

Tribología y Mantenimiento Proactivo

CAPÍTULO 1

Tribología en: El Motor Estacionario a Gas Natural

Ing. Omar Linares O.

Widman International S.R.L.

Santa Cruz, Bolivia

Fundamentos de la Tribología

4.1 Antecedentes

Los motores del gas natural son extraordinarios. Ellos operan en una variedad de excepcionales ubicaciones, desde los climas muy fríos del ártico hasta las regiones calientes y húmedas de los trópicos meridionales y más allá.

Los motores a gas natural son de varios diseños, incluyendo el motor Caterpillar® vertical en línea en V y el de cuatro tiempos, el de dos tiempos Cooper Bessemer en V integral con un compresor reciprocante horizontalmente opuesto y el de carter doble verticalmente opuesto, o el motor de dos tiempos construido por Fairbanks Morse.

Estos motores se requieren para quemar una variedad de gases incluyendo, pero no necesariamente limitado a gas agrio con conteniendo azufre, gas dulce sin contenido de azufre y muy poco dióxido de carbono; gas húmedo conteniendo relativamente altas cantidades de gases de componente tales como butano; y finalmente gas sucio o gas de tanques digestores, compuestos principalmente de metano y dióxido de carbono el cual contiene con frecuencia halógenos tales como el flúor y el cloro.

Además, en la mayoría de las jurisdicciones donde estos motores operan, las emisiones del escape han llegado a ser un grave inconveniente. Para controlar o eliminar estas emisiones, parte de los diseños actuales de motor requieren los convertidores catalíticos, que limitan el tipo de aditivos y el porcentaje de formulaciones que pueden ser utilizados en los lubricantes.

Estos lubricantes varían con el diseño de motor y las condiciones y la gama de operación de aceites desde minerales sencillos a medianos y altos en ceniza, aceites con detergentes alcalinos e inhibidos a la oxidación, a totalmente con ceniza, y aún altamente detergentes.

Los motores a Gas (NGE “Natural Gas Engines”) se utilizan comúnmente para accionar compresores a gas natural, generadores estacionarios en stanby, bombas para irrigación y contra el fuego, también se utilizan cada vez más accionar cogeneración primaria en centrales de energía eléctricas.

El principal ventaja del motor a Gas Natural sobre el motor a diesel es el bajo contenido de emisiones de monóxido de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (COx) en el escape, residuos al aire y en algunos casos bajos costos de operación por este combustible.

Los motores a gas natural están disponibles en varias configuraciones y tamaños, por ejemplo citamos:

1. Diseños de dos o tres tiempos
2. Desde menores a 100 HPs de potencia hasta los 16,000 HPs (los de 800 a 1,500 HPs son los más comunes).
3. De uno a 20 cilindros de potencia.
4. Capacidad de sumidero de 14 a 6,000 litros (de 300 a 800 litros son los mas comunes).
5. Las velocidades del motor van desde 300 RPM (unidades de velocidad baja) a 2,000 RPM en unidades de alta velocidad. La mayoría operan a 1,200 RPM.
6. El largo de los pistones va desde 572 mm en unidades de baja velocidad con carreras de 89 a 240 mm, comunes en unidades de alta velocidad.
7. La toma de aire puede ser de aspiración natural o turboalimentada (dos tercios de los motores nuevos son turboalimentados).
8. Las unidades de motor y compresor pueden estar separadas, esto es unidas punta a punta en el cigüeñal por un acoplamiento, o integral, en la que el motor y el compresor tienen un solo cárter común.

El combustible típicamente utilizado en estos motores es dulce, gas natural seco (mas del 85% es metano). En algunos casos, en los campos de la producción de gas, contiene sulfuro de hidrogeno (H_2S) (arriba de 8,000 ppm), el dióxido de carbono (CO_2) y el nitrógeno (N). Hay también un aumento en el uso de digestores de gas reunidos de sistemas de agua residual y gas sucio que es utilizado como combustible. De éstos son muchos combustibles de mala calidad con el contenido más bajo de metano (el 50 por ciento) y pueden contener tanto como 5 por ciento de compuestos de sílice base así como fluoruros, los cloruros, el cobre, el estaño, el hierro, sulfuro de hidrógeno y hasta el 50 por ciento de CO_2 . Los combustibles con el contenido bajo de energía,

tienen una naturaleza corrosiva alta o abrasiva (debe ser prefiltrada a menos de 0.5 micrones) sino afectará el desempeño de motor.

