de viscosidad mínimo de 98 y TBN de 30 mgKOH/g [6]. La línea base para el análisis de aceite, expuesta en Tabla 3, se tomó a partir de los datos de un análisis realizado en un laboratorio certificado a una muestra de aceite nuevo, con fecha de análisis 28/9/2012.

1.4. Análisis de aceite lubricante de motor según metodología SACODE

En el análisis de aceite de estos motores se consideraron los siguientes parámetros y límites dentro de la metodología SACODE (Tabla 1). Dentro de la "salud" del aceite se consideró el zinc, ya que es un aditivo anticorrosivo y antidesgaste presente en el aceite nuevo, con una concentración en este de 422 ppm. De manera que este elemen-

Tabla 1
Parámetros y tipos de límites que se consideran en metodología SACODE

Salud	- Viscosidad	Se considera límites condenatorios del fabricante de motor y límites objetivos.
	- TBN	
	- Oxidación	Se considera límites condenatorios del fabricante de motor, límites objetivos y límites estadísticos dato original.
	- Nitración	
	- Sulfatación	
	- Índice de viscosidad	Se emplea límite condenatorio del fabricante de motor.
	- Zinc, como aditivo del aceite	Se considera límite condenatorio del fabricante de motor, límites objetivos y límites estadísticos de dato normalizado.
Contaminantes	- Silicio	Se considera límites condenatorios del fabricante de motor y límites estadísticos de dato normalizado. En el caso del silicio y el sodio se consideran además límites objetivos del fabricante del motor.
	- Boro	
	- Sodio	
	- Vanadio	
	- Hollín	Se considera límite condenatorio del fabricante de motor y límite estadístico de dato original.
	- Agua	Se considera límite condenatorio del fabricante de motor.
Desgaste	- Fe-Al	Se considera límites condenatorios y límites objetivos del fabricante de motor y límites estadísticos dato normalizado.
	- Cu-Sn	
	- Pb-Ni	
	- Cr	
	- Metales de desgaste (suma)	Se considera límites estadísticos de dato normalizado.

to se controla por límites condenatorios máximos del fabricante del motor, pero sobre todo por límites objetivos mínimos establecidos de acuerdo a la literatura y límites estadísticos. En la categoría “desgaste” se introdujo el término “metales de desgaste”, a partir de la suma del contenido de metales de desgaste en suspensión presentes en el aceite. Este parámetro no se controlaba en la planta de generación por lo que constituye un aporte.

Los límites estadísticos se calculan para cada variable y motor, finalmente se promedian los límites obtenidos por variable para los cinco motores. Estos límites se establecen en base a los parámetros originales de las muestras de aceite, como en el caso de oxidación, nitración y sulfatación, o de los parámetros normalizados por compensación, como en el caso de algunos contaminantes y todos los metales de desgaste. Nunca los límites estadísticos calculados o límites objetivos de las condiciones de “alerta” y “crítico” pueden superar el límite condenatorio establecido por fabricante del motor. Se calcula un límite estadístico inferior, como la media de los valores históricos de la variable más una desviación estándar, y un segundo límite, como la media más dos desviaciones estándar. La Tabla 3 presenta los límites establecidos para cada variable a través de la combinación de los límites estadísticos, objetivos [3, 7] y condenatorios, lo que representa un aporte.

En el caso de la viscosidad y el TBN, parámetros fundamentales a controlar en el aceite, los límites (Tabla 3) se establecen mediante la conjugación de los límites objetivos y condenatorios del fabricante. Para la viscosidad los límites de “alerta” superior e inferior se establecen un 10% por debajo y un 20% por encima del valor típico para este aceite en cuestión, estimado en 140 cSt, mientras que los límites “crítico” se establecen en base a los límites de un aceite SAE grado 40. Finalmente los límites inaceptables son los con-

denatorios del fabricante del motor. Se respeta el proceder habitual del laboratorio del fabricante del motor, de determinar experimentalmente la viscosidad a 40°C, pero se considera que esto no coincide con la práctica habitual [1]. Lo mejor sería determinar la viscosidad a 100°C, temperatura intermedia de los pares de fricción del motor.

En el caso de la viscosidad, los límites de alerta son los considerados normales para este aceite. Es importante remarcar que se considera que todos los límites inferiores para el TBN, “ALERTA”, “CRÍTICO”, e “INCEPTABLE”, determinados por el límite condenatorio inferior de 25 mgKOH/g, del fabricante del motor, están un poco sobrevalorados y pudieran reducirse en alguna medida sin afectar el funcionamiento y la vida del motor a gas. Lo anterior requiere aprobación oficial por parte del fabricante de este.

