

Confiabilidad Tribológica en Turbomaquinaria. Mantenimiento Predictivo y Proactivo

Roberto Francisco Romero, email: roberto.romero@colfaxfluidhandling.com

Cristián Daniel Schmid, email: cristian.schmid@colfaxfluidhandling.com

Lubritech Argentina SRL, Grupo Colfax. Servicios y Tecnología en Ingeniería en Lubricación.

SINOPSIS

En el trabajo se presentarán herramientas tecnológicas y de mejores prácticas, que se encuentran disponibles para diseñar un Programa de Confiabilidad Tribológica en Turbinas de Vapor y Turbinas de Gas, que accionan Compresores Centrífugos y otros equipos rotantes en la Industria del Oil & Gas. Se mostrará la estrecha relación que existe entre la Ingeniería en Lubricación, y la Confiabilidad de Operación de estas Grandes Máquinas. Se incluirán acciones que pueden aplicarse en todo el ciclo de vida del activo, desde su diseño, comisionado, puesta en marcha, y operación y mantenimiento programado. Comentaremos aspectos relacionados al mantenimiento predictivo a través del Programa de Análisis de Aceites, y también del mantenimiento proactivo, a través de diversas prácticas, procedimientos y tecnologías contempladas por Normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y especificaciones de diversos OEM's (Original Equipment Manufacturers) líderes en el Mercado.

INTRODUCCIÓN

Si bien desde antiguas civilizaciones hasta el presente se ha estudiado la manera de controlar el desgaste entre partes en movimiento relativo, no fue hasta 1966 por medio del "Informe Jost", que la **Tribología** tomó su verdadera dimensión como herramienta vital para el logro de grandes beneficios económicos en la Industria. Entendiendo el concepto de **Tribología** como la ciencia encargada de controlar el desgaste y sus efectos asociados, se concluye fácilmente que esta ciencia es multidisciplinaria, agrupando a varias especialidades, para el diseño de técnicas y materiales que apunten al logro ya señalado.

Utilizada ampliamente en todo tipo de Industria tiene especial aplicación en el Campo de la Industria del Oil & Gas, especialmente en equipos críticos como son los Turbocompresores. En ellos, el aceite cumple funciones de lubricante, de medio de refrigeración, de mantener limpio el sistema, proteger contra la corrosión y de medio fluido para el movimiento de los sistemas de control. Puede, además tener funciones de sellado en caso del uso de Sistemas de Sellos Húmedo.

Para entender la importancia de este fluido en el Sistema citaremos un estudio realizado en la Década del '90 por General Electric. Este estudio muestra que del total de fallas que ocasionan pérdida de producción, y por lo tanto, de dinero, en una Planta, el 20% de las mismas tiene su causa raíz en la Turbina. De todas las fallas posibles en este Sistema, el 19% tiene como causa raíz el Aceite Lubricante o de Control.

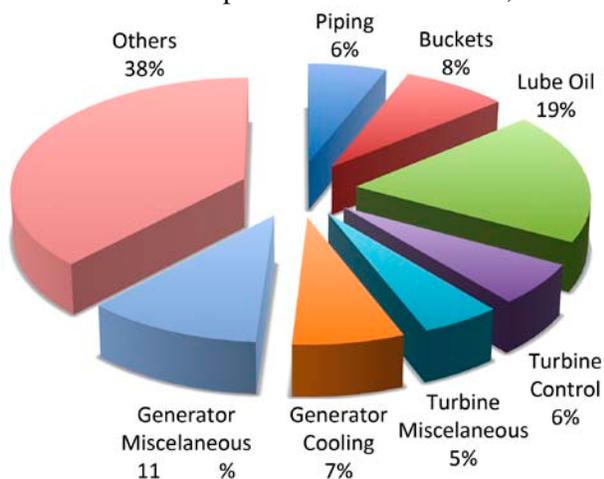


Fig. 1. Causa raíz de falla posible en turbinas, por % de ocurrencia. Estudio de General Electric.

Generalmente la aplicación del Programa redundará en Beneficios de Incremento de Disponibilidad Anual para Turbomaquinaria. Si bien los mayores beneficios son asociados a la Disponibilidad de Producción, no deben olvidarse, el menor costo de Mantenimiento, la reducción de consumo de lubricantes, y otros elementos (agua de enfriamiento, etc.), como los principales beneficios de este Programa.

DESARROLLO

El Programa de Confiabilidad Tribológico debe ser diseñado para mediano y largo plazo, evitando la toma de acciones sin planeación ni programación. Debe entenderse como una Filosofía de Excelencia impulsada y sostenida desde los altos mandos de la dirección y por supuesto ser la adecuada para cada tipo de instalación.

Por lo anterior debemos citar como dos módulos pilares fundamentales del programa, el Gerenciamiento del mismo y los Análisis de los Lubricantes. Con estos dos módulos bien implementados, el Programa logrará los frutos esperados en poco tiempo y se justificará técnica y económicamente con resultados tangibles.