Los aceites de motores a gas (NGEOs) usan en estos motores una formulación especial que difiere del aceite de motor a gasolina y a diesel. Esto porque los motores a gas natural tienen las siguientes ventajas:

Quema limpia, sin contaminación de hollín en el aceite del cárter del motor. Esto requiere menos detergencia/dispersancia y permite a estos lubricantes ser formulados con menos contenidos de ceniza.

Quema de combustible gaseoso. Por lo tanto, no hay dilución del combustible y previene el incremento de la viscosidad del aceite que es mas importante.

Quema más caliente (165°C a 235°C la temperatura más alta del escape) que el diesel. Por lo tanto, la oxidación y la nitración del aceite se incrementan asi como el desgaste de válvulas.

Opera a velocidad constante. Nos deja tener un régimen permanente en la operación.

No se tienen especificaciones mínimas del API para los NGEOs como es común con los aceites para motores a Gasolina y Diesel (por ejemplo CI-4 o SL). Algunos fabricantes de equipos se refieren al viejo API SAE CC o CD de aceite de motor diesel para establecer el mínimo desempeño requerido, pero el uso de las especificaciones de motores a diesel para clasificar los motores a gas es cuestionado por muchas personas.

Varios fabricantes de motores han desarrollado sus propias pruebas para motor a gas, pero para la mayor parte el desempeño es aun medido por la prueba de campo. La aplicación de cogeneración de Dresser Rand y Waukesha® tienen las únicas listas publicadas de aceites que están aprobados por ellos.

Ha habido una discusión extensa acerca de las designaciones de desempeño del API NGEO desde finales de la década de los ochentas y solo limitada por el progreso hecho. Por lo tanto, en este momento, el usuario de aceite de motor de gas natural debe depender de la integridad de su proveedor de aceite para proporcionarle una buena calidad, un aceite verdadero de motor a gas natural y no un aceite de motor a diesel remarcado.

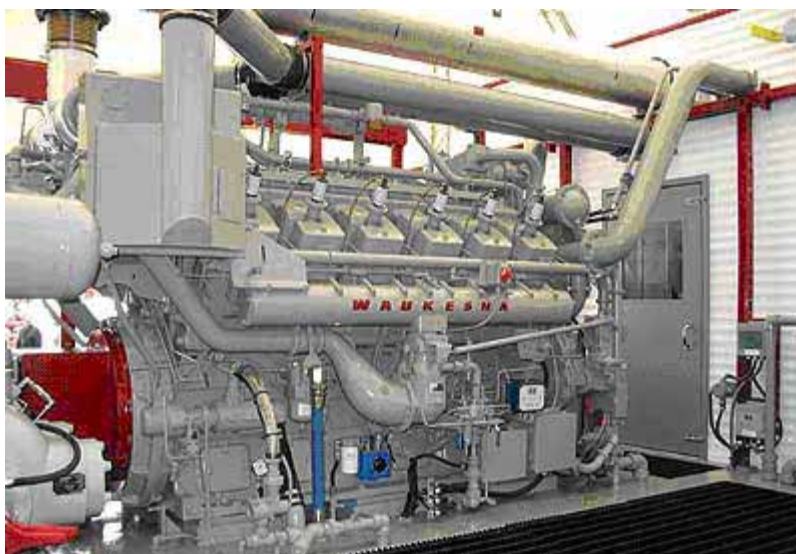


Fig. 4.1 Vista general de un motor a gas

Los NGEOs están generalmente disponibles en dos grados de la viscosidad, un SAE 30 (Sociedad de Ingenieros Automotrices) y un SAE 40. El monogrado SAE 40 es muy común por su rango de trabajo. Aceites multigrados también están disponibles en un grado SAE 15W-40. Estos últimos reciben alguna aceptación en el mercado donde frecuentemente existen temperaturas bajas o donde calentadoras de cárter no están disponibles. Los Multigrados proporcionan mejor desempeño a baja temperatura en el arranque además puede ofrecer un consumo reducido de aceite (con emisiones más bajas) y la economía mejorada del combustible.

Sin embargo, estos pueden ser propensos a la nitración (degradación) incrementada del aceite y no pueden ser recomendados para el uso en el gobernador por el fabricante original del equipo (OEM).

4.2 Singularidad de Motores a Gas Natural

La diferencia primaria entre aceite para motor a gas natural y otros aceites de motores de combustión interna es la necesidad de resistir los varios niveles de la degradación del aceite causada por el proceso de la combustión del gas, que tiene como resultado la acumulación de óxidos de nitrógeno. Esta condición, llamada comúnmente nitración, se debe controlar regularmente si ambos, lubricante y la vida de motor quieren ser mantenidos.