En la medida que los valores experimentales de los parámetros en el aceite estén dentro de los límites estadísticos, implica que se encuentra dentro de los valores históricos de funcionamiento del motor, lo que debe ser favorable para la condición del aceite y la vida del equipo.

Para un valor fuera de los límites condenatorios del fabricante del motor se reporta **INACEPTABLE** (código rojo), entre este límite y el límite estadístico superior **CRÍTICO** (naranja), entre ambos límites estadísticos **ALERTA** (amarillo) y por debajo del límite estadístico inferior **NORMAL** (verde) (Tabla 2). Lo anterior se aplica para la mayoría de los parámetros que se controlan por límites superiores, mientras que para el TBN y el zinc (aditivo) se aplican los mismos límites, pero ahora como inferiores. De esta manera se establece una diferencia al considerar los criterios de evaluación de las variables del aceite respecto a lo reportado en la literatura [1-3].

Otro valor agregado al análisis es que se determina y grafica la variación en el tiempo del con-

Tabla 2
Códigos para el control de cada variable y tipo de acción

Cod. color	Condición de aceite	Acción
Verde	Normal	Ninguna acción se requiere
Amarillo	Alerta	Se debe toma alguna acción para corregir
Naranja	Crítica	Lo óptimo para el aceite y el motor es tomar una acción inmediata
Rojo	Inaceptable	Exige una acción inmediata

sumo horario de aceite lubricante de cada motor, lo que brinda una importante idea del grado de deterioro o desgaste del equipo.

1.5. Software “SOFTLUB” para el análisis de aceite

Como parte del proyecto se desarrolló un software, en plataforma MATLAB, nombrado “SOFTLUB”, que automatiza el procedimiento de análisis de aceite, y constituye una importante herramienta para sustentar la toma de decisiones por parte del personal técnico de la planta de generación. Dicho software posee un menú principal que consta de tres categorías “archivo”, “herramientas” y “ayuda”. El menú “archivo” permite que el usuario introduzca el número de motores, los datos históricos de análisis del laboratorio de aceite (cuando se comienza con el software) o los del último análisis ejecutado, por motor, a partir de una planilla “Excel”. Este menú también permite introducir o modificar las propiedades del aceite nuevo, conocidas como “línea base”, así como los límites de cada una de las variables del análisis.

El menú herramientas posee tres submenús: “viscosidad”, “SACODE” y “estimación”. El submenú “viscosidad” permite que se abra una ventana que ejecuta el cálculo de la viscosidad operativa a la temperatura de interés, renovando la ecuación de Walther para la condición actual del aceite, según norma ASTM D341 [8]. Este submenú permite además el cálculo del índice de viscosidad para la condición actual del aceite, según norma ASTM D2270 [9], y emite una alerta si el valor cae por debajo del límite condenatorio del fabricante del motor.

El submenú “SACODE” permite que se visualicen las ventanas que muestran y evalúan el comportamiento de los parámetros históricos del aceite y su relación respecto a los límites establecidos, agrupados en “SALUD”, “CONTAMINANTES” y “DESGASTE”. El software incorpora el cálculo automático y la actualización de los límites “ALERTA”, “CRÍTICO” e “INACEPTABLE” a partir de la combinación de los límites objetivos, estadísticos y condenatorios para cada variable. El software además efectúa el cálculo y grafica la tasa de cambio de cada propiedad del aceite.

Finalmente, el submenú “ESTIMACIÓN” evalúa empleando “lógica Fuzzy” la calidad del aceite a partir del estado de las dos variables principales, viscosidad y TBN. Lo anterior lo hace tomando en cuenta un conjunto de reglas previamente establecidas en las que se consideran los límites de “ALERTA”, “CRÍTICO” e “INACEPTABLE”, definidos en Tabla 3. De manera que el software estima el estado actual de dicho aceite y hace una predicción por el periodo de los próximos tres meses, en las categorías de “NORMAL”, “ALERTA”, “CRÍTICO” e “INACEPTABLE”.