Una descripción básica de estos dos módulos es la siguiente:

1. Gerenciamiento: Se refiere básicamente al Liderazgo y Administración en lo concerniente a Planeación, Programación y Ejecución del Programa. Esta función puede ser desempeñada por una empresa especialista en el tema (Outsourcing) o por miembros de la estructura propia de la Planta, oportunamente capacitados en la materia. Incluimos aquí especialmente lo relacionado a la correcta selección del Lubricante para la Turbomaquinaria en cuestión. Es una tendencia en Estados Unidos y Europas el uso de Aceites de mejor desempeño para aplicaciones en Turbomaquinaria. Normalmente en América Latina, el mayor porcentaje de aplicación aún corresponde a Aceites Minerales de Grupo I. Existe una alta oportunidad de impactar en Confiabilidad; si se utilizan aceites lubricantes de alto desempeño.

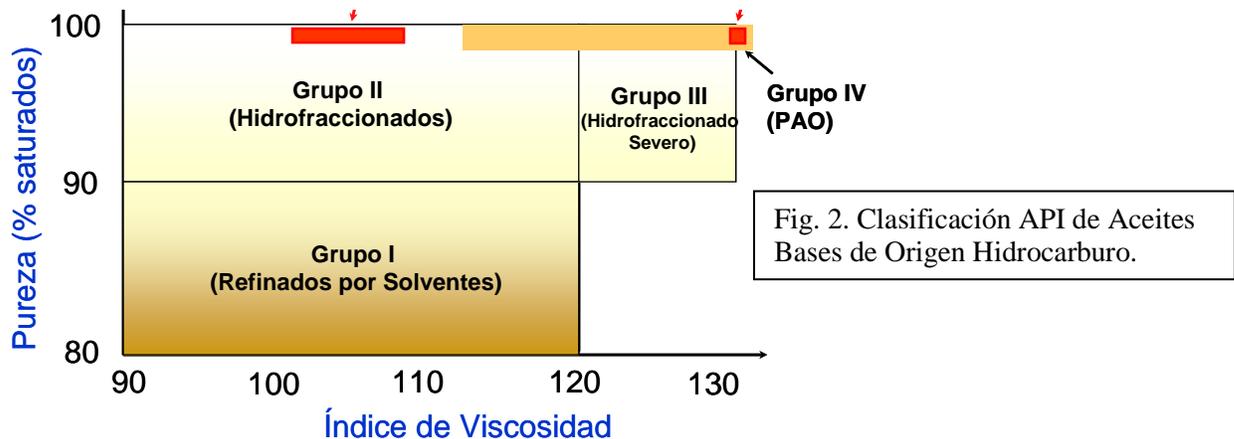
Lubricantes de Alto Desempeño: La tecnología de obtención de aceites bases de origen mineral, ha avanzado en los últimos años, poniendo a disposición de los usuarios, los lubricantes hidrofraccionados de Grupos II y III. La clasificación en Grupos es regulada por API y básicamente integra el grado de pureza de la base lubricante, y su estabilidad a los cambios de temperatura. Todos los lubricantes llamados minerales pertenecen al Grupo I y tienen un costo de adquisición de alrededor de 1-3 USD el litro. En el otro extremo encontramos a los lubricantes sintéticos de origen hidrocarburos. Se trata de los lubricantes del tipo Polialfaolefinas (PAO), mismos que presentan un 100% de pureza y un costo de adquisición de alrededor 10-12 USD el litro. Evidentemente para los grandes volúmenes de lubricante manejados en Turbinas, el costo de adquisición es realmente muy grande. Dentro de este amplio rango, encontramos los lubricantes obtenidos bajo la Tecnología del Hidrofraccionado o Hidrofraccionado Severo, que puede lograr lubricantes con un grado de pureza de 99.3%. Cabe destacar que el costo de adquisición de este lubricante es muy cercano al Aceite Mineral del Grupo I.

El hecho de utilizar lubricantes de los grupos II y III entrega los siguientes beneficios:

- Mayor Resistencia a la Oxidación: Esto queda evidenciado en los valores de las pruebas **ASTM D-943** y **ASTM D-2272**, donde se presentan valores de hasta 5 veces los de un Lubricante de Grupo I. Este ítem nos da una idea de un mayor tiempo de duración del lubricante en la máquina en operación.
- Mayor Separabilidad de los Contaminantes como Agua y Aire: Los lubricantes hidrofraccionados presentan una mayor rapidez de separación de contaminantes (medido con **ASTM D-1401** y **ASTM D-3427**), frente a los Convencionales del Grupo I. Esto hace que los contaminantes

puedan liberarse en el tanque de aceite, evitando problemas de formación de espumas y emulsiones en las partes donde se aplica el lubricante.

- Mayor Estabilidad Térmica: Los lubricantes hidrofraccionados pueden soportar mayores temperaturas de operación que los lubricantes del Grupo I, lo cual ayuda a evitar la formación de barnices, lacas, lodos y productos de degradación que pueden adherirse en partes del sistema de lubricación y control.



2. Programa de Análisis de Lubricante: Este tiene como objetivos apoyar al Mantenimiento Predictivo en cuanto a detectar posibles fallas en la máquina, conocer las condiciones del lubricante y tipos de contaminación presentes; para luego determinar las Acciones Correctivas y Preventivas a tomar, evitando de esta manera un evento no esperado en la máquina. Existe diversa bibliografía normativa de soporte sobre el tema, la cual se puede resumir para Turbinas de Vapor, de Gas e Hidráulicas en las Normas **ASTM D-4378-03** “Práctica Estándar para el Monitoreo de Aceites Minerales en Servicio en Turbinas de Vapor y de Gas” y **ASTM D-6439-05** “Guía Estándar para Limpieza, Flushing y Purificación de Sistemas de Lubricación en Turbinas de Vapor, de Gas e Hidráulicas”.