El contenido de ceniza sulfatada es otra consideración extraordinaria de los aceites de motor a gas natural y el significado de la ceniza sulfatada se describirá con todo detalle durante nuestra discusión de las técnicas de prueba.

Para escoger apropiadamente las técnicas de control de la condición más rentable y para lograr la eficiencia máxima y una larga vida de los motores, de diseño de motor, las condiciones de operación y los lubricantes deberán ser estudiados con mucho cuidado.

4.3 Técnicas por Condición y Monitoreo

Varias técnicas comunes por condición y monitoreo son aplicadas a motores de gas natural. El análisis de la compresión presión/ángulo de manivela o la curva presión-tiempo (P-T) son técnica muy comunes. Los motores a gas natural tienen algunas variaciones en la combustión de ciclo a ciclo y midiendo las curvas P-T, el analista puede determinar tales condiciones como el consumo alto del combustible, las presiones internas desiguales, las temperaturas altas y el desbalance que causa la detonación, etc. todos los cuales pueden afectar la vida de componentes superiores de cilindro y la eficacia de la lubricación y los sistemas de control de emisiones.

Un análisis de la curva presión volumen (P-V) se puede utilizar para equilibrar los cilindros, esta detecta los problemas en el tren de válvulas y determina las pérdidas por fricción, por comparación de la potencia del motor a la potencia del compresor.

Además, analizando las pautas en la vibración pueden proporcionar al analista una comprensión de ciertas condiciones mecánicas, tal como válvulas quemadas o escape de gas por empaquetadura, etc.

Quizás la técnica más efectiva y económica actual para el control de la condición de motores a gas natural es el análisis de lubricantes. Desafortunadamente, muchos operarios de estos motores a gas natural toman el lubricante como dado y no consideran que el aceite de motor como **otro componente de la máquina**, que debe ser monitoreado como cualquier otro sistema dentro del motor. Las pruebas del análisis del aceite que se deben considerar como parte de un mantenimiento predictivo regularmente planificado y el programa de monitoreo por condición para motores de gas natural incluyen lo siguiente:

1. Viscosidad
2. Numero Base BN
3. Numero Ácido AN
4. Contaminación por Glycol
5. Contaminación por Agua
6. Insolubles
7. Análisis Espectro químico
8. Nitración / Oxidación

Cada una de estas pruebas y recomendaciones tienen su significado y se describen con todo detalle a continuación:

4.4 La Viscosidad

La base del aceite que se usara es de mucha importancia para el desempeño del mismo en el tiempo, recordemos que una base antigua nos proporcionara mayor estabilidad a la oxidación y menos evaporación. Mientras que una base joven por más aditivos que contenga tendrá mayor volatilidad y menor estabilidad a la oxidación en el tiempo.

Sin embargo es necesario usar aditivos para mejorar el desempeño de ciertas propiedades . El caso de los aditivos que contribuirán a la formación de ceniza en la cámara de combustión por ejemplo y que ayudara a prevenir lo que se conoce como **recesión de válvulas** o sea hablamos de un desgaste prematuro. La ceniza cubre las superficies de contacto entre la válvula y el asiento, logrando así mantenerlas separadas y con esto reducir el desgaste, pero sin impedir la transferencia de calor.

El aceite ayuda a enfriar los componentes del motor con los que éste entra en contacto. Por lo tanto, debe mantener su estabilidad térmica y su viscosidad cuando se calienta a las temperaturas normales de trabajo.

A continuación observamos las temperaturas que son recomendadas:

- para Waukesha® la temperatura ideal esta entre 82°C a 85°C
- para Caterpillar® la temperatura ideal esta entre 88°C a 93°C

La viscosidad se debe medir utilizando el método estándar ASTM D445 para medir la viscosidad a 40°C y 100°C. Los resultados son reportados en centistokes, entonces pueden ser comparados con las especificaciones de la viscosidad del aceite nuevo. El significado de estos resultados puede indicar condiciones tales como que el aceite se espeso (un indicador de la oxidación o nitración), niveles incrementados de la contaminación y/o un aumento en los insolubles.

El aceite también mantendrá limpio al motor a través de sus aditivos detergentes, lo cuales se verán a detalle mas adelante.