2. Resultados

La metodología SACODE se aplica al grupo de cinco motores de la planta de generación de electricidad. Se tomó como periodo de análisis del 5/6/2012 hasta el 19/10/2012, que representa un intervalo de 41378 h a 44080 h de trabajo del motor 1 tomado como ejemplo, en el que los motores se estabilizaron trabajando con aceite SAE grado 40, con TBN de 30 mgKOH/g. Anteriormente estos trabajaron algún periodo de tiempo y recibieron adiciones con otro aceite SAE grado 40, con un TBN mayor de 40 mgKOH/g. Extender el periodo de análisis al intervalo total de funcionamiento del motor, incluiría el tiempo de trabajo con un aceite de mayor TBN, lo que falsearía los datos y los resultados del análisis estadístico.

Como parte inicial del análisis se determinan los límites de las diferentes variables del aceite (Tabla 3). En dicha tabla se muestra, a modo de ejemplo, el reporte de análisis de aceite para la última muestra tomada en el motor 1, el día 19/10/2012, con la evaluación de cada parámetro.

En las Figuras 1 a la 8 se muestran a modo de ejemplo algunas gráficas de datos históricos de las variables del análisis del aceite, para lo que se toma como base el motor 1 de la planta, así como los límites de cada variable, mediante líneas horizontales. Se muestra adicionalmente el gráfico de tasa de cambio de metales de desgaste.

Para el propio motor 1 se muestra la evaluación y predicción que hace “SOFTLUB” para la calidad del aceite, a partir de los parámetros “viscosidad” y “TBN” (Figura 9). En la Figura 10 se grafica el consumo horario histórico de aceite

Tabla 3
Reporte de análisis de aceite

Reporte de análisis de aceite						No. de muestra: 154111			
Motor diesel de gas		Tipo de aceite: SAE 40				Aceite compensado: 1500 litros			
Fabricante: -----		Horómetro: 44080 h				Fecha muestreo: 19/10/2012			
Modelo: -----		Capacidad cárter: 12600 litros				Fecha reporte: -----			
SACODE	Parámetros	Línea Base (LB)	Dato original	Dato normalizado	Tasa cambio	Límites			Evaluación de parámetros
						Alerta	Crítico	Inaceptable	
SALUD	Viscosidad (cSt)	134,6	162		0,0034	<124 o >165	<117 o >172	<100 o >200	Normal
	TBN (mgKOH/g)	31,86	29,29		-6E-05	<27 y >32	<26	<25	Normal
	Oxidación (ABS/cm)	5,11	4,8		0,0023	>5,68	>7,16	>25	Normal
	Nitración (ABS/cm)	10,51	18,1		-0,003	>13,1	>18,4	>20	Alerta
	Sulfatación (ABS/cm)	9,91	16,5		0,0062	>12,4	>17,3	>30	Alerta
	Índice de viscosidad	102	-			-	-	<95	
	Aditivo - Zinc (%m)	0,0422	0,044		2,8E-05	<0,0417	<0,0366	<0,0211 >5	Normal
CONTAMIN.	Agua (%V)	<0,1	0,1		0	-	-	>0,30	Normal
	Hollín (ABS/cm)		10,2		0,0062	>9,80	>11,36	>200	Alerta
	Boro (ppm)	0	1	1,12	2,2E-04	>1,2674	>1,3762	>30	Normal
	Silicio (ppm)	12	9	10,07	0,0020	>14,5	>16,6	>20	Normal
	Sodio (ppm)	8	24	26,86	0,0175	>10	-	>20	Inacept.
	Vanadio (ppm)	4	11	12,31	0,0146	>13,44	>16,09	>47	Normal
DESGASTE	Hierro (ppm)	4	11	12,31	0,0025	>15	>17,08	>25	Normal
	Cobre (ppm)	0	4	4,48	8,9E-04	>5	>6,76	>15	Normal
	Plomo (ppm)	1	1	1,12	2,2E-04	>1,32	>1,47	>5	Normal
	Cromo (ppm)	0	1	1,12	2,2E-04	>1,27	>1,38	>5	Normal
	Aluminio (ppm)	4	6	6,71	7,4E-04	>5	>7,6	>10	Alerta
	Estaño (ppm)	0	1	1,12	2,2E-04	>1,27	>1,38	>5	Normal
	Níquel (ppm)	0	10	11,19	0,0144	>3	-	>5	Inacept.
	Metales de desgaste (ppm)	9	34	38,04	0,0259	>43,53	>49,16	-	Normal

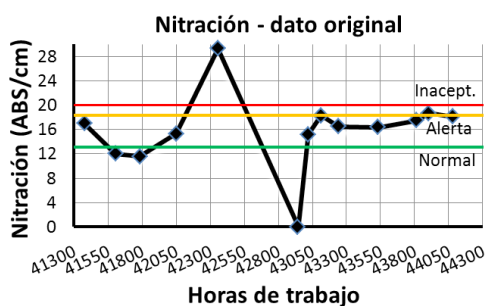


Figura 1. Nitración, "SALUD".

