

ANALISIS DE FALLAS DE LUBRICACION EN MOTORES A GAS

Ing. Marcelo E. Martins – Ingeniero de Lubricación Senior
Esso Petrolera Argentina S.R.L.- Una empresa de ExxonMobil Corp.

ABSTRACT

El autor sostiene que las técnicas tradicionales de mantenimiento ya no son efectivas para asegurar máxima disponibilidad de equipos. Uniendo las mismas con el análisis de modos de falla y sus efectos, es posible anticiparse a los problemas antes que se desarrollen y provoquen un deterioro del desempeño del equipo. Se hace especial hincapié en cómo las condiciones de operación y mantenimiento de un motor a gas afectan directamente la vida útil tanto del lubricante como del equipo, y cómo las técnicas predictivas deben considerar estos parámetros para poder ser efectivas.

La utilización del análisis de modos de falla de lubricación y sus efectos permite integrar el mantenimiento tradicional con el análisis sistemático de las condiciones anormales que conducen a las fallas más comunes de motores a gas, estableciendo así parámetros de control que evitarán la aparición de causas raíces de falla, maximizando la disponibilidad de la maquinaria.

INTRODUCCION

Hace ya varios años, leyendo un artículo publicado por un consultor británico de tribología, J. Denis Summers-Smith^{Error! Marcador no definido.}, tomé como propio el slogan por él acuñado: "Confiar es bueno, pero verificar es mejor. Cuando esté analizando fallas, no asuma nada y verifíquelo usted mismo". Y también su corolario: "El fabricante (del equipo) no siempre está en lo cierto".

Esta simple máxima me ha ayudado, a través de los años, a reconocer y comprender los mecanismos de fallas de lubricación que se desarrollan en motores a gas, sus causas y consecuencias.

También he aprendido que el análisis de falla es una disciplina no muy utilizada, y que se limita comúnmente a la experiencia de los líderes de mantenimiento de las empresas, sin poseer generalmente una metodología sistematizada para su evaluación y documentación. Esto me ha llevado a postular mi propia máxima: "Sin un programa de análisis de fallas, los esfuerzos de mantenimiento se asemejan al juego del gallito ciego". En otras palabras, si no se verifica la efectividad del mantenimiento y no se toman los pasos necesarios para modificar las actividades de acuerdo con las fallas encontradas y/o previstas, nunca tendremos certeza de que estamos haciendo bien nuestro trabajo, y estaremos dando golpes en el vacío hasta que una casualidad haga que le acertemos a algo.

Lubricación de motores a gas

No entraremos en los detalles de selección de lubricantes para motores a gas natural, ya que escapa del alcance del presente trabajo. Sólo diremos lo siguiente: En lo que concierne a la

selección de lubricantes para motores a gas, no existen especificaciones ampliamente aceptadas en la industria para definir los requisitos de desempeño. Aunque hay especificaciones para motores de combustión interna impulsados con gasolina o diesel, estas especificaciones no aplican a los motores a gas. Los motores que operan con combustibles gaseosos, al contrario de los motores automotrices convertidos que usan GNC o GLP, requieren aceites lubricantes diseñados y formulados para satisfacer los requisitos únicos de un motor a gas. Tanto las bases como la combinación de aditivos son críticas en el balanceo de las necesidades de desempeño de estos motores

Ahora, una vez seleccionado el lubricante, aún cuando la selección haya sido correcta, no estamos exentos de la aparición de fallas de lubricación. Un diagnóstico correcto de las mismas nos permitirá validar la selección efectuada y/o modificar las condiciones de operación de los equipos.

DESARROLLO

Antecedentes

Antes de ir de lleno al punto que nos ocupa, repasemos algunos antecedentes importantes, que nos ayudarán a sentar las bases para los postulados que haremos.

La bibliografía de análisis de fallas es extensa, y en todos los casos los autores empiezan por categorizar los tipos de falla de acuerdo con los patrones característicos que los agrupan.

Así, asistimos a diferentes clasificaciones, tales como la del propio Summers-Smith^{Error!}
Marcador no definido.

Problemas de interfase: Que ocurren cuando piezas de distintos fabricantes son lubricadas por el mismo sistema de lubricación.