Las características dispersantes del aceite permitirán que los sólidos y la suciedad se mantengan en suspensión para que los filtros los puedan remover o sean desechados al realizar en cambio de aceite.

Una reducción en la viscosidad puede indicar la dilución del aceite y en el caso de lubricantes de multigrado puede indicar caída del índice de la viscosidad.

4.5 El Número Base o BN (Base Number)

El número base (BN) es una indicación de la reserva alcalina en un aceite de motor. Es un indicador del nivel del detergente/dispersante y de su habilidad para contrarrestar los ácidos.

La prueba estándar es la ASTM D2896 proporciona un indicador exacto del BN, estos resultados pueden ser comparados con el BN del aceite nuevo. Esta prueba indica el agotamiento de aditivos y la regla genérica es que cuando el aceite ha alcanzado el fin de su vida útil el valor del BN se ha reducido al 30% de la especificación del aceite nuevo. El Número base BN esta generalmente acompañado por un incremento en la viscosidad.

El BN se utiliza pocas veces como una prueba para aceites de motor a gas natural a menos que la aplicación opere bajo condiciones de presencia alta de H₂S. Sin embargo es muy recomendable usarla aunque este no será un análisis estándar y tendrá un costo adicional.

Porque la mayoría de los aceites de motores de gas natural son formulados como bajo a medio contenido de ceniza, el número base BN estará generalmente en una gama de tres a siete. Estos

niveles no pueden ser suficientes para proteger motores que utilizan los tradicionales como el diesel o la gasolina.

BN es también una prueba importante de análisis de aceite cuando el combustible en uso contiene niveles altos de azufre y/o halógenos orgánicos, tal como cloro o flúor. Cuando existe alto contenido de azufre agrio o gas sucio en uso, el aceite típico para gas natural disponible quizá no pueda proteger suficientemente el motor de los compuestos ácidos.

En estos casos, el operario de motor puede necesitar acortar los drenajes de aceite, o escoger un aceite con un BN más alto, que proporcionará un nivel más alto de alcalinidad.

Los problemas potenciales de la lubricación causados por el uso de estas clases del combustible se deben discutir entre el fabricante de motor y el suministrador del lubricante.

4.6 Número Ácido o AN (Acid Number)

Los compuestos de cloro y azufre que se encuentran en ciertos combustibles como el gas natural forman ácidos en presencia del aceite, estos ácidos son sumamente corrosivos para las partes interiores del motor. Pueden provocar corrosiones que luego degeneran en fallas catastróficas si no se toman a tiempo medidas proactivas.

Puesto que los ácidos sólo son solubles en soluciones acuosas, no es posible realizar un análisis de pH en el aceite para medir la acidez. Los laboratorios usan la prueba conocida como AN (ver tablas 2 y 3). Cuanto más grande este número la presencia de ácidos será mayor así como el deterioro para la máquina. Los compuestos de azufre y cloro en el gas son las causas comunes para que aumente el AN en el aceite. Sin embargo el AN solo aumenta una vez que la reserva alcalina o BN se ha agotado.

Otra causa probable para el aumento del AN es la formación acelerada de la oxidación y nitración, procesos que veremos en los siguientes capítulos.

El número ácido (AN) es una indicación de niveles incrementados de acidez en el aceite de motor a gas natural, con frecuencia acompañado de aumentos de viscosidad. Las pruebas de AN a menudo se utilizan para establecer intervalos óptimos de cambio de aceite para muchos tipos de aceites industriales, particularmente los utilizados en motores a gas natural. Alto AN es un indicador de nitración, oxidación y contaminación.

La prueba ASTM D664 es la utilizada para realizar este análisis y la regla para esta aplicación es que cuando el AN dobla la del valor nuevo de aceite, el aceite está cerca de su límite de condensación. Como regla general el valor del AN para un aceite nuevo es de 1.

4.7 La Contaminación por Glycol

La prueba para fugas de glycol de acuerdo con ASTM D2982 debe formar parte de cualquier programa del análisis de aceite. Cualquier cantidad de glycol en el análisis puede indicar una fuga de líquido refrigerante en el motor y causar una falla catastrófica por la formación de ácidos corrosivos, lodo y barniz que se forman rápidamente, también causarán una reducción en la película de lubricación, y puede aumentar repentinamente el desgaste. Los aditivos singulares para este fluido son, el **Sodio**, el **Boro** y el **Potasio**. Si son detectados por el análisis de aceite será síntoma de fuga del sistema de enfriamiento. Si también se detecta contenidos de agua será evidencia de una fuga severa en el sistema. Pero el agua no siempre aparece en el reporte de laboratorio. El agua se puede evaporar o simplemente no estar presente en la mezcla porque el agua y el aceite no se han emulsificado. Será obligatorio una vez detectados realizar la inspección de los cojinetes para asegurarse que el refrigerante (glycol) no haya dañado a los cojinetes ni al cigüeñal.