A continuación puede verse de forma resumida los principales análisis utilizados para Turbinas de Vapor y Gas, según las Normas ASTM ya citadas.

Prueba	Norma	Frecuencia recomendada	Rango aceptable / Comentario
Viscosidad a 40 °C	ASTM D-445	1-3 meses	+/- 5%
Número Acido TAN	ASTM D-974	1-3 meses	< 0,2 sobre aceite nuevo
Contenido de Agua	ASTM D-6304	1-3 meses	< 100 ppm
Contenido de Partículas	ISO 4406	1-3 meses	Entre ISO 16/14/11 y 18/16/13
Espectrometría de Metales		1-3 meses	Revisar tendencia para observar variaciones significativas
Punto de Inflamación	ASTM D-92	1-3 meses	Sólo realizable en Turbocompresores. Comparar con valor aceite nuevo
Color	ASTM D-1500	1-3 meses	Indicador cualitativo
Demulsibilidad	ASTM D-1401	6-12 meses	Verifica aditivo antidemulsibilidad
Espumación	ASTM D-892	6-12 meses	Verifica aditivo antiespumante
RPVOT	ASTM D-2272	6-12 meses	Verifica aditivo antioxidante.
MPC	ASTM D-7843	6-12 meses	Mide potencialidad de formación de barnices
Ruler		6-12 meses	Mide presencia de aditivos antioxidantes y estima vida remanente del aceite

3. Soluciones Disponibles: Una vez que los elementos básicos se conocen y se detecta la “Sintomatología” de cada equipo, se diseña la Solución o Paquete de Soluciones para el caso. Debemos distinguir entre soluciones a implementar durante la operación del equipo (teniendo en cuenta que el mayor tiempo el equipo debe estar disponible para tal condición); y las Soluciones a aplicar durante el Paro Programado.

Detallaremos en adelante cada una de ellas, recalcando nuevamente que antes de la aplicación de una o varias soluciones, es vital realizar el estudio de “Diagnóstico” o Auditoría Tribológica para conocer los problemas a los que nos enfrentamos.

Purificación de Lubricantes: ¿Alguna vez ha sufrido paradas inesperadas por problemas en cojinetes? Incremento de temperatura, vibraciones, etc. ¿Ha verificado en alguna situación que la presencia de contaminantes en el sistema de lubricación, sello y control está afectando la normal operación de su equipo?

Como bien sabemos; en los últimos años se está prestando especial atención a la influencia de los contaminantes en el lubricante; en la vida útil de la máquina. Hace varios años, simplemente se tenía en cuenta la vida útil del propio lubricante, pero estudios recientes, confirman que la vida de elementos como cojinetes, rodamientos y sistemas hidráulicos; aumenta considerablemente cuando se toma especial cuidado en el control de contaminantes.

Lo que aquí proponemos es una manera de actuar mucho más proactiva hacia la atención de este problema; ya que la gestión actual del control de la contaminación está mucho más orientada a la corrección del problema, una vez detectado; existiendo muchos casos en que ni siquiera se detecta un problema.

En las figuras 3 y 4; podemos ver claramente cuál es la relación entre la expectativa de vida de diferentes elementos mecánicos; con la presencia de contaminantes sólidos (fig. 3); y agua (fig. 4). Podemos entender fácilmente que la presencia combinada de ambos contaminantes; contribuye de manera sinérgica a afectar esta relación. Para ello, existen tres casos especiales que merecen atención.

	20/17	19/16	18/15	17/14	16/13	15/12.	14/11.	13/10.	12/9.	11/8.	10/7.										
26/23	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	7.5	>10	9	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
	4	2.5	4.5	3	6	3.5	6.5	4	7.5	5	8.5	6.5	10	7	>10	9	>10	10	>10	>10	>10
25/22	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	7	>10	9	>10	>10	>10	>10	>10
	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5	3.5	6.5	4	8	5	9	6	10	7.5	>10	9	>10	>10	>10
24/21	3	2	4	2.5	6	3	7	4	9	5	>10	6	>10	7	>10	8	>10	10	>10	>10	>10
	2.5	1.5	3	2	4	2.5	5	3	6.5	4	7.5	5	8.5	6	9.5	7	>10	8	>10	10	>10
23/20	2	1.5	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	8	>10	9	>10
	1.7	1.3	2.3	1.5	3	2	3.7	2.5	5	3	6	3.5	7	4	8	5	10	6.5	>10	8.5	>10
22/19	1.6	1.3	2	1.6	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	8	4	>10	5	>10	6	>10	7	>10
	1.4	1.1	1.8	1.3	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5.5	3.5	7	4	8	5	10	5.5	>10
21/18	1.3	1.2	1.5	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	7	>10
	1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.4	2.2	1.6	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5	3.5	7	4	9	5.5	10
20/17			1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	4	9	5	>10	7	>10
			1.2	1.05	1.5	1.3	1.8	1.4	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	5	3	6	4	8	5.5	10
19/16					1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	4	9	6	>10
					1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.2	1.7	3	2	3.5	2.5	5	3.5	7	4.5	9
18/15							1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	4.5	>10
							1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	5.5	3.7	8
17/14									1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	6	3	8
									1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.7	3	2	4	2.5	6
16/13											1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	3.5	6
											1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.8	3.7	3	4.5
15/12.			Máquinas Hidráulicas y Motores		Rodamientos								1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4
													1.2	1.1	1.5	1.4	1.8	1.5	2.3	1.8	3
14/11.			Chumaceras y Turbomaquinaria		Cajas de Engranajes y otros										1.3	1.3	1.6	1.6	2	1.8	3
															1.3	1.2	1.6	1.4	1.9	1.5	2.3
13/10.																	1.4	1.2	1.8	1.5	2.5
																	1.2	1.1	1.6	1.3	2