Problemas de sistema: Que resultan de la interacción de la máquina con el sistema del cual es parte

Problemas de componentes: involucran la falla de componentes tribológicos individuales tales como cojinetes, sellos, cilindros, causados por problemas de diseño, mala lubricación, error o abuso.

El Ing. Heinz P. Blochⁱⁱ, va un paso más allá y clasifica los modos de falla de la siguiente manera:

Deformación - plástica, elástica, etc.

Fractura - fisuras, fracturas por fatiga, picado (o pitting), etc.

Cambios superficiales - cavitación, desgaste, etc.

Cambios materiales - contaminación, corrosión, desgaste, etc.

Desplazamiento - aflojamiento, rotura, tolerancia excesiva, etc.

Fuga

Contaminación

Alineado con la nueva doctrina de mantenimiento proactivo, el Dr. Fitchⁱⁱⁱ postula que existen 5 (cinco) tipos de fallas, a saber:

Falla condicional: una condición de operación que se desvió de sus parámetros regulares, y que si persiste eventualmente conducirá a una falla

Falla incipiente: una condición donde se notan los primeros signos de degradación de materiales por los medios de detección usuales, pero aún no se percibe un cambio de desempeño del motor

Falla inminente: una condición de degradación evidente de material, donde ya ha ocurrido un serio deterioro del desempeño

Falla precipitada: una condición de degradación acelerada tanto del equipo como del desempeño, que resulta en un impedimento parcial de su función

Falla catastrófica: una condición de cese repentino y completo de la operación del equipo, y total impedimento de seguir cumpliendo con su función.

Esta clasificación es sumamente interesante, ya que agrega un nuevo tipo de falla, condicional, que hasta el momento no se tomaba en cuenta. Esto es, todavía no se ha notado ningún cambio en el desempeño del equipo, pero al haber habido un cambio de condición de operación es muy probable que la misma conduzca en el futuro a una falla.

Pero a todas las clasificaciones existentes le agregaría una causa de falla esencial. Cuando la misma falla se repite una y otra vez, el problema es del tipo gerencial.

Se dice que los humanos poseemos un horizonte de aprendizaje, que hace que cuando el tiempo transcurrido entre la aparición de una causa de falla (por ejemplo, una condición de sobrecarga) y la observación del síntoma es demasiado extenso, no se asocie causa con síntoma y, por lo tanto, la organización no aprenda de los problemas. Lo mismo es válido cuando tratamos con soluciones, si las mismas no son documentadas (conocimiento explícito) dependemos de la memoria de las personas (conocimiento implícito), que como sabemos es bastante limitada, por lo que las acciones correctivas implementadas en el pasado son fácilmente olvidadas.

Análisis de fallas de lubricación

Haremos aquí una importante distinción entre fallas de lubricación y fallas de lubricante. Las primeras se refieren a un deterioro en alguna condición específica de lubricación que impacta sobre el desempeño del equipo, y no necesariamente involucran una falla de lubricante, que es cuando el aceite deja de cumplir su función por un defecto intrínseco del mismo (mala aditivación, incorrecta selección, calidad pobre o defectos de fabricación).

Ejemplos concretos de fallas de lubricación^{iv} son:

- Depósitos en la cámara de combustión
- Depósitos en el cárter
- Depósitos en el turbo
- Corta vida útil de bujías
- Corta vida útil de aceite y filtros de aceite
- Motores sucios
- Válvulas quemadas
- Válvulas pegadas
- Aros desgastados
- Camisas desgastadas

- Fisura de cabezas
- Rayado
- Corrosión
- Formación de barnices
- Recesión de válvulas
- Rotura de válvulas

Mientras que causas concretas de fallas de lubricación son:

- Fugas de glicol
- Fugas de agua
- Condensación de humedad
- Relación Aire/Combustible
- Cargas
- Servicio (Paradas y arranques)
- Combustible
- Avance de la ignición
- Preignición
- Detonación
- Temperatura de aceite
- Temperatura de agua
- Depósitos en el sistema de enfriamiento
- Alto consumo de aceite
- Extensión de los intervalos de cambio
- Filtración inadecuada del aceite
- Aros desgastados
- Filtración de aire
- Aceite sucio a cilindros de potencia (2 tiempos)
- Problemas en el sistema de ignición
- Sellos de guías de válvulas desgastados
- Balance del motor

Como podrán apreciar, la gran proliferación de problemas y causas torna muy difícil la identificación de la causa raíz adecuada para cada falla presente en un motor a gas. Es usual observar que la aparición de una falla particular tiene varias causas asociadas, y también que cada causa provoca más de un tipo de falla.