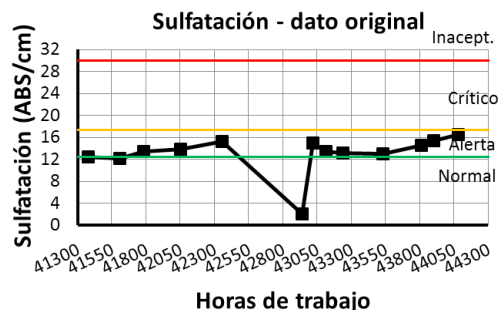


Figura 2. Sulfatación, "SALUD".

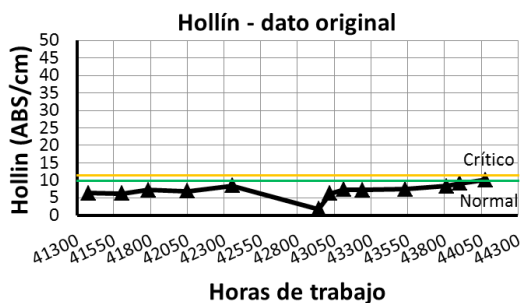


Figura 3. Hollín, "CONTAMINANTES".

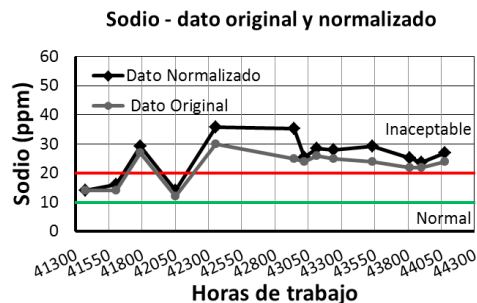


Figura 4. Sodio, "CONTAMINANTES".

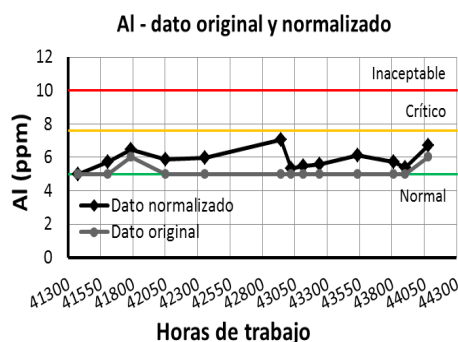


Figura 5. Aluminio, "DESGASTE".

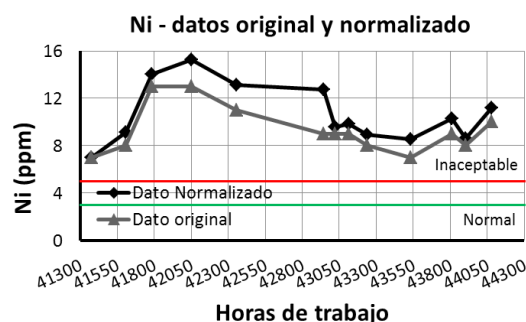


Figura 6. Níquel, "DESGASTE".

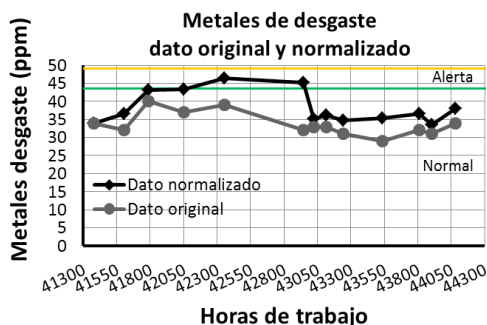


Figura 7. Metales de desgaste.

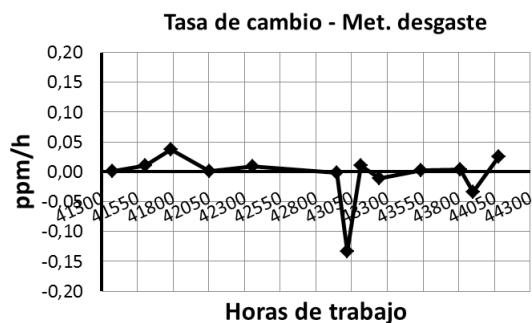


Figura 8. Tasa de cambio - metales de desgaste.