Fig. 3. Tabla de extensión de vida por presencia de partículas sólidas en lubricante. Aplicable para cuatro distintos tipos de elementos de máquinas. Máquinas Hidráulicas, Rodamientos, Caja de Engranajes y Cojinetes de Deslizamiento (Chumaceras). En el eje de ordenadas se busca el Código de Limpieza ISO 4406 actual; y en el eje de abscisas el Código de Limpieza deseado; encontrándose un rectángulo que entrega 4 multiplicadores de vida del elemento, según corresponda. Ej. Pasando de un Código 22/19 a uno 15/12; se multiplica la vida de cojinetes por 4.5

		New Moisture Level (ppm)															
		10,000		5,000		2,500		1,000		500		250		100		50	
Current Moisture Level (ppm)	Rolling Element	Journal	Rolling Element	Journal	Rolling Element	Journal	Rolling Element	Journal	Rolling Element	Journal	Rolling Element	Journal	Rolling Element	Journal	Rolling Element	Journal	
	50,000	2.3	1.6	3.3	1.9	4.8	2.3	7.8	2.9	11.2	3.5	16.2	4.3	26.2	5.5	37.8	6.7
25,000	1.6	1.3	2.3	1.6	3.3	1.9	5.4	2.4	7.8	2.9	11.2	3.5	18.2	4.6	26.2	5.5	
10,000			1.4	1.2	2.0	1.5	3.3	1.9	4.8	2.3	6.9	2.8	11.2	3.5	16.2	4.3	
5,000					1.4	1.2	2.3	1.6	3.3	1.9	4.8	2.3	7.8	2.9	11.2	3.5	
2,500							1.6	1.3	2.3	1.6	3.3	1.9	5.4	2.4	7.8	2.9	
1,000									1.4	1.2	2.0	1.5	3.3	1.9	4.8	2.3	
500											1.4	1.2	2.3	1.6	3.3	1.9	
250													1.5	1.3	2.3	1.6	
100															1.4	1.2	

Fig. 4. Tabla de extensión de vida por presencia de agua en lubricante. Aplicable para dos distintos tipos de elementos de máquinas. Rodamientos, y Cojinetes de Deslizamiento. Ej. Pasando de un contenido de agua de 2,500 ppm (0.25%) a uno de 100 ppm (0.01%); se multiplica la vida de cojinetes por 2.4

- I- **Presencia de Humedad:** El agua y el aceite se pueden mezclar, contrariamente a lo que se piensa, sólo que en pequeñas cantidades. Para los aceites minerales de turbinas e hidráulicos, esta cantidad está entre 50 y 250 ppm, dependiendo de la temperatura, como se muestra en la figura 4. Toda cantidad mayor de agua presente, se encontrará en estado de emulsión y/o libre, causando interferencias en la formación de la película hidrodinámica de lubricación, corrosión en partes metálicas, aceleración de la degradación del lubricante y agotamiento de los aditivos. Entre las distintas tecnologías de remoción de agua, se comenta que el centrifugado tiene gran efectividad para remoción de agua libre, pero es muy limitado en cuanto al agua emulsionada, no pudiéndose alcanzar valores por debajo de 600 ppm. Las tecnologías de vacío y transferencia de masas por “air stripping” logran valores por debajo de 50 ppm. Teniendo en cuenta la operatividad y mantenibilidad de estas tecnologías, debe considerarse la que menos partes móviles tenga y más confiabilidad de operación presente para el usuario.



Fig. 5. Curva de saturación del agua en aceite de turbina mineral.

- II- **Presencia de Partículas:** La presencia de partículas en el lubricante causa desgaste entre partes en movimiento e interferencias en películas fluidas de lubricante. Es por ello que es vital su control en el sistema. Se detecta a través del Conteo de Partículas según ISO (International Organization for Standardization) 4406. En este análisis se realiza conteo de partículas mayores a 4, 6 y 14 μ (antes 2, 5 y 15 μ) por mililitro de aceite. En una revisión de la Norma se realizó el cambio del tamaño de partículas a contabilizar; teniendo en cuenta la modificación de las partículas patrones en el ensayo. De todas maneras, un Código ISO 16/14 bajo la anterior revisión, es muy similar a un Código ISO 16/14 con la revisión vigente. Cuando el Código ISO está por encima del permitido para la Máquina, debe programarse una filtración externa con un equipo de alta eficiencia. Una característica vital y necesaria para el logro de resultados es contar con elementos filtrantes clasificados según el Factor β , que se define en ISO 16889. Se aconseja contar con un laboratorio portátil de conteo de partículas en sitio para seguimiento de la filtración externa.