Sin embargo, utilizando un enfoque de análisis sistémico podremos concluir que la aparente confusión en realidad no es tal.

Jim Fitchⁱⁱⁱ asegura que en todo sistema que utiliza un lubricante, es esencial mantener las propiedades del mismo durante su vida de servicio, por lo que un fluido debe mantener su:

Estabilidad a la contaminación: Un sistema mecánico que no es capaz de mantener la estabilidad a la contaminación de sus fluidos está predestinado a la falla. No existe

1. sistema dependiente de fluidos que pueda soportar un nivel en aumento de contaminantes.
Los operadores de máquinas continuamente persiguen actividades tendientes a identificar, cuantificar, excluir y remover la contaminación.
2. Estabilidad química: La estabilidad química trata de las propiedades del fluido que cambian cuando ocurre una alteración en la composición química del fluido. El grado de estabilidad del fluido varía con su tendencia a reaccionar con el medio ambiente y con las condiciones impuestas al sistema.
Todos los tipos de fluido pueden y van a soportar algún tipo de cambio químico durante el tiempo y la exposición al uso. El calentamiento (térmico), la agitación o turbulencia (mecánica) y la presencia de contaminantes (desgaste de metales, catalizadores, agua, aire, etc) aceleran esta degradación.
Cuando el aceite se degrada químicamente se forman compuestos tanto solubles como insolubles, tales como resinas, barros y materiales ácidos. Estos subproductos de la degradación imponen efectos dañinos al desempeño del aceite causando la aparición de cambios físicos (ej. un aumento de viscosidad). Otros efectos de los productos de degradación pueden ser el bloqueo de pequeñas tolerancias, piezas corroídas de metal, y la contaminación del sistema con lodos y barnices.
3. Estabilidad física: La estabilidad física es sinónimo de "resistencia a los cambios físicos". Las propiedades físicas de los fluidos pueden y van a cambiar con las condiciones operativas del sistema. Estos cambios no deben disminuir la funcionalidad del sistema, causar un sacrificio en la vida útil, o no volver a la condición original del fluido cuando el estado del sistema está nuevamente en su condición "dentro de especificaciones".
Siempre que las propiedades del fluido retornan a sus valores originales cuando los parámetros exhiben sus valores originales de referencia existe la estabilidad física del fluido y tanto el desempeño como la vida útil son predecibles y extendidos.
4. Adicionalmente, todo sistema que involucra un fluido debe mantener su estabilidad al desgaste. En otros términos, el desgaste del sistema debe ser mantenido dentro de los límites normales, y la falla al llevarlo a cabo usualmente involucra una falla inminente que puede causar la degradación del desempeño del equipo.

En términos prácticos, podemos decir que un lubricante puede dejar de cumplir su función, por alguno de los siguientes motivos:

Contaminación: Con polvo del medio ambiente, agua, glicol, combustible, etc.

Degradación química: Fundamentalmente oxidación del aceite

Degradación térmica: Fundamentalmente nitración del aceite

Degradación física: Fundamentalmente cambios de viscosidad

Ahora, ¿qué provoca que el aceite deje de cumplir su función? Las causas concretas que enumeramos en las páginas anteriores.

Tradicionalmente, el enfoque utilizado en las oficinas de mantenimiento de la mayoría de las empresas así como en los departamentos de servicio de los proveedores de lubricantes, se centra en la detección de cambios físicos y químicos en los lubricantes, a partir de lo cual se decide sobre la vida útil de los aceites así como sobre las intervenciones a realizar en los equipos.