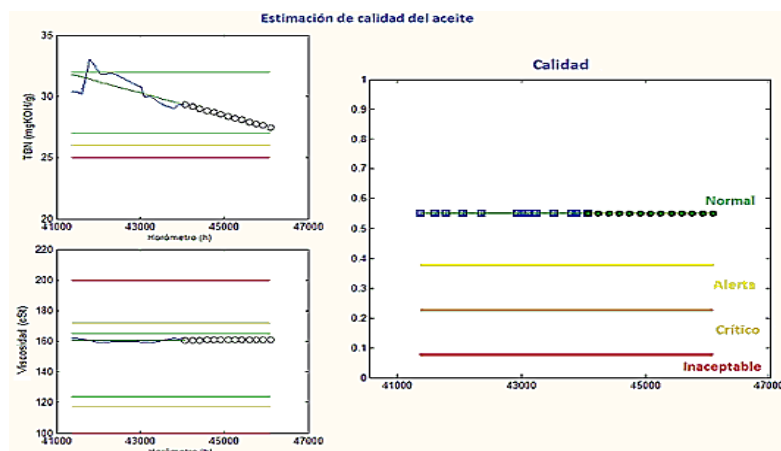


Figura 9. Evaluación y predicción del estado del aceite.

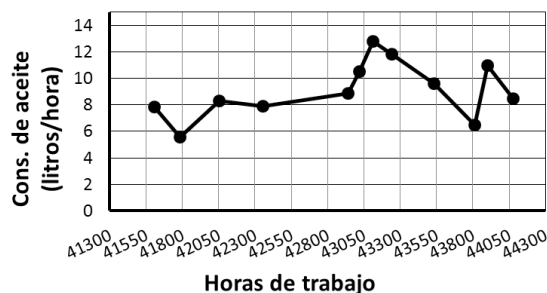


Figura 10. Consumo de aceite lubricante del motor.

del motor 1, establecido en base a las adiciones de aceite al cárter.

3. Discusión de resultados

Una vez procesados los datos del análisis de aceite se reporta en la “salud del lubricante”, como condición de “alerta” la nitración y la sulfatación. Ambas propiedades se han mantenido a lo largo del tiempo en este intervalo, fuera del valor normal y óptimo para la condición del lubricante y la vida del motor. La tendencia de ambas propiedades es ligeramente ascendente. En el caso de la nitración, incluso en las 42356 h de trabajo superó el límite condenatorio, por lo que es ese momento el cárter se refrescó con una reposición de 5200 litros de aceite nuevo, lo que provocó el descenso de la propiedad.

En los “contaminantes” se evalúa de “inaceptable” el sodio, con un contenido de 24 ppm superior a los límites objetivo y condenatorio del fabricante del motor, que puede provenir de alguna fuga de líquido refrigerante. El hollín está en condición de “alerta” y se conoce que este elemento se comporta como un abrasivo que puede contribuir a acrecentar el desgaste de las piezas del motor. Ambos contaminantes presentan una tendencia ligeramente ascendente.

En los “metales de desgaste” se reporta en condición de “inaceptable” el níquel, lo que indica que existe un nivel excesivo de este elemento en el aceite, lo que debe ser motivado por un excesivo desgaste de partes del motor, como pueden ser los mecanismos de accionamiento de válvulas, aros o camisas de cilindros. La tendencia del níquel es ligeramente descendente. El aluminio se reporta en condición “alerta”, con tendencia constante. Este elemento puede constituir desgaste de partes

como pistones, cojinetes de biela, etc. Sin embargo la variable “metales de desgaste”, que refleja el comportamiento global de estos, se mantiene en nivel “normal” y la tendencia es ligeramente descendente en el tiempo, lo que es favorable.

El software muestra en la figura 9, que las variables Viscosidad y TBN están en la categoría normal, línea continua, y permanecerán en esta categoría en los próximos tres meses (el pronóstico se grafica en forma de círculos). El manejo *Fuzzy* de estos dos parámetros predice que la condición del aceite permanecerá normal en este intervalo de tiempo, según gráfico derecho de figura 9. En el caso de la viscosidad la tendencia es a mantenerse constante, lo que es bueno para el motor. Sin embargo en el caso de la variable TBN la tendencia es claramente descendente y la ecuación 2, ajustada por el software desarrollado, es la que brinda el comportamiento. Esta además es la ecuación que se emplea para predecir el comportamiento futuro de la propiedad.

$$\text{TBN} = -0,0009185 \cdot X + 96,7721 \quad (2)$$

donde X – representa en número de horas de funcionamiento del motor (h).