El hecho más significativo de realizar una remoción de partículas, radica en la Extensión de Vida del Elemento Mecánico en contacto con el Lubricante. Este valor puede calcularse teóricamente utilizando las tablas de extensión de vida, según la aplicación.

- III- **Presencia de Barnices y Lodos:** Este tipo de contaminantes ha sido incluido recientemente en las Normas ASTM como tal. Se trata de partículas insolubles en el lubricante, de tamaño menor a 1 μ y cuya causa de formación es la degradación del lubricante y el agotamiento de algunos aditivos. Estos contaminantes no solubles forman depósitos en instrumentos de control (servoválvulas electrohidráulicas), intercambiadores de calor, cojinetes, elementos filtrantes, causando una falla que es difícil de predecir. Existen tecnologías (citadas en la normatividad vigente) que previenen la formación de barnices en el sistema. El principio de funcionamiento de estas, se basa en la polaridad eléctrica que poseen estos contaminantes, lo que permite afectarlos por un campo electrostático externo, lográndose una aglomeración de las partículas y una posterior retención y remoción de las mismas del sistema. Hasta hace pocos años, el problema de barnices y lodos sólo se detectaba cuando se causaba un daño al equipo,

o en alguna revisión mayor. En los últimos años, se han desarrollado Análisis especiales para determinar la potencialidad de formación de barnices; y de esta manera prever la existencia de estos contaminantes en el sistema. Esto se realiza a través de los Análisis MPC, RPVOT y Ruler ya nombrados.

Como mencionamos con anterioridad; la filosofía tradicional y menos eficiente; es la de colocar un equipo externo de purificación una vez que se detecta un problema; pero en ocasiones, el tiempo de reacción es grande; y aun así; podemos llegar a estar actuando mucho después de generado el problema; ya que no se toman muestras de aceite en tiempo real.

El cambio sustancial de Filosofía que se propone es actuar de manera preventiva-proactiva, procurando instalar equipos purificadores externos que tengan la capacidad de eliminar la presencia de estos contaminantes; y sobre todo operar de manera autónoma 24 horas al día, 365 días al año. Es por ello que se propone la colocación y funcionamiento de equipos purificadores instalados de manera fija; con tubería rígida; lo que valga el comentario, ayuda a mejorar las condiciones de seguridad de la Instalación, evitando cables eléctricos provisionarios o uso de mangueras.

En la medida en que hemos presentado esta opción en distintas Refinerías de la Región; al inicio se han recibido comentarios en contra de esta propuesta, dados los antecedentes negativos de problemas operativos de equipos purificadores tradicionales como centrifugadoras; donde se registran variados casos de mala operación con el consiguiente derrame involuntario de aceite lubricante del depósito. Esto ocurre, porque cuando se rompe el sellado con agua de la centrifugadora; este equipo comienza a derramar lubricante en lugar de agua.

Estos antecedentes negativos han forjado la idea de que la purificación del aceite lubricante debe hacerse puntualmente cuando se detecta un problema; y con un supervisor acompañando todo el proceso de forma presencial.

Sin embargo, cuando se entiende que existen tecnologías modernas que operan de forma segura y autónoma; se puede romper el paradigma anterior y pasar a un modo más eficiente de controlar y prevenir el problema de presencia de contaminantes en el lubricante; que causan que se acorte la vida útil del equipo; y por consiguiente baje su confiabilidad y/o disponibilidad.

- B) Flushing Oleohidráulico: ¿En alguna oportunidad ha tenido retrasos en puesta en marcha de Turbomaquinaria durante una Parada Programada o fase de Comisionado; porque el proceso de Flushing demoraba más de lo planeado? ¿Ha tenido alguna vez una falla prematura por cojinetes, luego de poco tiempo de operación?

El objetivo del Flushing es eliminar los contaminantes presentes en el sistema de lubricación y control, de una manera efectiva y rápida, antes de poner en marcha un equipo, en la fase de Comisionado o luego de una Parada Programada; es decir se busca Confiabilidad en el arranque de la turbomaquinaria (etapa de mayores riesgos de falla), y Disponibilidad, o sea que la realización de esta limpieza no lleve más tiempo del necesario. Cabe destacar que este último punto es denominador común en varias aplicaciones en la Industria de Oil & Gas; existiendo casos de retrasos innecesarios por una práctica de flushing no acorde a la Norma. El ejemplo más típico es el Turbocompresor de aire de Unidades FCCU; que es el primero que debe ponerse en operación antes de arrancar la Unidad, luego de una Parada Programada.

Los puntos básicos recomendados por la Norma **ASTM D-6439-05**, para que el Flushing sea exitoso, es decir, retire la mayor cantidad de suciedad del sistema, y en el menor tiempo posible, se señalan varios aspectos a tener en cuenta, siendo los más importantes.

- 1- Debe realizarse antes del primer arranque del equipo (Comisionado), o bien en Paradas Programadas.
- 2- Lograr un régimen de circulación turbulento. Normalmente el Número de Reynolds debe ser mayor a 4.000; para asegurar que las distintas capas de fluido dentro de la tubería, tengan una mejor acción sobre

las paredes internas de la tubería. Existe bibliografía reciente en Estados Unidos; que indica que para asegurar la competencia efectividad de un Flushing, incluso el Número de Reynolds tendría que ser mayor a 9.000 – 10.000.