Ahora, si bien sabemos que todo lubricante sufrirá cambios durante su vida útil, también sabemos que condiciones anormales de operación como las ya enumeradas como causas de fallas de lubricación provocarán una degradación acelerada del lubricante. Conociendo el impacto que cada condición de operación tiene sobre la estabilidad química, física, al desgaste y a la contaminación de un aceite, podremos establecer valores de control para las mismas, previniendo de lleno su desviación y, de esta manera, la degradación anormal de las condiciones de lubricación.

Así, evitando la aparición de las denominadas fallas condicionales, podemos minimizar las paradas no programadas de equipos debidas a fallas de lubricación.

El Análisis de Modos de Falla y sus Efectos nos brinda una metodología sencilla desde la cual encarar el problema, uniendo los distintos conceptos y clasificaciones hasta aquí enumerados.

Modo de falla relacionado con lubricación	Efectos posibles	Criticidad	Causas posibles	Mecanismos de detección	Intervalo P-F
¿Cuál es la naturaleza de la falla?	¿Qué podría pasar si ocurre?	¿Cuál es la importancia y probabilidad de ocurrencia?	¿Cuáles causas raíz provocaron la falla?	¿Cómo puede detectarse la falla?	¿Qué alerta proveen los mecanismos de detección?

En la tabla previa se nos presentan una serie de preguntas a responder, las cuales aplican a cualquier tipo de falla, ya sea una fisura de tapa de cilindros como soplado de válvula o desprendimiento de material de cojinetes.

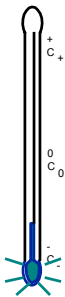
Ejemplo: Oxidación del aceite y sus consecuencias

Veamos un ejemplo de lo expuesto:

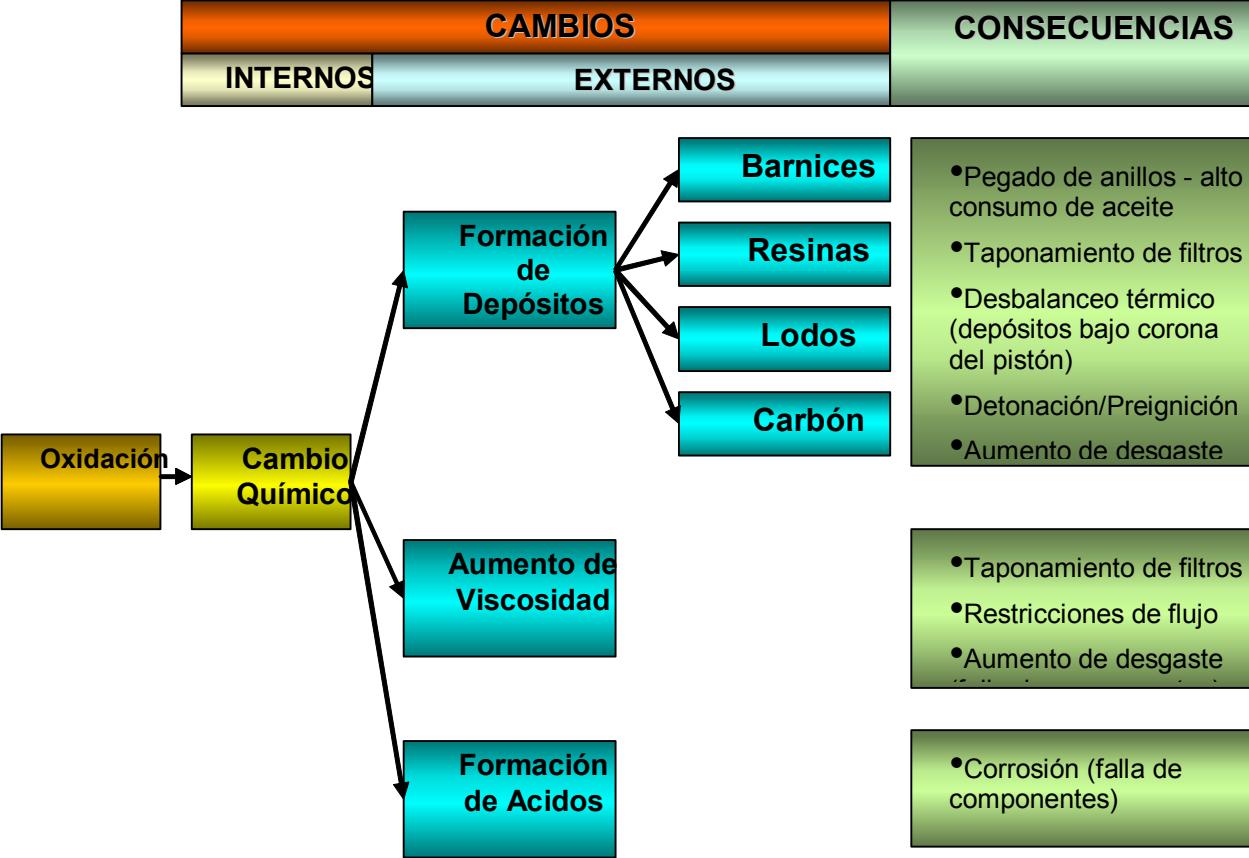
5

Según un fabricante de equipos (no aplica a todos):

- Los extremos de temperaturas afectan la severidad de trabajo del aceite
- Temperaturas encima de 88°C (190°F) promueven la rápida oxidación del aceite
- Temperaturas debajo de 57° - 60°C (135°F - 140°F) previenen que el agua y óxidos de nitrógeno se vayan, favoreciendo la nitración
- Temperatura de aceite óptima: 66°C - 77°C (150° - 170°F)



¿Qué sucede, por ejemplo, si la temperatura del aceite se encuentra por encima de los valores recomendados? El proceso sería el siguiente:



La oxidación es una reacción normal entre el aceite y el oxígeno durante el proceso de combustión. En un sistema mecánico de fluido, la tasa de oxidación no es sólo función del aceite básico y el paquete de aditivos, sino también de las condiciones de operación. La temperatura, la presión, los contaminantes, la aireación, el agua, las partículas de metales y la agitación ayudan a acelerar el proceso de oxidación. Los anillos arrastran estos materiales al cárter. Las principales causas de oxidación son sobrecalentamiento, excesivo soplado, intervalos de cambio de aceite sobreextendidos, puntos calientes localizados (ej. Cojinetes) y fugas de glicol. Una vez que se inicia el proceso de oxidación, ocurren cinco cambios en el aceite:

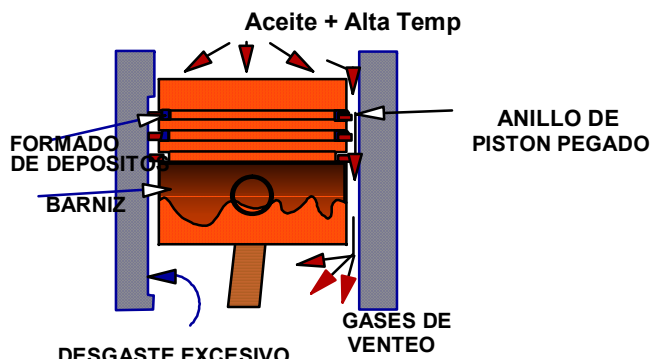
- El color se torna más oscuro, hasta el punto de una total opacidad
- El olor se vuelve muy fuerte, o acético, debido a la presencia de ácidos orgánicos en exceso
- Aumenta la acidez (aún cuando este no es un proceso inmediato)
- Aumenta la viscosidad

Los insolubles precipitan, produciendo depósitos negros y pesados en el cárter, el área de los anillos del pistón, las cabezas, las válvulas, guías de válvulas y cubierta superior.

Desde un punto de vista químico, las reacciones de oxidación son complejas reacciones en cadena que comienzan a bajas temperaturas (debajo de 140 °F) con los alcoholes primarios del

fluido y progresa hasta los aldehídos, cetonas y grupos carbonil carboxilo a medida que aumenta la temperatura hasta el punto donde comienzan a producirse lodos. Un análisis químico indica que la porción principal de este lodo está compuesta de carbono libre, con cantidades menores de agua, ácido carbónico, aldehídos y algunos ácidos orgánicos complejos.