La caída del TBN se corresponde con los altos valores reportados de sulfatación en el aceite. A pesar de que la viscosidad y el TBN se reportan en condición “normal” y se pronostica permanecerán así por un período de tiempo de al menos tres meses, la nitración y sulfatación se reportan en “alerta”, mientras que el sodio y níquel se reportan en condición “inaceptable”, lo que impone la necesidad de una medida inmediata por parte del personal de la planta, que debe ser la parada del equipo, el refrescamiento del cárter con adición de aceite nuevo y la revisión de posibles fugas de refrigerante en el sistema, entre otras medidas.

Este análisis de aceite lubricante incorpora un valor agregado indiscutible para la planta al pasar del control por límites condenatorios amplios, al control por límites establecidos por la combinación de límites objetivos, estadísticos y condenatorios de fabricante, que ayudan a monitorear cada parámetro más estrechamente, lo que beneficiará la condición del aceite y la vida del motor, y representará una importante ventaja económica.

El consumo de aceite promedio calculado para este período, en este motor, es de 9,09 litros/hora, que resulta bajo si se compara con el del motor 4 que es de 11,03 litros/hora, y se acerca al consumo promedio de los cinco motores que es de 9,4 litros/hora. Se considera que este motor opera en una condición normal, para esta planta de generación.

Conclusiones

1. Con el desarrollo de la presente investigación se logró implementar de manera exitosa una primera etapa del análisis de aceite, de motores estacionarios de una planta de generación de energía, basado en la aplicación de la metodología SACODE, con la introducción de modificaciones en los límites de las variables del análisis.
2. Se desarrolló el software "SOFTLUB", que automatiza el procesamiento del análisis de aceite, grafica los resultados históricos de las variables del análisis de aceite, calcula y actualiza sus límites, evalúa su estado y predice, con ayuda de la lógica Fuzzy, el comportamiento de la viscosidad y el TBN, para auxiliar la toma de decisiones en el mantenimiento.
3. Se corrobora que el análisis del aceite debe hacerse de manera integral, a partir de las tres categorías de la metodología SACODE, ya que para el motor 1 las variables fundamentales, viscosidad y TBN, permanecen en categoría "normal", sin embargo otras importantes como nitración permanecen en condición "alerta" o el níquel, como metal de desgaste, aparece reportado como "inaceptable", por lo que se puede estar comprometiendo la vida del equipo.

Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo una segunda etapa de la investigación donde se inserte todo el procedimiento de análisis de aceite implementado, dentro de una política de mantenimiento preventivo y proactivo de los motores, de manera que

se logre maximizar la vida de los equipos con un importante ahorro de recursos.

Referencias bibliográficas

1. Arellano Ortiz, G. A.: "Implantación de Análisis de Aceite en Motores de Combustión Interna de Ciclo Diesel". Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador (2009).
2. Maldonado Díaz, C. E. "Diseño de un plan de mantenimiento preventivo de motores diesel basado en análisis de aceite". Tesis de grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador (2010).
3. Noria Corporation: "Interpretación sistemática del análisis de aceite – Técnica SACODE". Machinery Lubrication en español. Febrero – marzo. (2006). Available from: http://www.machinerylubrication.com/sp/ed_dic-ene_2007_Interpretacionsistematicadelanalisisdeaceite.asp. Acceso en octubre de 2012.
4. Álvarez, J. F.: "El Análisis de Aceite Usado como una herramienta de Mantenimiento Proactivo". ExxonMobil. Available from: http://grupos.emagister.com/documento/analisis_de_aceite_usado_como_una_herramienta/1506-938686. Acceso en octubre de 2012.
5. Memorial descriptivo de la planta (2004).
6. Fabricante del aceite. Información técnica del fabricante del aceite SAE 40 (2011).
7. Terradillos, J. et al.: "Lubricación y mantenimiento de motores a gas". Boletín mensual sobre lubricación y mantenimiento. Wear-checkiberica, No. 4, mayo (2004).
8. ASTM. Norma ASTM D341-09 Standard Practice for Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products (2009).
9. ASTM. Norma ASTM D2270. Standard Practice for Calculating Viscosity Index From Kinematic Viscosity at 40 and 100 °C (1998).

Recibido el 7 de Mayo de 2013

En forma revisada el 21 de Julio de 2014