- 3- Uso de elementos filtrantes de alta eficiencia. Se deben utilizar elementos filtrantes con un factor β_x mayor a 1.000, para asegurar que las partículas removidas, sean retiradas del sistema.
- 4- Utilización de Analizadores de Aceite en sitio. Es muy importante contar con equipos de análisis de Código ISO 4406 (Contenido de Partículas), para realizar un seguimiento del procedimiento, y determinar cuando la limpieza ha finalizado.

Lo anterior brindará Confiabilidad y Disponibilidad al Sistema, permitiendo un arranque sin sobresaltos, y la optimización del tiempo de puesta en marcha y parada programada, conceptos cada vez más demandados para incrementar la Producción Anual.

Para lograr un régimen turbulento, es necesario conocer los diámetros de tubería a intervenir, y aplicar la siguiente ecuación:

$$Re = 21.200.Q / (V.d)$$

Q [lts/min]

V [Cts], a la t° de trabajo

d [mm]

En la práctica, para aumentar el Re, se puede optar por utilizar equipos externos de bombeo de alto caudal, usar un fluido de menor viscosidad para el trabajo, o bien calentarlo para disminuir su viscosidad. Generalmente, se opta por una combinación de todas las opciones anteriores.

Así por ejemplo, para realizar un Flushing en una Tubería de 8" (203,2 mm), utilizando un Aceite ISO VG 32, y considerando una temperatura de operación de 40°C, el caudal mínimo necesario para cumplir con los requisitos mínimos de la Norma sería de unos 1.230 lts/min. Es de notar que las propias bombas del sistema de lubricación de la turbina generalmente están diseñadas para proveer un Flujo Laminar, por lo cual no es recomendable su uso para realizar el Flushing.

En lo que respecta a filtros de alta eficiencia, se hace indispensable utilizar una batería de elementos filtrantes externos con un factor $\beta_x > 1.000$, recordando que este factor β_x nos indica qué tan eficiente en la remoción de partículas es el elemento filtrante. Para este caso $\beta_x > 1.000$, significa que la eficiencia de remoción será mayor al 99,9% en partículas mayores a "x" micrones.

Ítem	Procedimiento Tradicional. Desde hace 40 años o más.	Procedimiento Especializado. Año 1999
Velocidad Circulación Aceite	Normal del Sistema de Lubricación. 300 GPM aprox.	Mayor a 3 veces la Normal del Sistema. Hasta 2,500 GPM
Elementos de Retención de Suciedad	Mallas Metálicas Ultrafinas (100 Mesh). Equivalen a 127 μ	Elementos Filtrantes de Alta Eficiencia 3 μ o menor
Finalización Proceso de Limpieza	Cuando no se detecta suciedad a simple vista en las mallas metálicas. Ojo Humano > 40 μ	Cuando el Análisis de Conteo de Partículas en Sitio determina que se alcanza ISO 14/12
Productos Especiales para Realizar la Limpieza	Utilización de Vapor, Aire a Presión.	Posibilidad de utilizar Productos Químicos Especiales para realizar Limpieza Química Previa

Es muy importante señalar ahora las diferencias entre el procedimiento recién definido, y el que erróneamente suele utilizarse en la industria bajo el nombre de “Flushing”.

Cuando se menciona la palabra “Flushing”, en repetidas ocasiones se está refiriendo simplemente a una filtración externa tipo riñón del tanque de aceite o reservorio del sistema. Aunque se utilicen elementos filtrantes de alta eficiencia, el lector comprenderá fácilmente que los alcances de este procedimiento, son mucho más limitados que los alcances del Flushing definido por Norma. Aquí se pretende simplemente filtrar el aceite, dejarlo en Código, y no realizar una limpieza en el sistema, objetivo central del concepto “Flushing” definido con anterioridad.

Este procedimiento de filtración, puede ser realizado con el sistema en operación, utilizando caudales mucho menores, ya que el uso aquí de caudales elevados, generaría turbulencias dentro del reservorio que pueden afectar la normal operación del sistema de lubricación o control.

Combinando, y no confundiendo, los procedimientos de Flushing y Filtración durante la vida útil de los equipos, se logran una mayor duración de los componentes mecánicos, y por lo tanto una mayor confiabilidad de los equipos. Está demostrado, a través de cálculo de vida de rodamientos, o tablas de extensión de vida para cojinetes, sistemas hidráulicos, motores, engranajes, y otros elementos mecánicos, que mientras menor es el nivel de contaminación, mayor es la vida de estos elementos.

En la siguiente tabla, se resumen los aspectos principales de ambos términos y sus diferencias:

	Filtración	Flushing
Objetivo	Limpiar Aceite	Limpiar Sistema
¿Cuándo?	Operación Máquina	Arranque o Paro Programado
Caudales	Bajos	Altos (Re)
Eficiencia Filtración	Alta	Alta

BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL PROGRAMA

Se expone a continuación una Justificación Económica, basada en logros de incremento en Confiabilidad y en Disponibilidad; considerando de forma separada los beneficios durante Parada Programada y durante la Operación de Equipos.

A- Aumento de Confiabilidad: Paradas Programadas

Según datos estadísticos, el 19% de las Fallas en turbomaquinaria, corresponde a fallas tribológicas. De ese 19%, un alto porcentaje corresponde a fallas en arranques de equipos nuevos o en paros programados (mortalidad infantil). Consideramos que el hecho de pasar de un flushing realizado en forma tradicional, a un flushing oleohidráulico de acuerdo a Norma ASTM D6439-05; incrementa sustancialmente la confiabilidad del equipo.