La tasa de oxidación y los subproductos de la degradación aumentan no sólo con temperatura en aumento, sino también con mayor agitación (turbulencia) y contaminación (aire, agua, glicol, partículas metálicas y polvo). La estabilidad a la oxidación varía no sólo con el grado de viscosidad del aceite sino también con la calidad del aceite básico y los aditivos seleccionados.



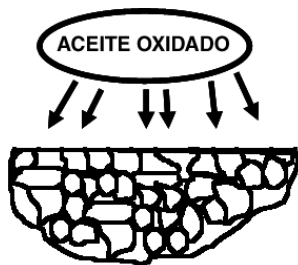
Veamos ahora las consecuencias de la oxidación del aceite sobre pistones y camisas. La formación de *depósitos de carbón* puede conducir a un elevado desgaste abrasivo de camisas (partículas de carbón) debido a la formación de depósitos en las áreas de ranuras de anillos que pueden forzar a los anillos contra las paredes del cilindro. El deterioro de la función de sello de los anillos permite el paso de los gases de

venteo, que provocan una mayor degradación del aceite por nitración. Un aumento del consumo de aceite, así como de combustible, son consecuencias directas de lo expuesto.

En el caso de cojinetes, el mecanismo sería:



1. La superficie del cojinete tiene estructura granular



2. Agente corrosivo penetra y debilita la estructura de grano



3. Granos removidos de la superficie... mayor debilitamiento superficial

En este caso los agentes corrosivos son ácidos orgánicos de características débiles, que atacan a los cojinetes (trimetálicos o bimetálicos) por medio de un mecanismo de corrosión selectiva de plomo.

1. Un mayor debilitamiento superficial degenera en sobrecargas localizadas, que finalmente provocan una falla por fatiga.
2. La fatiga, en cojinetes, se manifiesta por el desprendimiento de material, que puede rayar al cigüeñal, así como provocar taponamiento de los conductos de lubricación.

Ejemplo continuación: Oxidación del aceite y sus causas

Las causas más comunes de oxidación son:

1. Altas temperaturas de agua y/o aceite
2. Formación de incrustaciones en agua de camisa.
3. Puntos calientes localizados.
4. Pequeñas fugas de refrigerante.
5. Sobreextensión del servicio.

Altas temperaturas conducirán a la oxidación del aceite luego de largos períodos de tiempo. Muchos de nosotros creemos que temperaturas en cárter mayores de 200 °F+ son elevadas. Esto es elevado para grandes motores de transmisoras de gas pero es común de ver en algunos de los motores de alta velocidad y 4 tiempos que operan en cogeneración y otros servicios. Aunque temperaturas de cárter superiores a 200 °F disminuirán la vida útil del aceite, esta no es la alta temperatura que consideramos cuando hablamos de las causas de degradación temprana del aceite. Las temperaturas que más nos preocupan son las de las camisas, las áreas de anillos y bajo la corona de los pistones, donde las películas de aceite se verán expuestas a temperaturas de más de 400 °F por períodos breves de tiempo. Las temperaturas en estas áreas se verán exageradas sobremanera por altas cargas en el motor, preignición o detonación, combustión desbalanceada y malas condiciones del sistema de refrigeración, por mencionar algunas. Además, las finas películas de aceite en las áreas de anillos y parte superior de camisa están expuestas a subproductos de la combustión, principalmente ácidos orgánicos y compuestos de nitrógeno y, si el combustible posee azufre o cloro, pueden formarse ácidos inorgánicos fuertes durante la combustión que reaccionarán con las películas delgadas de aceite que luego serán arrastradas al aceite del cárter.

La segunda causa requiere un análisis mas profundo, usualmente incluyendo una parada de equipo, y probablemente se debe a problemas de mantenimiento del sistema de refrigeración (vea la sección de temperaturas de agua y aceite por más detalles).

La tercer causa puede ser rastreada a diferentes fuentes, tales como composición del gas combustible, operación del motor (avance de la ignición, relación aire-combustible, etc.) y calidad del aceite lubricante. Usualmente involucra alta formación de depósitos en la corona del pistón, de manera que puede ser descubierta mediante una inspección boroscópica.

El glicol es veneno para el aceite, ya que provoca una degradación acelerada del mismo.