Cuando una muestra presenta este tipo de contaminación, siempre se debe vaciar el aceite del motor y desechar el aceite en uso, así como sus filtros.

4.8 La contaminación por Agua

La contaminación por agua, que puede ser un problema en aceites de motor a gas natural, especialmente en esos motores que exhiben altas tasas de flujo y turbulencia, se debe determinar utilizando ASTM D1744 o la D93.

Los sistemas pueden experimentar problemas de espuma con tan poco como 100 ppm a 300 ppm de agua. Esto es de particular importancia en motores donde las temperaturas del aceite son demasiado bajas. La evaporación no puede ocurrir y la baja que temperaturas a la que opera el aceite crea las condiciones necesarias para desarrollar la nitración. Esto es la razón “principal” de que los fabricantes de motor de gas natural recomiendan que sus motores corran con temperaturas de aceite en una gama de 180°F a 185°F (82°C a 85°C).

Cuándo la temperatura del aceite de motor opera a una temperatura desconocida, por ejemplo 120°F (49°C) esta debe ser añadida a la temperatura del ambiente para obtener la temperatura estimada del cárter de aceite. La temperatura resultante del aceite entonces debe ser confirmada con el fabricante del motor o su tabla para determinar si es esta es aceptable

4.9 Contaminación por Silicio

Está presente en suspensión como polvo en el aire. En caso de encontrar este elemento en el reporte de análisis de aceite por lo general significa que el polvo del aire esta ingresando y contaminando el aceite. Puede ser resultado de una empaquetadura que no está sellando bien en el filtro de aire o en el múltiple de admisión. Otra opción de su existencia en el análisis puede ser que si la presión negativa (vacío) en el cárter es muy alta, en otras palabras se esta chupando aire sin filtrar al interior del motor.

El silicio también puede aparecer en los análisis debido a un tipo de compuestos denominados “silógenos” (siloxanes en inglés), comunes en los gases de digestores o gases sucios. Estos provienen de una variedad de fuentes como los detergentes, cosméticos y la industria de la pintura. Los silógenos generalmente no se pueden separar del gas. Cuando el combustible contiene silógenos, estos forman durante la combustión un tipo de silicio que no es abrasivo pero que aparecerá en el análisis de aceite. Si se detectan altos niveles de silicio, se debe verificar si están acompañados del desgaste de metales. Si no se encuentran estos metales, entonces es muy probable que ese silicio sea derivado de los silógenos

Sin embargo si se encuentran altos niveles de metales de desgaste, el silicio será abrasivo y será la fuente de contaminación del aceite. Por tanto es fundamental encontrar y eliminar la causa.

4.10 Insolubles

Insolubles son los contaminantes sólidos que se quedan en el aceite, tal como polvo, las partículas de tierra y carbón, para llevar además metales que no se han quitado por filtración. Cuando los insolubles están presentes, especialmente en cantidades grandes, ellos pueden promover la espuma y aumentar generalmente la viscosidad del aceite.

Además, algunos motores de gas natural que operan en una condición de desbalance engendrarán hollín debido a la combustión incompleta.

Es importante que estos contaminantes insolubles sean monitoreados y controlados y que ellos sean medidos por técnicas tales como la precipitación, centrifugación, gravimetría o métodos de conteo de partículas.

Tal técnica, que se realiza de acuerdo con ASTM D4055, mide insolubles por filtrado en una cantidad de aceite diluido con pentano a través de un filtro de 0.8 micras y entonces pesando el depósito restante el filtro se seca. El depósito se puede ver también bajo un microscopio y un experimentado analista u operario de motor puede evaluar las partículas para acción adicional futura (proactividad).

Un resultado de esta prueba es la determinación que el sistema de lubricación por si mismo (depósitos, carcasas de filtro, tuberías y tanques de asentamiento) puede requerir limpiado y soplado.

4.11 El Análisis Espectro químico

El análisis espectro químico mide los niveles de desgaste de metales y la concentración de aditivos. Los resultados, generalmente informado en partes por millón (ppm), proporciona una indicación de las tasas de desgaste de los componentes de motor y el agotamiento de aditivos.