Aunque esto es difícil de cuantificar; seguiremos el siguiente procedimiento.

- 1- Definir tres tipos de falla que puede ocurrir en un arranque de una turbina, luego de un mantenimiento programado.
 - a. Falla menor. Luego del arranque se verifican taponamientos de filtros, mismos que se deben reemplazar durante las primeras dos semanas. Costo de 10,000 USD por equipo.
 - b. Falla significativa. Luego del arranque se verifican vibraciones, y se debe bajar carga un par de semanas, mientras se realizan controles. Costo de 150,000 USD.
 - c. Falla catastrófica. Luego del arranque se produce una interferencia en cojinetes, ocasionando la parada total, y necesidad de cambio de cojinetes. Esto ocasiona 3 días de mantenimiento adicional. Costo de 3,400,000 USD.
- 2- Asignar una probabilidad de ocurrencia a cada falla, comparando el procedimiento normal de flushing, con el procedimiento bajo Norma ASTM.

Vamos a considerar aquí, que mientras realizamos el procedimiento convencional, contamos con mayor probabilidad de ocurrencia de cada una de las fallas anteriores, en comparación a cuando realizamos el procedimiento de flushing bajo Norma ASTM. Los valores asignados son:

Fallo en arranque	Flushing convencional	Flushing ASTM
No ocurre fallo	45%	60%
Falla menor	40%	30%
Falla significativa	10%	8%
Falla catastrófica	5%	2%

- 3- Calcular el costo promedio probable de cada caso; y la diferencia será el beneficio buscado.

Aquí multiplicamos las probabilidades de ocurrencia por el costo de cada falla; y obtenemos el valor final.

Procedimiento Flushing	Costo Falla (USD)
Convencional	$10,000 \times 0,4 + 150,000 \times 0,1 + 3,400,000 \times 0,05 = 189,000$
ASTM	$10,000 \times 0,3 + 150,000 \times 0,08 + 3,400,000 \times 0,02 = 83,000$
Beneficio	106,000 USD por equipo intervenido

Si consideramos un total de 10 equipos críticos en la Unidad y un promedio de Paradas Programadas cada 5 años; tenemos un ahorro anual estimado de:

$$\text{Ahorro Anual} = (106,000 \text{ USD} \times 10) / 5 = 212,000 \text{ USD.}$$

B- Aumento de Confiabilidad: Operación del Equipo

Teniendo en cuenta las conclusiones técnicas a las que llegamos con anterioridad; y las tablas de extensión de vida; puede inferirse fácilmente que el hecho de contar con equipos de purificación de aceites operando de forma continua en los equipos críticos, brindará un incremento de confiabilidad durante su operación. Para cuantificar ese beneficio, seguimos el mismo procedimiento anterior, definiendo:

- a. Falla menor. Por fugas de vapor por sellos, se contamina el sistema de lubricación y se debe purgar diariamente y reponer lubricante. Costo anual de 10,000 USD por equipo.
- b. Falla significativa. La presencia de agua y partículas en el sistema de lubricación ocasiona cambios frecuentes en elementos filtrantes, y la necesidad de reposiciones muy frecuentes de lubricantes, conexiones de equipos purificadores con supervisión constante. Costo anual de 150,000 USD.
- c. Falla catastrófica. La presencia de agua y partículas en el sistema de lubricación ocasiona una falla catastrófica que implica parar el equipo y reparar durante 2 días. Costo de 2,500,000 USD.

Cuando asignamos las probabilidades de ocurrencia en cada caso, tenemos:

Fallas en operación	Filosofía Tradicional (Mantenimiento Reactivo)	Filosofía Propuesta (Mantenimiento Proactivo)
No ocurre fallo	60%	84.5%
Falla menor	25%	10%
Falla significativa	13%	5%
Falla catastrófica	2%	0.5%

El beneficio de aplicar el programa será:

Filosofía Mantenimiento	Costo Falla (USD)
Reactiva	$10,000 \times 0,25 + 150,000 \times 0,13 + 2,500,000 \times 0,02 = 72,099.5 \text{ USD}$
Proactiva	$10,000 \times 0,1 + 150,000 \times 0,05 + 2,500,000 \times 0,005 = 21,000$
Beneficio	51,099.5 USD por equipo intervenido

Considerando los 10 equipos críticos; tenemos:

$$\text{Ahorro Anual} = 51,099.5 \text{ USD} \times 10 = 510,995 \text{ USD}$$

C- Disponibilidad de la Turbomaquinaria: En este apartado nos centraremos únicamente en Paradas Programadas; ya que el efecto de disponibilidad de equipo fue considerado en el Apartado anterior.

Normalmente en plantas de proceso continuo la disponibilidad de toda la planta, depende exclusivamente de la disponibilidad de cada uno de los equipos de compresión centrífugo. Esto aplica para plantas de Coke, FCCU (Fluid Catalytic Cracking Unit); Etileno, entre otras.

Podemos considerar como “costo de oportunidad”, el hecho de no tener retrasos en la puesta en marcha luego de una parada programada; haciendo vital de esa forma, la realización de un flushing oleohidráulico exitoso, a fin de asegurar el menor tiempo de intervención.