Finalmente, si los períodos de cambio de aceite se extienden demasiado, el efecto acumulativo de la oxidación causará la formación de depósitos.

Un enfoque sistémico: Aplicando A.M.F.E. a motores a gas

En nuestro ejemplo, revisamos cómo la aparición de diversas desviaciones en las condiciones de operación provocan aumentos de temperatura en el motor (falla condicional), que eventualmente conducen a una oxidación acelerada del aceite y, si la condición persiste, a problemas de desempeño del equipo.

Ya contamos con todos los elementos necesarios para realizar un A.M.F.E. parcial para el ejemplo planteado. Asumamos una sola de las consecuencias de la oxidación del aceite, en este caso corrosión de cojinetes:

Modo de falla relacionado con lubricación	Efectos posibles	Criticidad	Causas posibles	Mecanismos de detección	Intervalo P-F
¿Cuál es la naturaleza de la falla?	¿Qué podría pasar si ocurre?	¿Cuál es la importancia y probabilidad de ocurrencia?	¿Cuáles causas raíz provocaron la falla?	¿Cómo puede detectarse la falla?	¿Qué alerta proveen los mecanismos de detección?
Oxidación del aceite	Corrosión de cojinetes	Asignar valor a ambos	Altas temperaturas de agua y/o aceite	Monitoreo de temperaturas	2100 hs
			Formación de incrustaciones en agua de camisa.	Análisis de refrigerante y circuito	6500 hs
			Puntos calientes localizados.	Inspecciones boroscópicas	720 hs
			Pequeñas fugas de refrigerante.	Análisis de aceite usado	2100 hs
			Sobreextensión del servicio.	Análisis de aceite usado	240 hs

CONCLUSIONES

La utilización del Análisis de Modos de Falla y sus Efectos aplicado a la lubricación de motores a gas permite aplicar los conceptos de mantenimiento proactivo a estos equipos, eliminando así las fallas condicionales que eventualmente degeneran en la degradación temprana del lubricante, y permitiendo así recuperar el máximo de su inversión en lubricación.

De esta manera, se puede actuar sobre las causas raíces de las fallas más usuales, lo cual nos brinda un gran espacio de tiempo para poder planificar las intervenciones a los equipos y evitar que sean ellos quienes fijen nuestra agenda con sus paradas repentinas.

La utilización de esta metodología por parte de los departamentos de mantenimiento y operaciones, y el apoyo de un proveedor de lubricantes con conocimiento experto sobre tecnología de lubricación, permitirá avanzar un paso más allá en el camino del mejoramiento continuo.

BIBLIOGRAFIA

ⁱ Tribology Detectives, por Nancy J. Demarco

ⁱⁱ Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, por Heinz P. Bloch y Fred K. Geitner

ⁱⁱⁱ Proactive Maintenance for Mechanical Systems, por E.C.Fitch

^{iv} Publicación interna ExxonMobil Research & Engineering

El autor:

Marcelo E. Martins es ingeniero metalúrgico egresado de la Universidad Nacional de La Plata, y posee un título de Master en Administración de Empresas otorgado por I.D.E.A. (Instituto para el Desarrollo Empresarial de la Argentina). Actualmente se desempeña como Ingeniero de Lubricación Senior en Esso Petrolera Argentina S.R.L., una compañía perteneciente a ExxonMobil Corp. Se ha especializado en lubricación industrial, y más precisamente lubricación de motores a gas, siendo en la actualidad un referente mundial en su especialidad. Ha dictado conferencias en varios países latinoamericanos, incluyendo Argentina, Venezuela, Colombia, Perú, Ecuador, Brasil y Bolivia entre otros, y es el principal autor del nuevo Programa de Servicio para Motores a Gas, una iniciativa global de ExxonMobil Corporation.

Es autor de las siguientes publicaciones internas de ExxonMobil Corp., traducidas a varios idiomas, “Manual de Aplicación de Grasas”, “Tratado de Análisis de Aceites Usados”, “Lubricantes Sintéticos y su Aplicación”, “Inspecciones Boroscópicas de Motores a Gas”, “Análisis de Fallas en Motores a Gas”