Tres cosas deben ser tenidas presente cuando se interpreta el análisis espectro químico. Primero, las partículas de desgaste analizadas son limitadas generalmente de 5 a 6 micras. (Esas partículas que son el resultado de desgaste, pero no son la causa de este). En segundo lugar, las tendencias de la tasa de desgaste se establecen mejor después de la interpretación de por lo menos tres muestras de aceite tomadas en el mismo intervalo de muestreo; en otras palabras, en tres intervalos semejantes del cambio de aceite, o si el aceite no ha sido cambiado, en el mismo periodo de operación, tales como 500 horas. Finalmente, es un error asumir que cada motor de la misma marca y modelo exhibirá el mismo nivel de desgaste o tendencia. Cada motor exhibirá su propia tasa de desgaste o “impresión dactilar” y mantener un exacto y completo control de registro y es esencial si los datos llegaran a ser útiles para evaluar la condición de motor

4.12 La Ceniza Sulfatada

Ninguna discusión del análisis elemental de aceites de motor a gas natural es completa sin un comentario respecto al asunto del contenido de ceniza sulfatada. La operación del motor a gas natural tiende a formar varios depósitos tales como barniz, lodo y un residuo de ceniza que se queda después que el aceite se quema durante la operación.

El barniz y el lodo son controlados por los aditivos detergentes/dispersantes, sin embargo estos aditivos detergentes/dispersantes tienden a dejar un residuo gris y vellosa de ceniza después que el aceite se ha quemado. Este residuo de la ceniza es un compuesto de sulfatos de metales tales como el bario, el calcio, el fósforo, el zinc, el magnesio y el boro. En la tabla 1 se observa los tipos de aceites y sus contenidos de ceniza respectiva.

Table 1

Oil Category	Ash Content
Ashless	Less than 0.1 percent
Low Ash	0.1 - 0.5 percent
Medium Ash	0.5 - 1.5 percent
High Ash	Greater than 1.5 percent

Note: These are general guidelines only. Most oil formulators now list the sulfated ash percentages, as well as the concentration of the additive levels in PPM in their specification data.

Tabla 4.1. Categorías de aceites y sus contenidos de cenizas

1. **High Ash**, con un alto nivel de ceniza, estos niveles pueden llegar hasta 3%. Como ejemplo comentamos que Waukesha® considera demasiado este nivel. Por ejemplo, si el combustible contiene H₂S o sulfuro de hidrogeno, el nivel alto de ceniza ayudara a neutralizar los ácidos que se formen contra este componente del gas. Sin duda un análisis de aceite ayudara a determinar si este es el aceite requerido.
2. **Médium Ash**, ceniza media entre 0.5 y 1.5%, gran parte de los fabricantes especifican este tipo de lubricante.
3. **Low Ash**, con bajo contenido de ceniza entre 0.1 y 1.5%, recomendado para motores de aspiración natural o que estén equipados con convertidor catalítico.
4. **Ashless**, con un contenido menor al 0.1% de ceniza, también conocido como sin ceniza, Waukesha® ni CAT® no recomiendan este tipo de lubricante, el uso de este puede ocasionar desgaste excesivo de camisas y anillos así como recesión acelerada de válvulas.

Por lo tanto, los formuladores de los lubricantes deben asegurar que estas concentraciones de aditivos son suficientemente altas para ayudar a prevenir la recesión de válvulas, pero no tan altas como para causar depósitos no deseados y perjudiciales que puedan llegar a ser ineficaces. (tas respectivas).

Esta es la ultima parte de una serie de tres, que rescatan en forma muy resumida esta insondable ciencia, comprenderá el lector que es imposible abarcar todos los términos y definiciones que encierra la Tribologia, esperamos que cualquier duda o requerimiento de mayor información la hagan llegar por este mismo medio para que estas sean aclaradas, los esperamos para el próximo boletín, atte.

Widman International SRL contribuye a la capacitación de los ingenieros y usuarios en Bolivia para mejorar su competitividad. Para mayores informaciones prácticas, visite nuestra página Web: www.widman.biz

Si usted conoce a otra persona que estará interesada en recibir estos boletines, favor responder al scz@widman.biz recibir estos boletines mensualmente, favor responder al scz@widman.biz con "**remover**" en el asunto.

La información de este boletín técnico, es de única y completa propiedad de Widman International S.R.L. Su reproducción solo será permitida a través de una solicitud a scz@widman.biz no permitiendo que esta altere sus características ni su totalidad.