Dentro de nuestras experiencias, se verifican sustanciales ahorros en tiempos de puesta en marcha en distintas industrias. Los mismos van desde algunas horas, hasta 10 días, inclusive para turbomaquinaria de más de 10 años de edad, y con intervenciones cada 5 años.

Como un caso promedio típico, que debe ser ajustado según la industria, podemos considerar como ejemplo la operación de una planta FCCU en refinerías, donde la producción diaria corresponde a 400,000 USD; y considerar de manera bastante conservadora que con el procedimiento de flushing oleohidráulico de acuerdo a Norma, se puede obtener un beneficio de un día, es decir, si no se realizara el procedimiento de forma adecuada, al menos tendríamos **un día** de retraso en la puesta en marcha. Nuevamente, si consideramos 10 Equipos Críticos con Paradas Programadas cada 5 años; tendremos.

$$\text{Ahorro Anual} = (400,000 \text{ USD} \times 10)/5 = 800,000 \text{ USD.}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se observa que los Beneficios Esperados de la aplicación de este Programada son del orden de 1,522,995 USD/anales para una Refinería típica con 10 Turbomáquinas.

A los efectos de calcular los Indicadores Económicos; necesitamos estimar un valor de inversión inicial y durante el tiempo para llevar a cabo este Programa.

Inversión Inicial. Adquisición de 10 equipos purificadores para operar de manera continua en cada equipo. Total 700,000 USD.

Gasto anual en mantenimiento de equipos de purificación y realización de análisis de aceites. Total 162,000 USD/año.

Gasto anual en realización de Flushing Oleohidráulico. Estimamos 2 por año. Total anual 120,000 USD/año.

Realizando la proyección de flujos a 10 años con los valores de Inversión, Gasto total Anual y Beneficios, con una tasa de descuento del 10%; obtenemos los siguientes indicadores.

VAN: 6,925,380 USD.
TIR: 177%
Payback: 3.4 meses

Estos indicadores económicos demuestran un retorno excelente de esta inversión. No se han tenido en cuenta en el cálculo, beneficios tales como:

- Reducción de Consumo de Lubricante.
- Incremento de Seguridad en Instalaciones y Personal.

CONCLUSIONES

Si bien la puesta en práctica de un Programa de Confiabilidad Tribológica requiere una correcta planeación y ejecución, pasando primero por técnicas de detección de problemas y de gerenciamiento; los resultados obtenidos con la aplicación de las Soluciones son inmediatos y duraderos.

La aplicación de un Programa de este tipo, requiere un cambio de Filosofía en cuanto a Mantenimiento; y sobre todo, un convencimiento claro sobre los beneficios que la Tribología o Ingeniería en Lubricación aporta en Industrias de Proceso Continuo, como las Refinerías de Petróleo.

BIBLIOGRAFÍA

- Estudio de GE “Contributors to costly forced outage”, 1991.
- Informe de Peter Jost, en “Department of Education and Science Report”, 1966.
- Normas ASTM D-4378-03, D-6439-05; ISO 4406, ISO 16889.
- Tablas de extensión de Vida publicadas por Noria en Año 2003, durante Evento de Lubrication Excellence.

CURRICULUM VITAE

Roberto Romero

Profesional sénior con 30 años de experiencia en Industria en General destacando en la Oil & Gas, Refinación, Minera, Cementos, Siderúrgica, etc., sólidos conocimientos en Lubricación Integral, Sistemas de Lubricación por Niebla Bombas centrífugas, compresores y equipos rotantes en General, ajuste, alineación, regulación, conocimientos avanzados de sellos mecánicos, etc.. Elaboración de Planes de Mantenimiento, Ejecución, Análisis y recomendaciones en la evaluación de equipos dinámicos (Turbo-Compresores, Turbo-Bomba, etc.) utilizando las técnicas de Mantenimiento Predictivo y Proactivo, Amplios conocimiento en Tribología, expositor en diferentes seminarios dictados en Argentina y el exterior. 19 años como Gerente General en la empresa Lubritech Argentina S.R.L, Director Cono Sur en Colfax, avalan su alto conocimientos en gestión y desarrollo de mercados y productos.

Cristián Schmid

Egresado de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, en 1999, con el título de Ingeniero Electromecánico. Desde el año 2000, a la fecha, trabajando en el Grupo Sichelub Lubritech, en diversas áreas y países. Desde año 2000 a 2002, Responsable de Servicio PADELI (Programa de Alta Dirección en Lubricación Integral) en Refinería YPF de Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina. Desde año 2002 a 2005, Director de Servicios Industriales en el Corporativo de la Empresa, en México DF, realizando tareas de desarrollo técnico y de nuevas aplicaciones para el Sector de Generación de Energía. Desde año 2006 a 2009, Director Gerente de Sichelub Ibérico en España, llevando adelante tareas comerciales, operativas y administrativas en la filial Española del Grupo Sichelub Lubritech. Desde 2010 a 2013, Director de Desarrollo Corporativo para el Grupo con funciones comerciales y técnicas. Interacción con nuevos clientes, nuevos sectores industriales, y desarrollo del recurso humano del Grupo. Desde 2014 a la fecha, Director de Subsidiarias del Grupo Colfax para Sudamérica y Europa del Oeste.